

**PENGARUH PERSEN REDUKSI TERHADAP
KARAKTERISTIK KOMPOSIT Al 6061 BERPENGUAT
ALUMINA (Al₂O₃) HASIL PROSES *THIXOFORMING*
DAN *ARTIFICIAL AGING***

Skripsi

**Untuk memenuhi sebagian persyaratan mencapai derajat S1
pada Jurusan Teknik Mesin Universitas Sultan Ageng Tirtayasa**



Disusun Oleh:

Ghifari Arifianto

3331200084

**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA
CILEGON-BANTEN**

2024

**PENGARUH PERSEN REDUKSI TERHADAP
KARAKTERISTIK KOMPOSIT Al 6061 BERPENGUAT
ALUMINA (Al₂O₃) HASIL PROSES *THIXOFORMING*
DAN *ARTIFICIAL AGING***

Skripsi

**Untuk memenuhi sebagian persyaratan mencapai derajat S1
pada Jurusan Teknik Mesin Universitas Sultan Ageng Tirtayasa**



Disusun Oleh:

Ghifari Arifianto

3331200084

**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA
CILEGON-BANTEN**

2024

TUGAS AKHIR

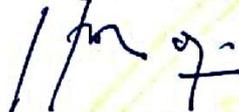
Pengaruh Persen Reduksi Terhadap Karakteristik Komposit Al 6061 Berpenguat Alumina (Al₂O₃) Hasil Proses Thixoforming dan Artificial Aging

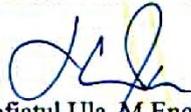
Dipersiapkan dan disusun Oleh :

Ghifari Arifianto
333120084

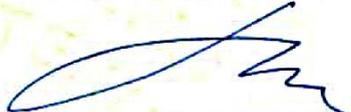
telah dipertahankan di depan Dewan Penguji
pada tanggal, 25 September 2024

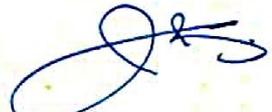
Pembimbing Utama


Prof. Dr. Eng. A. Ali Alhamidi, ST., MT.
NIP.197312131999031001


Shofiatul Ula, M.Eng.
NIP. 198403132019032009

Anggota Dewan Penguji


Ir. Dhimas Satria, S.T., M.Eng
NIP.198305102012121006


Ir. Dedy Triawan Suprayogi, ST., M. Eng., Ph. D.
NIP. 198206212022031001


Prof. Dr. Eng. A. Ali Alhamidi, ST., MT.
NIP.197312131999031001


Shofiatul Ula, M.Eng.
NIP. 198403132019032009

**Tugas Akhir ini sudah diterima sebagai salah satu persyaratan
untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**



Tanggal, 08 Oktober 2024
Ketua Jurusan Teknik Mesin UNTIRTA


Ir. Dhimas Satria, S.T., M.Eng.
NIP. 198305102012121006

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan di bawah ini,

Nama : Ghifari Arifianto

NIM : 3331200084

Judul : Pengaruh Persen Reduksi Terhadap Karakteristik Komposit
Al 6061 Berpenguat Alumina (Al₂O₃) Hasil Proses *Thixoforming*
dan *Artificial Aging*

Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Universitas Sultan Ageng Tirtayasa,

MENYATAKAN

Bahwa skripsi ini hasil karya sendiri dan tidak ada duplikasi dengan karya orang lain, kecuali untuk yang telah disebutkan sumbernya.

Cilegon, 25 September 2024



A handwritten signature in black ink, appearing to read "Ghifari Arifianto".

Ghifari Arifianto

NIM. 3331200084

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, hidayah, dan inayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul "Pengaruh Porsen Reduksi Terhadap Karakteristik Komposit Al 6061 Berpenguat Alumina (Al_2O_3) Hasil Proses *Thixoforming* dan *Artificial Aging*" ini dengan baik dan tepat waktu. Pada kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, bimbingan, serta bantuan selama proses penyusunan skripsi ini, terutama kepada:

1. Bapak Ir. Dhimas Satria, S.T., M.Eng. Selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
2. Bapak Prof. Dr.Eng Ir. Hendra, S.T., M.T. Selaku Dosen Pembimbing Akademik yang senantiasa mengarahkan selama masa perkuliahan
3. Bapak Prof. Dr.Eng Ir. A. Ali Alhamidi, S.T., M.T. Selaku Dosen Pembimbing Skripsi 1 yang senantiasa memberikan ilmu dan pengalamannya selama penelitian berlangsung
4. Ibu Shofiatul Ula, M.Eng. Selaku Dosen Pembimbing skripsi 2 yang senantiasa membimbing dan mengingatkan selama penelitian berlangsung
5. Bapak Yusvardi Yusuf, S.T., M.T. Selaku Koordinator Tugas Akhir Jurusan Teknik Mesin Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
6. Bapak Prof. Dr. Muhammad Rifai, S.Si., M.eng. Selaku Pembimbing pada proses di *rolling* Badan Riset Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)
7. Seluruh staff dan jajaran dosen Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
8. Bapak Ir. Gatot Prihantono dan Ibu Budiarti, S.Pd. Selaku kedua orang tua yang selalu mendukung, mendoakan, dan membantu penulis
9. Annisa Gati Astari, S.T. Selaku kakak dari penulis yang selalu memberikan mendukung, mendoakan, dan memberi nasihat penulis

10. Sheikhan Azmi Riyanto, Tristan Verrill Adam, Narendra Putra Vendana, Muhammad Farrel Ludira, dan Muhammad Naufal Hanif. Selaku tim dalam penelitian bertema *Thixoforming*
11. Seluruh teman-teman Teknik Mesin angkatan kapal (2020) Universitas Sultan Ageng Tirtayasa yang saling membantu selama perkuliahan berlangsung
12. Seluruh pihak yang terlibat dalam Tugas Akhir ini, baik secara praktik maupun secara teori

Skripsi tugas akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana di Program Studi Teknik mesin, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi kesempurnaan skripsi ini di masa mendatang.

Cilegon, September 2024



Ghifari Arifianto

ABSTRAK

Dalam industri otomotif dan kendaraan listrik, pemilihan material yang kuat namun ringan sangat penting untuk meningkatkan efisiensi dan performa produk. Penggunaan material seperti baja telah lama menjadi standar karena kekuatannya yang tinggi, namun bobotnya yang berat menjadi kendala dalam meningkatkan efisiensi bahan bakar, terutama pada kendaraan listrik. Aluminium Al 6061 menjadi alternatif yang menjanjikan karena sifatnya yang ringan, tahan korosi, dan memiliki kekuatan yang cukup baik. Dengan penguatan partikel keramik seperti Alumina (Al_2O_3), serta melalui proses *thixoforming* dan *artificial aging*, Al 6061 memiliki potensi besar untuk menggantikan baja dalam industri otomotif.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh variasi persen reduksi dalam proses rolling terhadap sifat mekanik dan mikrostruktur komposit Al 6061 yang diperkuat dengan Alumina (Al_2O_3). Dengan memahami bagaimana persen reduksi mempengaruhi deformasi plastis, distribusi penguat Alumina (Al_2O_3), serta perubahan mikrostruktur akibat *thixoforming* dan *artificial aging*, diharapkan dapat ditemukan konfigurasi yang optimal untuk menghasilkan material dengan kekuatan dan ketahanan yang lebih baik.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan persen reduksi dalam proses rolling berdampak signifikan terhadap kekerasan dan ketangguhan komposit. Pada reduksi 5%, nilai kekerasan meningkat dari 11,8 HRB pada Al 6061 murni menjadi 43,1 HRB, dan terus meningkat hingga mencapai 51,8 HRB pada reduksi 15%. Nilai dampak juga mengalami peningkatan dari 0,024 J/mm² menjadi 0,0581 J/mm² pada reduksi 15%. Peningkatan ini disebabkan oleh deformasi plastis yang lebih besar, *dynamic recrystallization* (DRX), serta distribusi penguat Al_2O_3 yang lebih homogen, yang memperkuat struktur mikro dan sifat mekanik komposit secara keseluruhan.

Kata kunci: Aluminium Al 6061, Alumina (Al_2O_3), *thixoforming*, *artificial aging*, *rolling*, komposit.

ABSTRACT

In the automotive and electric vehicle industries, selecting materials that are both strong and lightweight is crucial for enhancing product efficiency and performance. Steel has long been the standard due to its high strength, but its heavy weight poses challenges in improving fuel efficiency, particularly for electric vehicles. Aluminum Al 6061 has emerged as a promising alternative due to its lightweight, corrosion resistance, and adequate strength. When reinforced with ceramic particles like Alumina (Al₂O₃) and processed through thixoforming and artificial aging, Al 6061 shows great potential to replace steel in automotive industries applications.

This research aims to investigate the effect of different rolling reduction percentages on the mechanical properties and microstructure of Al 6061 composite reinforced with Alumina (Al₂O₃). By understanding how reduction percentages influence plastic deformation, the distribution of Al₂O₃ reinforcements, and the microstructural changes induced by thixoforming and artificial aging, this study seeks to identify the optimal configuration for enhancing the strength and durability of the material.

The results of the study show that increasing the rolling reduction percentage significantly impacts the hardness and toughness of the composite. At a 5% reduction, the hardness increased from 11.8 HRB for pure Al 6061 to 43.1 HRB, and continued to rise, reaching 51.8 HRB at a 15% reduction. Impact values also improved, from 0.024 J/mm² to 0.0581 J/mm² at a 15% reduction variation. These improvements are attributed to greater plastic deformation on rolling process, dynamic recrystallization (DRX), and a more homogeneous distribution of Al₂O₃ reinforcements, all of which strengthen the microstructure and overall mechanical properties of the composite.

Keywords: Aluminum Al 6061, Alumina (Al₂O₃), *thixoforming*, *artificial aging*, *rolling*, *composite*.

DAFTAR ISI

	Halaman.
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR KEASLIAN SKRIPSI	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiv
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Manfaat Penelitian	2
1.5 Metodologi Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 <i>State of Art</i>	4
2.2 <i>Thixoforming</i>	5
2.3 <i>Artificial Aging</i>	6
2.4 <i>Rolling</i>	7
2.5 Komposit	8
2.6 Aluminium Al 6061	10
2.7 Alumina (Al ₂ O ₃)	11
2.8 Uji Impak	11
2.9 Uji Kekerasan.....	12
2.10 Uji Struktur Mikro	13

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian	14
3.2 Alat dan Bahan	16
3.2.1 Alat	16
3.2.2 Bahan	24
3.3 Prosedur Penelitian	27
3.3.1 Proses <i>Stir Casting</i>	27
3.3.2 Proses <i>Thixoforming</i>	31
3.3.3 Proses <i>Rolling</i>	34
3.3.4 Proses <i>Heat Treatment</i>	36
3.3.5 Proses <i>Artificial Aging</i>	37
3.3.6 Proses Uji Impak	38
3.3.7 Proses Uji Kekerasan	39
3.3.8 Proses Uji Struktur Mikro	40
3.3.9 Proses Pengelolaan Data	41
3.4 Variabel Penelitian	42

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 <i>Stir Casting</i>	43
4.2 <i>Thixoforming</i>	44
4.3 <i>Rolling</i>	44
4.4 <i>Precipitation Hardening</i>	46
4.5 Hasil Uji Struktur Mikro	46
4.6 Hasil Uji Kekerasan	51
4.7 Hasil Uji Impak	52

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan	56
5.2 Saran	57

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

	Halaman.
Gambar 2.1 Tahapan pemrosesan <i>Thixoforming</i>	5
Gambar 2.2 Grafik <i>artificial aging</i> pada aluminium	6
Gambar 2.3 Proses <i>rolling</i> pada lembaran logam	7
Gambar 2.4 <i>Defects</i> pada proses pengerolan.....	8
Gambar 2.5 Jenis penguat dalam komposit	9
Gambar 2.6 Struktur kimia aluminium oxide.....	11
Gambar 2.7 Metode Uji Impak.....	12
Gambar 2.8 Uji kekerasan rockwell	12
Gambar 2.9 Hasil SEM dan EDS	13
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	15
Gambar 3.2 Peralatan Keselamatan.....	16
Gambar 3.3 Alat Pemadam Api Ringan	16
Gambar 3.4 Cetakan Spesimen.....	17
Gambar 3.5 Timbangan Digital	17
Gambar 3.6 Tungku <i>Stir Casting</i>	18
Gambar 3.7 Alat Penunjang <i>Stir Casting</i>	18
Gambar 3.8 <i>Crucible</i>	18
Gambar 3.9 Kepala <i>Torch</i>	19
Gambar 3.10 Mesin Bor Pengaduk.....	19
Gambar 3.11 Jangka Sorong.....	20
Gambar 3.12 Mesin Gerinda	20
Gambar 3.13 <i>Muffle Furnace</i>	20
Gambar 3.14 Mesin Press.....	21

Gambar 3.15 <i>Thermogun</i>	21
Gambar 3.16 Mesin <i>Rolling</i>	22
Gambar 3.17 Wadah Air.....	22
Gambar 3.18 Mesin Grinding dan Polishing	22
Gambar 3.19 Alat Uji Kekerasan Rockwell	23
Gambar 3.20 Alat Uji Impak	23
Gambar 3.21 Alat Uji Struktur Mikro	23
Gambar 3.22 Aluminium Al 6061	24
Gambar 3.23 Alumina	24
Gambar 3.24 Gas LPG.....	25
Gambar 3.25 Air	25
Gambar 3.26 Es Batu.....	25
Gambar 3.27 Amplas.....	26
Gambar 3.28 Bludru	26
Gambar 3.29 Pasta Alumina.....	27
Gambar 3.30 Pemotongan Aluminium.....	27
Gambar 3.31 Penimbangan Komposisi Komposit	28
Gambar 3.32 Proses pemanasan	29
Gambar 3.33 Proses pengadukan komposit.....	29
Gambar 3.34 Dimensi Cetakan pada Software <i>Solidworks</i>	30
Gambar 3.35 Proses pembersihan dan pemanasan cetakan.....	30
Gambar 3.36 Proses penuangan cetakan	31
Gambar 3.37 Hasil proses <i>stir casting</i>	31
Gambar 3.38 Suhu pada <i>furnace (thixoforming)</i>	32
Gambar 3.39 Proses pemindahan cetakan	32

Gambar 3.40 Pemantauan suhu cetakan	33
Gambar 3.41 Proses <i>pressing</i>	33
Gambar 3.42 Hasil proses <i>thixoforming</i>	34
Gambar 3.43 Hasil sampel <i>thixoforming</i>	34
Gambar 3.44 Mesin <i>Rolling</i>	35
Gambar 3.45 Proses pengerolan	36
Gambar 3.46 Pengukuran ketebalan sampel sebelum dan sesudah.....	36
Gambar 3.47 Proses <i>Solutioning</i>	37
Gambar 3.48 Suhu pada <i>furnace (Solutioning)</i>	37
Gambar 3.49 Suhu air untuk proses <i>quenching</i>	37
Gambar 3.50 Spesimen ASTM E23	38
Gambar 3.51 Peletakan spesimen pada Uji impak	39
Gambar 3.52 Spesimen Uji Kekerasan.....	40
Gambar 3.53 Spesimen Uji Struktur Mikro.....	41
Gambar 4.1 Uji SEM perbesaran 500×	47
Gambar 4.2 Hasil Iterasi Pengukuran Butir dengan <i>Software ImageJ</i>	49
Gambar 4.3 <i>Mapping</i> Uji EDX	50
Gambar 4.4 Grafik Uji Kekerasan AA 6061 & Alumina.....	51
Gambar 4.5 Grafik Uji Impak AA 6061 & Alumina.....	52
Gambar 4.6 <i>Defect</i> pada spesimen uji impak	53
Gambar 4.7 Hasil patahan pada uji impak.....	53
Gambar 4.8 Permukaan Patahan Uji Impak dengan SEM	54

DAFTAR TABEL

	Halaman.
Tabel 2.1 Komposisi Aluminium Al 6061	11
Tabel 4.1 Berat Paduan Komposit.....	43
Tabel 4.2 Reduksi Ketebalan pada Proses <i>Thixoforming</i>	44
Tabel 4.3 Pengukuran Ketebalan Sebelum Proses <i>Rolling</i>	45
Tabel 4.4 Pengukuran Ketebalan Sesudah Proses <i>Rolling</i>	45
Tabel 4.5 Reduksi Ketebalan pada Proses <i>Rolling</i>	45
Tabel 4.6 Distribusi Butir Sampel	48
Tabel 4.7 Hasil Uji EDX	49
Tabel 4.8 Hasil Uji Kekerasan AA 6061 & Alumina.....	51
Tabel 4.9 Hasil Uji Impak AA 6061 & Alumina	52

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam dunia industri otomotif dan manufaktur, pemilihan material yang memiliki kekuatan tinggi namun tetap ringan menjadi salah satu faktor penting untuk meningkatkan efisiensi energi dan performa produk. Pada komponen seperti bodi mobil, *engine guard*, dan rangka sepeda listrik, penggunaan material yang tepat dapat berpengaruh besar terhadap daya tahan, efisiensi bahan bakar, serta kenyamanan pengguna. Sebelumnya material besi sering digunakan karena sifatnya yang kuat dan tahan lama. Namun, kekurangan dari besi adalah bobotnya yang relatif berat, yang dapat mengurangi efisiensi bahan bakar dan performa kendaraan khususnya pada kendaraan listrik.

Seiring dengan perkembangan teknologi material, aluminium, khususnya paduan Al 6061, semakin banyak digunakan sebagai alternatif pengganti besi. Al 6061 memiliki kombinasi sifat mekanik yang baik, termasuk kekuatan yang memadai, ketahanan terhadap korosi, dan berat yang lebih ringan dibandingkan baja. Peningkatan sifat mekanik Al 6061 dapat dicapai melalui penguatan dengan partikel keramik seperti Alumina (Al_2O_3), yang membentuk komposit. Proses-proses seperti *thixoforming* dan *artificial aging* juga terbukti mampu meningkatkan sifat mekanik paduan ini, sehingga Al 6061 berpotensi menggantikan material sebelumnya dalam berbagai aplikasi teknik.

Pada penelitian ini memiliki tujuan untuk meneliti lebih lanjut pengaruh variasi persen reduksi *rolling* terhadap karakteristik komposit Al 6061 yang diperkuat dengan Alumina (Al_2O_3) dengan berbagai pengaplikasian dari komposit pada penelitian ini seperti bodi mobil, *engine guard*, dan rangka sepeda listrik, di mana material yang kuat namun massa yang ringan sangat dibutuhkan. Dengan memahami bagaimana proses *thixoforming* dan *artificial aging* mempengaruhi sifat mekanik komposit, diharapkan material ini dapat menjadi solusi yang lebih efisien dan tahan lama dalam industri transportasi dan kendaraan listrik.

1.2 Rumusan Masalah

Dalam penelitian ini, akan diuraikan serangkaian pertanyaan yang menjadi rumusan masalah, berikut adalah rumusan masalah yang dibahas pada penelitian ini

1. Bagaimana pengaruh persen reduksi terhadap sifat mekanik Al 6061 dengan berpenguat Alumina (Al_2O_3) hasil dari proses *thixoforming* dan *Artificial aging*?
2. Bagaimana karakteristik dari material Al 6061 dengan berpenguat Alumina (Al_2O_3) hasil dari proses *thixoforming* dan *Artificial aging*?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan pada latar belakang dan rumusan masalah yang telah disebutkan sebelumnya, tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut

1. Menganalisis pengaruh persen reduksi terhadap struktur mikro pada Komposit Aluminium Al 6061 berpenguat Alumina (Al_2O_3) hasil dari proses *thixoforming* dan *artificial aging*.
2. Menganalisis pengaruh persen reduksi terhadap uji kekerasan pada Komposit Aluminium Al 6061 berpenguat Alumina (Al_2O_3) hasil dari proses *thixoforming* dan *artificial aging*.
3. Menganalisis pengaruh persen reduksi terhadap uji impak pada Komposit Aluminium Al 6061 berpenguat Alumina (Al_2O_3) hasil dari proses *thixoforming* dan *artificial aging*.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian yang didapat adalah sebagai berikut.

1. Bagi industri memberikan manfaat pada bidang yang terkait dengan topik penelitian ini. Seperti pada bidang manufaktur, otomotif, dan dirgantara
2. Bagi peneliti untuk menjadikan referensi pada peneliti berikutnya yang membahas tentang *Thixoforming*.
3. Bagi akademik emberi pengetahuan tentang *Thixoforming* pada material Al 6061 berpenguat Alumina (Al_2O_3) dan sifat mekanik yang dihasilkan.

1.5 Metodologi Penelitian

Metodologi pada penelitian ini merupakan eksperimen dengan batasan masalah yang ditentukan. Adapun metodologi penelitian yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Material yang digunakan adalah Aluminium Al 6061 dan Alumina (Al_2O_3)
2. Komposit digabungkan menggunakan metode *stir casting* dengan material Aluminium Al 6061 berpenguat Alumina (Al_2O_3)
3. Komposit diproses menggunakan metode *thixoforming* dan *rolling* dengan material Aluminium Al 6061 berpenguat Alumina (Al_2O_3)
4. Komposit dilakukan perlakuan panas dengan tahap *solutioning*, *quenching*, dan *artificial aging*
5. Pengujian menggunakan uji impak, uji kekerasan, dan uji struktur mikro

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *State of Art*

Dalam penelitian dilakukan, terdapat penelitian sebelumnya yang dapat dijadikan sebagai referensi. Referensi tersebut bisa berfungsi sebagai panduan dan acuan dalam pelaksanaan penelitian ini, terutama terkait metode yang digunakan. Hal ini akan sangat membantu dalam menjalankan penelitian yang akan dilakukan.

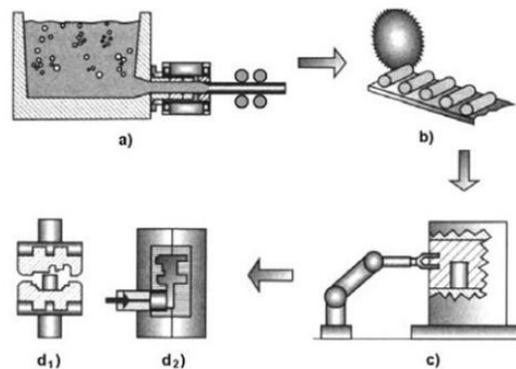
Referensi pertama pada penelitian ini adalah dari penelitian yang dilakukan oleh Zulfahmi yang berjudul “Pengaruh Penambahan Fraksi Volume Al₂O₃ Terhadap Kekuatan Tarik dan Densitas Komposit Al₅CU/ Al₂O₃ Melalui Proses *Semi-Solid Thixoforming*” Penelitian tersebut membahas tentang proses pembuatan ingot dengan metode *thixoforming* untuk melihat pengaruh fraksi volume yang ditambahkan

Referensi kedua yaitu dari penelitian Aytekin Polat, Mustafa Avsar, dan Fahrettin Ozturk yang berjudul “*Effects Of The Artificial-aging Temperature And time On The Mechanical Properties And Springback Behavior Of AA6061*” Pada penelitian tersebut membahas tentang efek waktu dan temperatur pada proses artificial aging. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa variasi waktu dan suhu yang menghasilkan hasil terbaik adalah penuaan antara 5 jam dan 40 jam pada suhu 180 °C. Kombinasi ini menunjukkan kekerasan maksimum, kekuatan luluh, dan kekuatan tarik dari paduan tersebut

Referensi ketiga yaitu dari penelitian Topic, I, Höppel, H.W. & Göken, M yang berjudul “*Influence of rolling direction on strength and ductility of aluminium and aluminium alloys produced by accumulative roll bonding*” Penelitian tersebut membahas tentang pengaruh *rolling* pada kekuatan material, khususnya pada aluminium dan paduan aluminium yang diproses melalui *accumulative roll bonding* (ARB), menunjukkan peningkatan kekuatan spesifik yang signifikan.

2.2 Thixoforming

Thixoforming merupakan singkatan dari *thixotropic forming* adalah teknik pembentukan logam yang relatif baru ditemukan dan dikembangkan, pembentukan logam pada fase *semi-solid* ditemukan pada tahun 1970 oleh Flemings dan teman kerjanya yang mempelajari tentang perilaku logam pada fase *semi-solid*. Lekas dari itu pembentukan logam *semi solid* digunakan pada industri otomotif untuk membuat komponen chassis, silinder rem, hingga velg. Sehingga memulai banyak perkembangan yang dipatenkan pada saat itu, membuat pembentukan logam *semi-solid* memiliki pengaruh terhadap kemajuan di bidang industri dan sains. [1]



Gambar 2.1 Tahapan pemrosesan *Thixoforming*

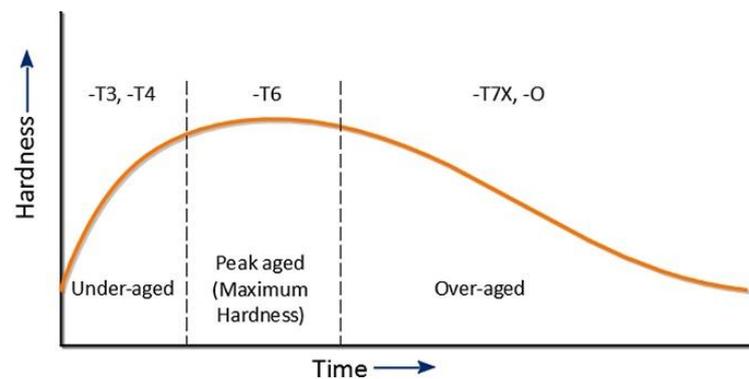
Thixoforming merupakan suatu teknik pembentukan logam yang memanfaatkan perilaku logam pada suhu transisi antara *solidus* dan *liquidus*, penelitian pada *thixoforming* pada saat ini memiliki fokus pada material mentah untuk memproduksi komponen dengan sifat mekanis yang unggul sehingga hasil *thixoforming* seringkali digunakan pada bidang otomotif. Proses pembentukan logam menggunakan teknik *thixoforming* juga menghasilkan sedikit komponen cacat pengecoran seperti makrosegrasi, penyusutan dan porositas. Tahapan proses *thixoforming* dapat dilihat pada Gambar 2.1 yaitu (a) proses pengecoran batang, (b) memotong batang, (c) memanaskan batang menjadi *semi-solid*, dan (d) pembentukan [2]

Dibandingkan dengan metode penempaan konvensional, *thixoforming* memiliki keunggulan pada saat membentuk geometri yang kompleks dikarenakan beban penempaan yang lebih ringan dibandingkan dengan

penempaan konvensional yang dimana geometri yang terbatas. Namun proses produksi dengan metode penempaan konvensional memerlukan waktu yang sedikit dibandingkan dengan *thixoforming* yang memakan waktu untuk proses solidifikasi. [1]

2.3 Artificial Aging

Artificial aging atau dapat disebut penuaan buatan adalah perlakuan panas pada aluminium untuk meningkatkan kekuatan dan kekerasan, dengan menurunkan tingkat elastisitasnya. Pada penuaan ini dapat dilakukan secara natural dengan didiamkan selama bertahun-tahun atau dapat diselesaikan dengan buatan. *Artificial aging* dapat diselesaikan dengan memanaskan larutan paduan yang diberi perlakuan panas kepada aluminium tersebut. Temperatur harus dibawah titik rekristalisasi tetapi cukup tinggi untuk membentuk presipitat lebih cepat. Setelah presipitat memiliki ukuran yang sesuai, maka logam akan segera didinginkan untuk mencegah pembesaran lebih lanjut.



Gambar 2.2 Grafik *artificial aging* pada aluminium

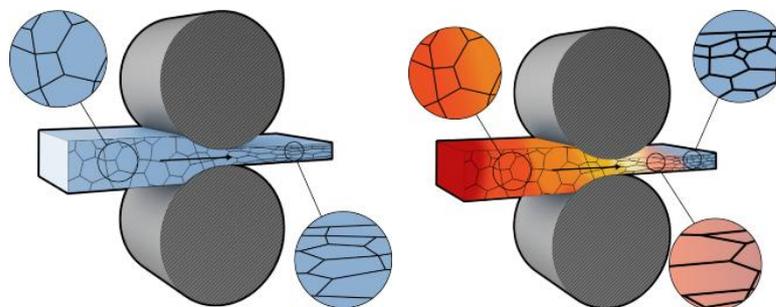
Pengerasan presipitat adalah proses di mana kekerasan, kekuatan hasil, dan kekuatan akhir mengalami peningkatan dari waktu ke waktu pada suhu penuaan yang konsisten. Setelah pendinginan yang cepat dari suhu yang jauh lebih tinggi. Pendinginan cepat atau proses *quenching* ini menyebabkan larutan padat yang *supersaturated* dan berfungsi sebagai dorongan untuk presipitat. Memanaskan material yang sudah di *quenching* dengan suhu 95° sampai dengan 205°C mempercepat presipitasi pada aluminium yang sudah dilakukan perlakuan panas. Seperti pada Gambar 2.2 perubahan struktur tergantung pada

waktu dan suhu, peningkatan kekuatan pada *artificial aging* dapat melampaui tegangan maksimum material yang berarti aluminium dapat mengalami penurunan *ductility* dan kekakuan. Penuaan berlebihan mengurangi kekuatan tegangan dan meningkatkan ketahanan terhadap korosi. Hal ini juga meningkatkan Pertumbuhan retak lelah serta memberikan stabilitas dimensi ke komponen [3].

Proses *artificial aging* dilakukan setelah proses *solutioning* dan *quenching*, proses tersebut dinamakan proses *precipitation hardening*. *Solutioning* merupakan proses pemanasan logam paduan hingga suhu tinggi untuk melarutkan elemen-elemen paduan secara homogen dalam matriks logam, untuk material AA 6061 *solutioning* dilakukan pada suhu 475–625°C pada waktu 30, 60, dan 90 menit [4]. Setelah dilakukan *solutioning*, *quenching* dilakukan dengan tujuan untuk mendinginkan logam secara cepat agar mengunci struktur mikro dan mencegah terbentuknya fasa yang tidak diinginkan, sehingga meningkatkan kekuatan dan kekerasan material, *quenching* dilakukan menggunakan air, minyak, dan udara. [5].

2.4 Rolling

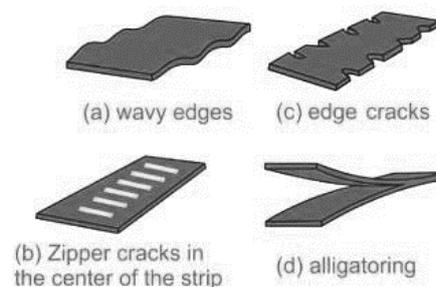
Rolling merupakan proses manufaktur yang bertujuan untuk mengubah bentuk benda logam dengan menekan benda tersebut dengan dua gulungan yang berputar, pada proses *rolling* terdapat dua metode yaitu *hot rolling* dan *cold rolling*. Proses *rolling* ini digunakan untuk menghasilkan lembaran dengan ketebalan yang berbeda-beda, termasuk untuk mereduksi ketebalan spesimen uji tarik yang akan dilakukan pada penelitian ini. [6]



Gambar 2.3 Proses *rolling* pada lembaran logam

Proses *rolling* dapat mempengaruhi sifat mekanik pada logam sesuai dengan reduksi ketebalan, semakin tinggi reduksi ketebalan maka semakin besar perubahan sifat mekaniknya. Proses *cold rolling* pada aluminium menghasilkan karakteristik yang unggul dibandingkan dengan *hot rolling*, terutama dalam tingkat kekerasan material, kekuatan mekanik, toleransi dan dimensi karena penyusutan. Oleh karena itu, dimensi logam menunjukkan keakuratan lebih baik dan permukaan yang lebih halus dibandingkan dengan proses *hot rolling*. [6]

Pada proses pengerolan dapat terjadi sebuah *defect* pada sampel yang dilakukan proses pengerolan. Beberapa cacat pengerolan yang paling umum adalah tepi bergelombang (*wavy edges*), retakan risleting (*zipper cracks*) di tengah strip, retakan di tepi (*edge crack*), dan retakan buaya (*alligating*). [7]



Gambar 2.4 *Defects* pada proses pengerolan [7]

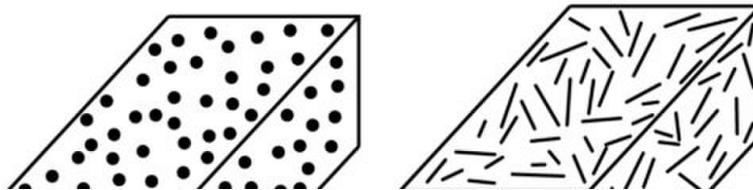
Defect pada proses pengerolan dapat dicegah dengan cara kalibrasi dan pemeliharaan mesin secara teratur untuk memastikan gap dan kondisi rol tetap ideal selama proses *rolling*. Untuk menghindari retakan dan ketebalan yang tidak seragam, sangat penting untuk mengontrol secara hati-hati laju *rolling* dan tekanan. Retakan dan cacat permukaan dapat dihindari dengan menggunakan bahan mentah berkualitas tinggi yang tidak memiliki inklusi atau cacat internal serta menjaga rol bebas dari partikel asing.

2.5 Komposit

Komposit adalah jenis bahan yang dibuat melalui rekayasa yang terdiri dari dua atau lebih bahan yang memiliki sifat yang berbeda satu sama lain baik dari segi kimia maupun fisika dan tetap terpisah dalam bahan komposit akhir.

Karena sifat-sifat yang berbeda dari masing-masing bahan penyusunnya, komposit antar material harus berikatan dengan kuat, yang berarti bahwa *wetting agent* harus ditambahkan. [8]

Komposit terdiri dari dua komponen yaitu zat utama dan zat pendukung. Pada zat utama bertindak sebagai pengikat, sedangkan bahan pendukung berfungsi sebagai penguat. Pada penguat dapat terdiri dari partikel, serat, fragmen, atau konfigurasi geometris lainnya. Penguat adalah elemen penting dalam bahan komposit yang membantu mempertahankan beban yang diterima. Kekuatan bahan komposit sebagian besar tergantung pada jenis penguat yang digunakan. Biasanya, bahan penguat memiliki kekakuan dan daya tahan. Pengukuran yang biasa digunakan termasuk jenis partikel, serat alami, karbon, seratan kaca, dan keramik. [9]



Gambar 2.5 Jenis penguat dalam komposit [9]

Jenis-jenis pada penguat material komposit terdiri dari 4 jenis yaitu:

a. Komposit Partikel (*Particles Composite*)

Partikel dalam komposit adalah butiran kecil dari material seperti logam atau keramik yang ditempatkan dalam matriks untuk meningkatkan sifat thermal dan sifat mekanik. Penguat partikel memberikan penguatan dengan menghambat gerakan dan pembelokan retakan, yang secara keseluruhan meningkatkan kekuatan, kekakuan, dan ketahanan terhadap abrasi atau korosi pada komposit.

b. Komposit Serat (*Fibers Composite*)

Komposit serat adalah penguat dengan bentuk serat-serat kecil memiliki panjang yang relatif pendek, namun memberikan penguatan dengan meningkatkan transfer beban antara matriks dan bahan penguat. Jenis penguat serat lebih mudah dalam proses manufaktur namun mungkin tidak memberikan kekuatan sekuat serat kontinu.

c. Komposit Kontinyu (*Continues Fibers Composite*)

Serat kontinyu adalah serat panjang yang memberikan penguatan yang lebih baik karena mentransfer beban dengan efektif dan menghindari terjadinya retakan. Jenis penguat kontinyu sering digunakan dalam aplikasi yang membutuhkan kekuatan struktural tinggi dan kekakuan yang baik.

d. Komposit Laminasi (*Sheet Laminated Composite*)

Laminat lembaran merupakan bentuk penguat dalam komposit yang terdiri dari lembaran material seperti logam atau komposit serat, yang memberikan penguatan dalam beberapa arah dan meningkatkan kekuatan, kekakuan, dan ketahanan terhadap tekanan atau beban searah.

Karena keunggulannya, seperti kekuatan tinggi, berat yang ringan, dan ketahanan terhadap korosi, material komposit telah menjadi bagian penting dari berbagai industri. Pada bidang dirgantara, pesawat modern seperti Boeing 787 Dreamliner dan Airbus A350 menggunakan komposit serat karbon dalam struktur utama badan pesawat dan sayap, yang membuat pesawat lebih ringan dan efisien bahan bakar.

Komposit digunakan dalam industri kendaraan untuk meningkatkan performa, efisiensi bahan bakar, dan berat kendaraan. Misalnya, komponen interior dan panel bodi mobil sering dibuat dari komposit untuk mencapai tujuan ini. Selain itu, industri energi, terutama energi terbarukan, menggunakan komposit untuk membuat bilah turbin angin dan komponen lainnya karena kekuatan tinggi dan daya tahannya terhadap lingkungan yang keras. Lambung kapal dan komponen maritim lainnya juga dibuat dari komposit untuk mengurangi berat dan meningkatkan ketahanan terhadap air asin.

2.6 Aluminium Al 6061

Aluminum Al 6061 umumnya digunakan dalam berbagai bidang teknik, terutama dalam transportasi dan konstruksi, karena kualitas mekanisnya yang luar biasa seperti kekuatan tegangan dan kekerasan. Komposisi kimia dasar pada Al 6061 dapat dilihat pada Tabel 2.1. Ketahanan yang luar biasa terhadap korosi menjadikannya bahan yang menjadi pilihan utama untuk aplikasi

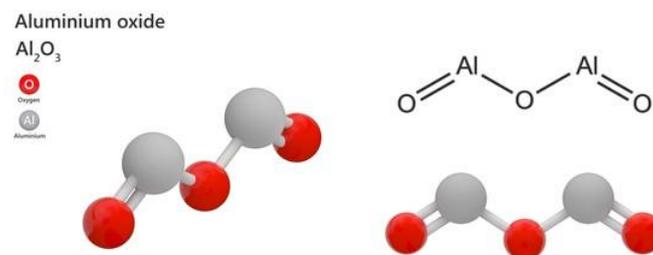
struktural laut. Permintaan untuk bahan yang lebih ringan, hemat biaya, dan kinerja tinggi dalam berbagai aplikasi struktural dan non-struktural telah menyebabkan pembuatan berbagai jenis komposit matriks logam dengan material Al6061. [10]

Tabel 2.1 Komposisi Aluminium Al 6061

Elemen	Mg	Fe	Si	Cu	Mn	V	Ti	Al
Berat %	1.08	0.17	0.63	0.32	0.52	0.01	0.02	Yang tersisa

2.7 Alumina (Al_2O_3)

Aluminium Oxide atau biasa disebut Alumina dengan rumus kimia (Al_2O_3) adalah keramik rekayasa yang paling serbaguna karena batas suhu tinggi dan sifat kimia, listrik dan mekanisnya. Material juga memiliki biaya yang rendah, mudah terbentuk dan selesai menggunakan beberapa teknik produksi. Hal ini sering dikombinasikan dengan silika atau unsur-unsur untuk meningkatkan sifat atau manufaktur dan biasanya akan berkisar dari 92% hingga 99,9% Al_2O_3 . Komponen-komponen keramik yang dirancang aluminium dapat dibuat menggunakan pressing uniaxial. [11]

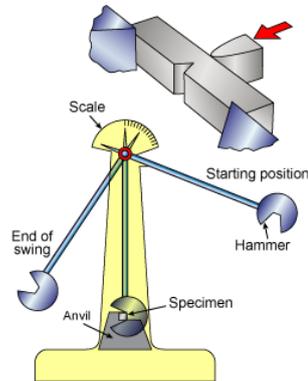


Gambar 2.6 Struktur kimia aluminium oxide

2.8 Uji Impak

Pengujian impak adalah metode yang digunakan untuk mengukur ketangguhan sebuah spesimen ketika diberikan beban mendadak melalui proses benturan. Ketangguhan merujuk pada besarnya energi yang dibutuhkan untuk mematahkan atau merusak suatu material, yang dinilai dari luas area di bawah kurva tegangan-regangan. Meskipun sebuah material mungkin memiliki

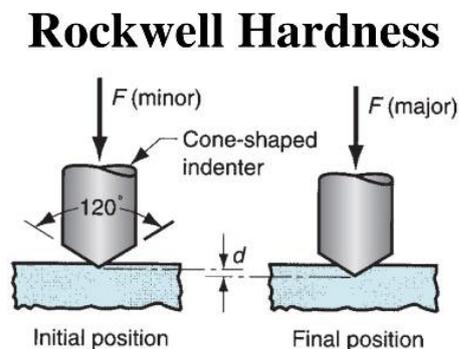
kekuatan tarik yang tinggi, hal ini tidak selalu berarti material tersebut cocok untuk kondisi beban kejut. Sebuah paduan memiliki parameter ketangguhan terhadap patahan yang ditentukan oleh kombinasi antara tegangan kritis dan panjang retak. [12]



Gambar 2.7 Metode Uji Impak [10]

2.9 Uji Kekerasan

Uji kekerasan adalah alat yang menguntungkan untuk menjamin suatu karakterisasi sebuah material. Pengujian kekerasan Rockwell sering digunakan karena kesederhanaannya dan eksekusi yang cepat. [13]. Pengujian kekerasan dengan metode rockwell bertujuan untuk menentukan kekerasan suatu material yang diuji coba menggunakan spesimen uji coba. Prinsip pada uji kekerasan metode rockwell adalah dengan menekan bagian penetrator intan dengan bentuk kerucut ke permukaan spesimen dengan diberikan pembebanan dan kedalaman indentasi akan menghasilkan nilai kekerasan dari beban mayor dan minor. [14]

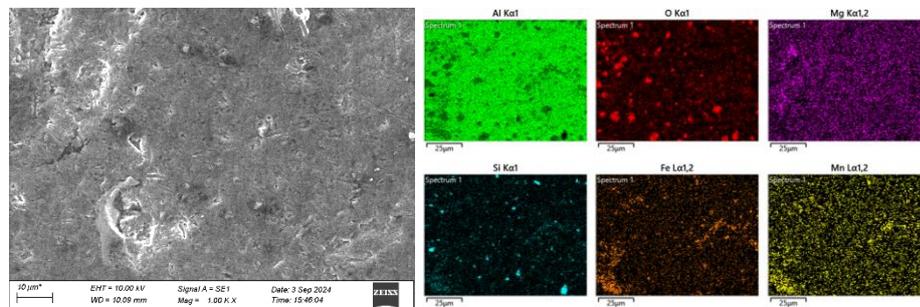


Gambar 2.8 Uji kekerasan rockwell [11]

2.10 Uji Struktur Mikro

Pengujian struktur mikro adalah pengujian yang dilakukan untuk mengamati struktur mikroskopis logam, paduan komposit, kepadatan struktur, identifikasi distribusi fasa, ukuran butir, dan adanya cacat atau ketidaksempurnaan dalam material. Mikrostruktur material khususnya sifat mekanik logam memainkan peran penting dalam menentukan kinerja dan kualitas material tersebut. Dengan menganalisis mikrostruktur, kita dapat memperoleh pemahaman yang lebih baik tentang kinerja dan keandalan pada suatu material. Pada spesifikasi suatu material ditentukan pada hasil metalografi yang sudah dialami oleh material yang diuji. [15]

Pada pengujian struktur mikro, *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDS) adalah dua teknik yang sering digunakan karena kemampuannya dalam memberikan gambaran yang detail mengenai struktur mikro dan komposisi kimia material. Hasil dari uji SEM dan EDS memberikan informasi penting yang dapat digunakan untuk mengkorelasikan struktur mikro dengan sifat mekanik seperti kekerasan dan ketangguhan, serta membantu dalam mengoptimalkan proses manufaktur untuk menghasilkan material komposit dengan kinerja yang lebih baik.



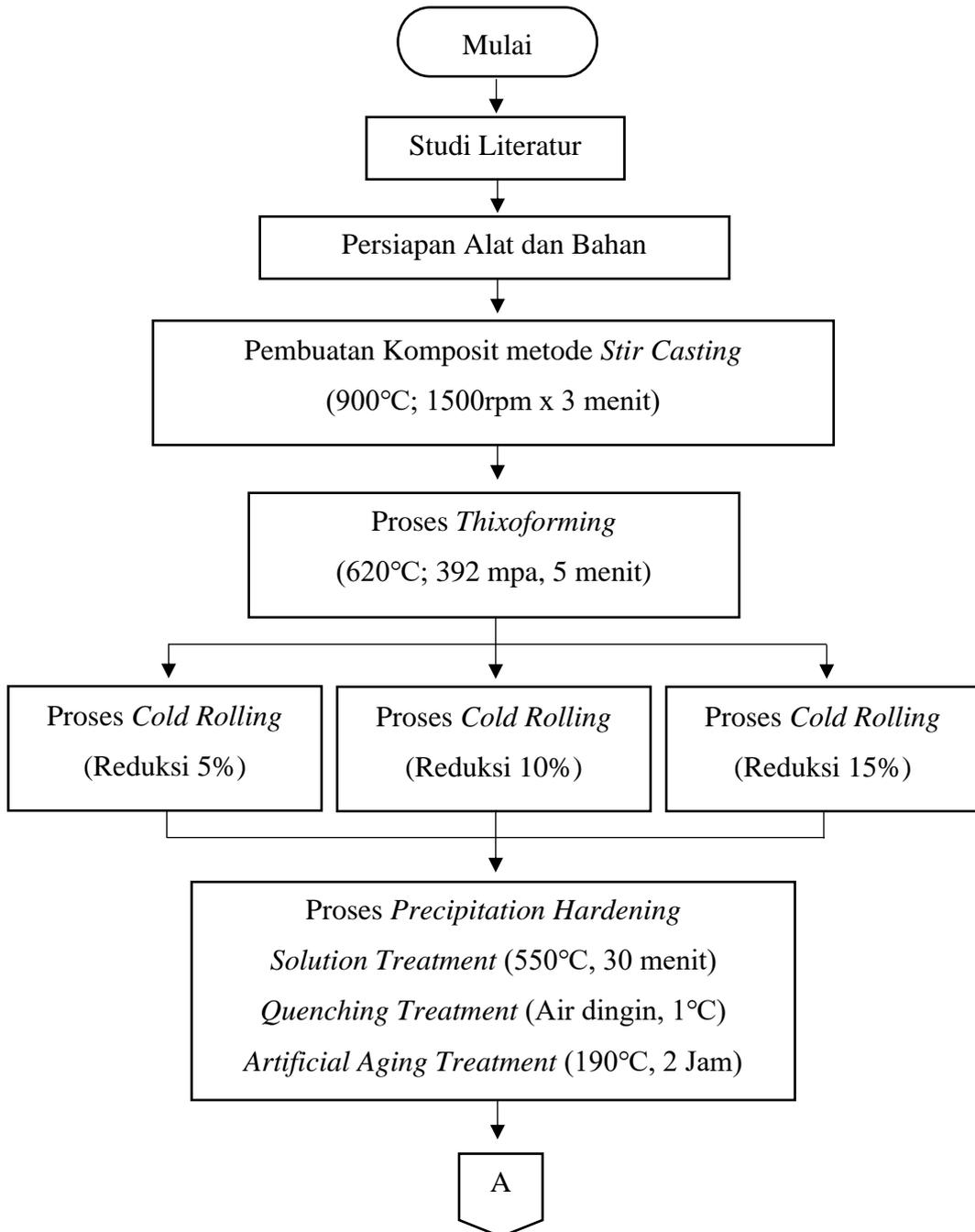
Gambar 2.9 Hasil SEM dan EDS

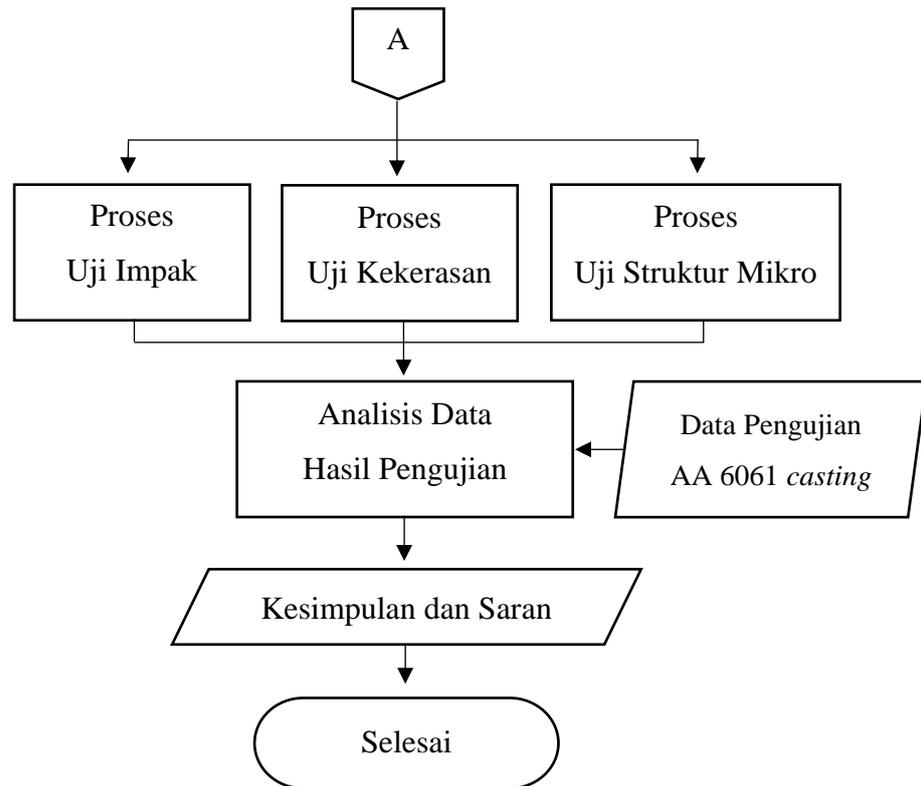
BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Adapun diagram alir penelitian yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang akan digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

3.2.1 Alat

Berikut adalah alat yang digunakan

1. Peralatan K3 (Sarung tangan, *wearpack*, dan Kacamata)

Alat ini digunakan untuk melindungi tubuh, tangan, dan mata dari ancaman keselamatan seperti panas pada tungku, percikan gerinda, dan partikel yang dapat menyebabkan cedera selama penelitian.



Gambar 3.2 Peralatan Keselamatan

2. Alat Pemadam Api Ringan (APAR)

APAR adalah alat pemadam kebakaran yang digunakan untuk memadamkan api kecil. Ini membantu mengantisipasi kebakaran yang mungkin terjadi pada peralatan yang menghasilkan panas tinggi, seperti pada proses *stir casting* dan *thixoforming*.



Gambar 3.3 Alat Pemadam Api Ringan

3. *Dies* (cetakan)

Cetakan yang digunakan untuk membentuk material komposit menjadi bentuk tertentu dalam penelitian ini, komposit aluminium setelah proses *stir casting* dan *thixoforming* dicetak dengan *dies*.



Gambar 3.4 Cetakan Spesimen

4. Timbangan Digital

Digunakan untuk mengukur massa digunakan untuk memastikan komposisi material yang tepat selama proses pembuatan komposit AA 6061 berpenguat Alumina (Al_2O_3) dengan akurasi 0,00.



Gambar 3.5 Timbangan Digital

5. Tungku *Stir Casting*

Tungku ini digunakan untuk mencampur dan mencairkan berbagai jenis logam, termasuk komposit aluminium dan alumina, sehingga campuran menjadi tercampur sebelum dicetak.



Gambar 3.6 Tungku *Stir Casting*

6. Alat Penunjang *Stir Casting*

Merupakan peralatan tambahan yang digunakan untuk mendukung proses *stir casting*, seperti mata bor pengaduk, pengangkat *crucible*, dan tang besi yang juga digunakan pada proses *thixoforming*.



Gambar 3.7 Alat Penunjang *Stir Casting*

7. *Crucible*

Crucible adalah wadah tahan panas yang digunakan untuk melelehkan logam, seperti aluminium, dalam tungku. *Crucible* terbuat dari material besi yang tahan suhu 900°C tanpa mengalami deformasi atau kerusakan.



Gambar 3.8 *Crucible*

8. Kepala *Torch*

Kepala *torch* adalah alat yang digunakan untuk menghasilkan api atau panas, alat ini digunakan untuk memanaskan cetakan sebelum komposit cair dituang ke cetakan.



Gambar 3.9 Kepala *Torch*

9. Mesin Bor

Mesin bor berfungsi sebagai pengaduk selama proses *stir casting*. Digunakan untuk mencampur komposit secara merata selama proses pembuatan komposit.



Gambar 3.10 Mesin Bor Pengaduk

10. Jangka Sorong

Jangka sorong adalah alat ukur presisi yang digunakan untuk mengukur dimensi fisik seperti ketebalan, lebar, dan panjang dengan tepat.



Gambar 3.11 Jangka Sorong

11. Gerinda

Gerinda adalah alat yang digunakan untuk menghaluskan atau memotong komposit dengan menggunakan roda abrasif berputar.



Gambar 3.12 Mesin Gerinda

12. Muffle Furnace

Muffle Furnace adalah alat yang digunakan untuk memanaskan spesimen komposit pada proses *thixoforming* dan *precipitation hardening*.



Gambar 3.13 *Muffle Furnace*

13. Mesin Press

Setelah material dipanaskan ke kondisi *semi-solid*, mesin press digunakan untuk proses *thixoforming*. Mesin ini memberikan tekanan pada material untuk membentuk sesuai dengan cetakan, memanfaatkan keadaan *semi-solid* untuk menghasilkan komponen dengan struktur dan sifat mekanik yang lebih baik.



Gambar 3.14 Mesin Press

14. Thermogun

Alat ini digunakan untuk mengukur suhu permukaan material secara non-kontak dengan menggunakan sensor inframerah. Alat ini sangat penting untuk mengawasi suhu selama proses *stir casting* dan *thixoforming*.



Gambar 3.15 Thermogun

15. Mesin Rolling

Mesin *rolling* digunakan untuk mereduksi ketebalan spesimen yang bertujuan untuk mencapai ketebalan yang diinginkan dan memperbaiki struktur mikro material sehingga dapat meningkatkan sifat mekanik komposit tersebut.



Gambar 3.16 Mesin *Rolling*

16. Wadah Air

Wadah air digunakan untuk *quenching*, yaitu proses pendinginan cepat material setelah pemanasan pada proses *quenching*.



Gambar 3.17 Wadah Air

17. Mesin *Grinding Polishing*

Mesin ini digunakan untuk menghaluskan dan memoles permukaan material sehingga siap untuk diperiksa di bawah mikroskop untuk analisis struktur mikro.



Gambar 3.18 Mesin Grinding dan Polishing

18. Alat Uji Kekerasan Rockwell

Metode Rockwell digunakan untuk mengukur kekerasan material. Pengujian ini melibatkan menekan indenter ke permukaan material sehingga dapat mengukur kekerasan suatu material.



Gambar 3.19 Alat Uji Kekerasan Rockwell

19. Alat Uji Impak

Alat Uji Impak digunakan untuk mengukur kekuatan atau ketangguhan material terhadap kuat benturan.



Gambar 3.20 Alat Uji Impak

20. Alat Uji Struktur Mikro

Alat uji struktur mikro yang digunakan adalah *Scanning Electron Microscopy*, dengan ini detail struktur mikro dalam material dapat divisualisasikan dan dianalisis dengan resolusi tinggi.



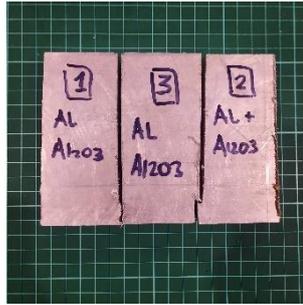
Gambar 3.21 Alat Uji Struktur Mikro

3.2.2 Bahan

Berikut adalah alat yang digunakan

1. Aluminium Al 6061

Aluminium Al 6061 adalah bahan utama yang digunakan. Paduan aluminium digunakan karena kombinasi sifat mekanik yang baik, ketahanan korosi, dan memiliki massa yang ringan.



Gambar 3.22 Aluminium Al 6061

2. Bubuk Alumina (Al₂O₃)

Alumina adalah bahan yang digunakan sebagai penguat dalam komposit aluminium untuk meningkatkan sifat mekanik



Gambar 3.23 Alumina

3. *Liquefied Petroleum Gas*

Gas ini digunakan sebagai sumber bahan bakar dalam proses *stir casting* untuk mencairkan aluminium dan menjaga suhu yang dibutuhkan selama proses pencampuran.



Gambar 3.24 Gas LPG

4. Air

Air digunakan dalam proses *quenching* untuk mendinginkan material dengan cepat setelah pemanasan, yang membantu mengontrol struktur mikro dan sifat mekanik material.



Gambar 3.25 Air

5. Es Batu

Digunakan untuk mendinginkan air yang dipakai dalam proses quenching, membantu mencapai suhu yang lebih rendah untuk pendinginan yang lebih cepat dan efektif.



Gambar 3.26 Es Batu

6. Amplas

Amplas digunakan untuk menghaluskan permukaan material sebelum pemolesan dan analisis digunakan untuk mempersiapkan sampel uji struktur mikro.



Gambar 3.27 Amplas

7. Bludru

Kain bludru digunakan dalam proses pemolesan akhir pada persiapan uji struktur mikro untuk mencapai permukaan yang sangat halus pada sampel.



Gambar 3.28 Bludru

8. Pasta Alumina

Pasta ini digunakan selama proses pemolesan sampel uji struktur mikro untuk menghilangkan goresan halus dan mencapai permukaan yang sangat halus dan siap untuk dianalisis dengan mikroskop.



Gambar 3.29 Pasta Alumina

3.3 Prosedur Penelitian

Adapun prosedur yang dilakukan selama penelitian berlangsung adalah sebagai berikut.

3.3.1 Proses *Stir Casting*

Proses *stir casting* dilakukan untuk menyatukan dua material untuk membentuk suatu material komposit. Material komposit yang digunakan adalah Aluminium Al 6061 sebanyak 95% dan penguat Alumina (Al_2O_3) sebanyak 5%. Berikut adalah tahapan proses *stir casting* yang dilakukan selama penelitian berlangsung.

1. Tahapan pertama dalam proses *stir casting* adalah memotong aluminium menjadi potongan-potongan yang sesuai agar dapat dengan mudah dimasukkan ke dalam *crucible*. Pemotongan ini dilakukan dengan menyesuaikan ukuran *crucible* yang digunakan, proses pemotongan dilakukan dengan menggunakan gerinda duduk dan peralatan keselamatan seperti sarung tangan dan kacamata *safety*



Gambar 3.30 Pemotongan Aluminium

- Setelah aluminium dipotong, langkah selanjutnya adalah menimbang bahan-bahan utama, yaitu Aluminium Al 6061 dan bubuk Alumina (Al_2O_3). Dalam komposisi yang digunakan, aluminium memiliki persentase 95%, sementara alumina sebanyak 5%. Penimbangan dilakukan dengan menggunakan timbangan digital yang memiliki akurasi tinggi untuk memastikan rasio yang tepat antara aluminium dan alumina. Komposisi yang tepat sangat penting karena hal ini akan mempengaruhi sifat mekanik dan karakteristik komposit yang dihasilkan.



Gambar 3.31 Penimbangan Komposisi Komposit

- Peralatan yang diperlukan untuk proses *stir casting*, termasuk tungku, *crucible*, alat pengaduk, mesin bor yang dimodifikasi, cetakan, dan peralatan keselamatan kerja (K3). Proses persiapan ini dilakukan untuk memastikan bahwa semua alat bekerja dengan benar dan tidak mengalami masalah selama proses.
- Setelah potongan-potongan aluminium dipersiapkan dan peralatan sudah siap, aluminium dimasukkan ke dalam *crucible*. *Crucible* ini akan berfungsi sebagai wadah untuk melelehkan aluminium pada suhu tinggi. Aluminium akan dipanaskan dalam *crucible* hingga mencapai titik leleh, memungkinkan material untuk berubah dari bentuk padat menjadi cair.
- Crucible* yang berisi aluminium kemudian dimasukkan ke dalam tungku yang sudah dipanaskan hingga suhu yang diperlukan untuk melelehkan aluminium. Proses pemanasan hingga suhu $900^{\circ}C$ dilakukan menggunakan gas LPG sebagai bahan bakar.



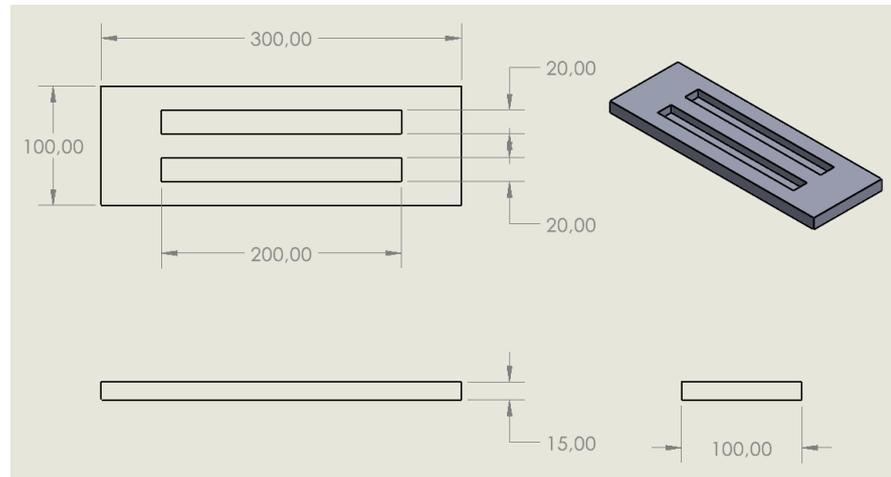
Gambar 3.32 Proses pemanasan

6. Setelah aluminium mencapai kondisi cair, kerak atau lapisan oksida yang terbentuk pada permukaan logam cair harus dibuang. Kerak ini merupakan hasil dari reaksi antara aluminium cair dengan oksigen di udara. Kerak yang tidak dibuang dapat mengakibatkan cacat pada produk akhir, sehingga pembersihan kerak dilakukan secara hati-hati menggunakan alat khusus untuk memastikan aluminium cair dalam kondisi bersih.
7. Setelah proses pembuangan kerak selesai, bubuk alumina ditambahkan secara perlahan ke dalam aluminium cair. Penambahan alumina harus dilakukan dengan hati-hati agar partikel alumina terdistribusi merata dalam aluminium cair.
8. Campuran aluminium cair dan alumina diaduk menggunakan mesin bor yang telah dimodifikasi, dengan kecepatan putaran sekitar 1500 RPM selama 3 menit. Proses pengadukan ini bertujuan untuk memastikan partikel alumina tersebar merata di dalam matriks aluminium cair, menciptakan campuran homogen.



Gambar 3.33 Proses pengadukan komposit

9. Sebelum menuangkan campuran komposit ke dalam cetakan, cetakan terlebih dahulu dibersihkan untuk menghilangkan kotoran atau sisa-sisa material yang mungkin masih menempel dari proses sebelumnya. Adapun dimensi cetakan adalah sebagai berikut.



Gambar 3.34 Dimensi Cetakan pada Software *Solidworks*

Setelah dibersihkan, cetakan dipanaskan menggunakan *torch* gas portabel untuk memastikan bahwa tidak ada kelembaban yang tersisa, yang dapat menyebabkan cacat pada komposit ketika logam cair dituangkan.



Gambar 3.35 Proses pembersihan dan pemanasan cetakan

10. Setelah proses pengadukan selesai dan cetakan sudah siap, campuran komposit yang masih dalam keadaan cair dituangkan dengan hati-hati ke dalam cetakan.



Gambar 3.36 Proses penuangan cetakan

11. Setelah komposit mendingin dan mengeras di dalam cetakan, langkah terakhir adalah mengeluarkan komposit tersebut dari cetakan. Proses ini dilakukan dengan hati-hati untuk mencegah kerusakan pada komponen yang sudah terbentuk.



Gambar 3.37 Hasil proses *stir casting*

3.3.2 Proses *Thixoforming*

Proses *thixoforming* adalah proses untuk menghasilkan material komposit yang memiliki sifat mekanik yang unggul. Berikut adalah tahapan proses *thixoforming* yang dilakukan selama penelitian berlangsung.

1. Tahapan pertama dalam proses *thixoforming* adalah mempersiapkan sampel komposit yang telah melewati tahap *stir casting*. Sampel yang meyatu ini dipotong menjadi dua bagian agar tidak menyatu kembali.
2. Setelah dipotong, sampel komposit dimasukkan ke dalam cetakan yang sudah dipersiapkan.
3. Setelah sampel komposit ditempatkan di dalam cetakan, cetakan tersebut kemudian dimasukkan ke dalam *muffle furnace*. *Furnace*

digunakan untuk memanaskan sampel secara merata hingga mencapai suhu yang diperlukan untuk transformasi ke kondisi *semi-solid*.

4. Pada tahap ini, suhu dalam *muffle furnace* diatur pada 620°C , yang merupakan suhu optimal untuk membawa komposit ke kondisi *semi-solid*. Pada suhu ini, material komposit berada dalam fasa antara padat dan cair, yang dikenal sebagai kondisi *semi-solid*. Pemanasan dilakukan selama 40 menit untuk memastikan bahwa seluruh volume material komposit mencapai kondisi *semi-solid* yang diinginkan.



Gambar 3.38 Suhu pada *furnace* (*thixoforming*)

5. Setelah pemanasan di *muffle furnace* selesai, langkah selanjutnya adalah memindahkan cetakan yang berisi komposit ke mesin press. Pemandahan ini harus dilakukan dengan cepat dan hati-hati untuk menjaga suhu *semi-solid* material selama proses pembentukan. Untuk itu, digunakan tang besi dan sarung tangan anti panas untuk menangani cetakan panas, memastikan operator tetap aman dan material komposit tidak kehilangan terlalu banyak panas selama perpindahan.



Gambar 3.39 Proses pemindahan cetakan

6. Selama dan setelah perpindahan ke mesin press, suhu komposit di dalam cetakan dipantau menggunakan *thermogun*. *Thermogun* digunakan untuk memastikan bahwa material komposit tetap dalam rentang suhu *semi-solid* yang diperlukan. Pemantauan suhu ini penting karena jika suhu komposit terlalu rendah, material akan menjadi terlalu kaku untuk dibentuk, sedangkan jika terlalu tinggi, material bisa menjadi terlalu cair dan kehilangan bentuk yang diinginkan.



Gambar 3.40 Pemantauan suhu cetakan

7. Dengan komposit yang berada dalam kondisi *semi-solid* dan suhu yang dipantau dengan baik, proses *pressing* dilakukan menggunakan mesin press dengan kapasitas tekanan sebesar 392 mpa. *Pressing* ini diterapkan untuk membentuk komposit sesuai dengan bentuk cetakan. Dalam kondisi *semi-solid*, material memiliki sifat yang memungkinkan untuk dibentuk tanpa mengalami retakan atau deformasi yang signifikan. Setelah proses *pressing* selesai, tekanan pada cetakan dipertahankan selama sekitar 5 menit.



Gambar 3.41 Proses *pressing*

8. Setelah tekanan dilepaskan, cetakan bersama dengan material komposit yang terbentuk dibiarkan mendingin pada suhu ruangan. Pendinginan ini dilakukan secara alami tanpa pendinginan paksa, untuk menghindari pembentukan tegangan internal atau retakan dalam material komposit.



Gambar 3.42 Hasil proses *thixoforming*

9. Setelah material komposit sepenuhnya, langkah terakhir adalah mengeluarkan sampel dari cetakan dan menganalisa faktor keberhasilan pada proses *thixoforming*. Sampel dikatakan berhasil jika bagian atas sampel meluber dan ketebalan tereduksi.



Gambar 3.43 Hasil sampel *thixoforming*

3.3.3 Proses *Rolling*

Rolling adalah proses deformasi plastik di mana material dilewatkan melalui rol untuk secara bertahap mengurangi ketebalannya hingga mencapai dimensi yang diinginkan. *Rolling* memiliki keuntungan yaitu peningkatan kekuatan material melalui perbaikan struktur butiran, proses pengerolan dilakukan di Badan Riset Badan Riset dan Inovasi Nasional.

Berikut adalah tahapan proses *rolling* yang dilakukan selama penelitian berlangsung.

1. Setelah sampel melewati proses *stir casting* dan *thixoforming*, langkah pertama dalam proses *rolling* adalah melakukan preparasi kembali pada permukaan sampel. Preparasi ini dilakukan dengan menggunakan gerinda untuk mengamplas permukaan sampel, sehingga ketebalannya dapat dikurangi hingga kurang dari 11 mm. Langkah ini sangat penting karena mesin *rolling* yang digunakan memiliki kapasitas maksimal untuk sampel dengan ketebalan 11 mm. Dengan memastikan ketebalan sampel berada di bawah batas ini, kita dapat menghindari potensi kerusakan pada mesin *rolling* dan memastikan proses berjalan lancar.



Gambar 3.44 Mesin *Rolling*

2. Setelah preparasi permukaan selesai, langkah berikutnya adalah menentukan ketebalan akhir yang diinginkan untuk sampel. Pada penelitian ini digunakan variabel persen reduksi sebesar 5%, 10%, dan 15%. Variabel ini ditentukan dikarenakan pada proses *trial and error* menggunakan spesimen *dummy* terdapat crack pada persen reduksi 19% sehingga sampel tidak dapat digunakan.
3. Setelah ketebalan yang diinginkan ditentukan, sampel kemudian dimasukkan ke dalam mesin *rolling*. Proses *rolling* ini dilakukan secara bertahap, di mana sampel secara berulang kali dilewatkan melalui rol untuk mengurangi ketebalan secara perlahan.



Gambar 3.45 Proses pengerolan

4. Setelah proses *rolling* selesai dan sampel telah mencapai ketebalan yang diinginkan, langkah terakhir adalah mengukur ketebalan akhir menggunakan jangka sorong. Pengukuran ini dilakukan dengan presisi untuk mengetahui seberapa besar reduksi ketebalan yang telah dicapai selama proses *rolling*.

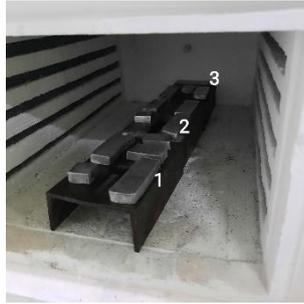


Gambar 3.46 Pengukuran ketebalan sampel sebelum dan sesudah

3.3.4 Proses *Precipitation Hardening*

Tujuan utama *precipitation hardening* adalah untuk meningkatkan sifat mekanik material, seperti kekerasan, kekuatan, dan ketangguhan, melalui proses pemanasan dan pendinginan yang terkendali. Dengan perlakuan ini, struktur mikro material dapat diubah untuk memenuhi spesifikasi yang diinginkan. Berikut adalah tahapan proses *precipitation hardening* yang dilakukan selama penelitian berlangsung.

1. Sampel dimasukkan ke dalam *furnace* dan temperatur diatur hingga mencapai 550°C, yang merupakan suhu optimal untuk proses ini.



Gambar 3.47 Proses *Solutioning*

2. Sampel dipanaskan pada suhu 550°C selama 40 menit untuk memastikan transformasi struktur mikro yang diinginkan.



Gambar 3.48 Suhu pada *furnace* (*Solutioning*)

3. Setelah 40 menit, sampel cepat didinginkan (*quenching*) dalam air es bersuhu 1°C untuk menghentikan proses pemanasan dan mengunci sifat-sifat mekanik yang telah dicapai.



Gambar 3.49 Suhu air untuk proses *quenching*

3.3.5 Proses *Artificial Aging*

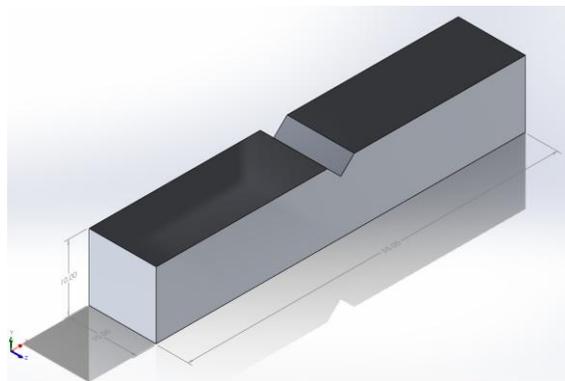
Proses *artificial aging* adalah perlakuan panas yang bertujuan untuk memperkuat material melalui proses penuaan buatan. Berikut adalah tahapan proses *artificial aging* yang dilakukan selama penelitian berlangsung.

1. Sampel dimasukkan ke dalam *furnace* untuk dipanaskan secara merata. Suhu *furnace* diatur hingga mencapai 190°C.
2. Seluruh sampel dipanaskan pada suhu 190°C selama 2 jam untuk memastikan pengendapan partikel yang stabil, yang memperkuat material.
3. Setelah 2 jam, sampel dikeluarkan dari *furnace* dan didinginkan pada suhu ruangan.

3.3.6 Proses Uji Impak

Uji impact dengan metode Charpy bertujuan untuk mengukur ketangguhan material, yaitu kemampuan material untuk menyerap energi dan menahan beban kejut sebelum mengalami patah. Pengujian ini dilakukan di Laboratorium Metalurgi Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Berikut adalah tahapan proses uji impact yang dilakukan selama penelitian berlangsung.

1. Langkah pertama adalah mempersiapkan sampel dengan membentuknya menggunakan mesin frais menjadi spesimen sesuai dengan standar ASTM E23.



Gambar 3.50 Spesimen ASTM E23

2. Spesimen diletakkan pada alat uji impact dengan posisi takik berbentuk *v-groove* menghadap berlawanan arah dengan arah pembebanan.



Gambar 3.51 Peletakan spesimen pada Uji impak

3. Pembebanan diatur pada nilai 300 Joule, yang merupakan jumlah energi yang akan diterapkan pada spesimen.
4. Bandul pada alat uji impak dilepaskan untuk memberikan energi ke spesimen. Setelah bandul melepaskan energi, pengereman dilakukan untuk menghentikan gerakan bandul.
5. Energi yang diserap oleh spesimen, yang merupakan selisih antara energi yang diberikan dan energi yang tersisa setelah impak, dibaca dari indikator alat uji.
6. Setelah membaca energi yang diserap, nilai impak dihitung menggunakan rumus berikut ini :

$$\text{Luas Penampang} = P \text{ (mm)} \times L \text{ (mm)} \dots\dots\dots(3.1)$$

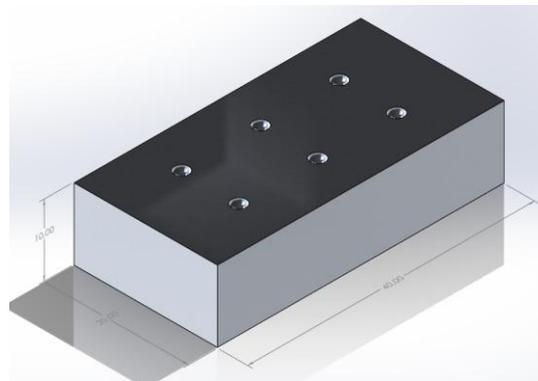
$$\text{Nilai Impak} = \frac{\text{Energi Diserap (Joule)}}{\text{Luas Penampang (mm}^2\text{)}} \dots\dots\dots(3.2)$$

3.3.7 Proses Uji Kekerasan

Uji kekerasan adalah untuk mengukur sejauh mana material dapat menahan deformasi permukaan saat diberi beban. Proses pengujian pada penelitian ini adalah menggunakan metode Rockwell, pengujian ini mengukur kekerasan material dengan menilai kedalaman penetrasi indenter berbentuk bola pada permukaan material dengan beban 100 kgf. Pengujian ini dilakukan di Laboratorium Metalurgi Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Berikut adalah tahapan proses uji kekerasan yang dilakukan selama penelitian berlangsung.

1. Langkah pertama adalah menyiapkan sampel uji yang sudah dipotong dengan dimensi 20 mm x 40 mm dan permukaan rata

2. Indentor disesuaikan dengan standar ASTM E18 untuk memastikan bahwa hasil uji sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan.
3. Sampel ditempatkan pada area pengujian di alat uji kekerasan.
4. Kalibrasi dilakukan dengan memberikan penetrasi pada sampel sampai indikator warna pada tombol start menyala.
5. Setelah kalibrasi, tombol start ditekan. Indentor memberikan penetrasi pada sampel dan proses uji dilakukan. Hasil kekerasan, yang terukur oleh alat, muncul di layar alat uji kekerasan setelah indentor berhenti memberikan penetrasi.

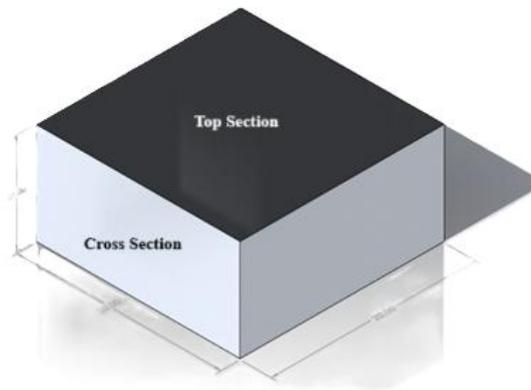


Gambar 3.52 Spesimen Uji Kekerasan

3.3.8 Proses Uji Struktur Mikro

Setelah seluruh proses pembuatan komposit Aluminium Al 6061 dengan penguat Alumina (Al_2O_3) selesai, langkah berikutnya adalah melakukan pengamatan pada *top section* untuk mengevaluasi distribusi penguat dalam matriks Al6061. Pengamatan ini dilakukan menggunakan alat *Scanning Electron Microscopy* (SEM) yang tersedia di Laboratorium Terpadu Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Berikut adalah tahapan proses uji struktur mikro yang dilakukan selama penelitian berlangsung.

1. Permukaan sampel yang akan diamati dipersiapkan dengan mengamplas dan menghaluskan dengan kain bludru menggunakan pasta alumina untuk memastikan permukaan yang rata dan bersih.
2. Sampel yang telah dipersiapkan ditempatkan pada *holder* atau dudukan khusus dari alat SEM.



Gambar 3.53 Spesimen Uji Struktur Mikro

3. *Holder* yang berisi sampel kemudian ditempatkan di ruang uji dalam alat SEM.
4. Ruang uji di dalam SEM dikondisikan menjadi kedap udara dengan menciptakan vakum. Kondisi vakum ini diperlukan untuk menghindari gangguan dari molekul udara yang dapat mempengaruhi kualitas gambar.
5. Setelah vakum tercapai, proses pemindaian dimulai dengan melakukan perbesaran pada area permukaan yang akan diamati.
6. Hasil SEM dan EDX didapatkan dengan format gambar.
7. Gambar yang didapatkan diproses menggunakan *Software ImageJ* untuk mengetahui ukuran butir alumina.
8. Ukuran butir alumina didapatkan dan standar deviasi ukuran butir diukur dengan menggunakan rumus berikut.

$$\sigma = \sqrt{\left[\frac{\sum (X_i - \mu)^2}{(N-1)} \right]} \dots\dots\dots(4.1)$$

3.3.9 Proses Pengelolaan Data

Setelah menyelesaikan semua proses pengujian pada keseluruhan sampel, langkah selanjutnya adalah mengumpulkan data dari semua hasil pengujian tersebut. Data ini kemudian dianalisis, dijelaskan, dan dikaitkan dengan data hasil pengujian lainnya. Akhirnya, kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan disusun berdasarkan analisis data tersebut.

3.4 Variabel Penelitian

Variabel penelitian terdapat variabel terikat, bebas, dan terkontrol. Berikut adalah variabel penelitian yang dilakukan.

1. Variabel Terikat
 - a. Hasil uji kekerasan Rockwell pada komposit Aluminium Al 6061 berpenguat Alumina (Al_2O_3)
 - b. Nilai impak yang diukur menggunakan metode Charpy untuk menilai ketangguhan komposit.
 - c. Persebaran dan interaksi penguat Alumina dalam matriks Aluminium Al 6061 yang dianalisis menggunakan SEM.
 - d. Ketebalan akhir komposit Aluminium Al 6061 berpenguat Alumina setelah proses *cold rolling*.
2. Variabel Bebas
 - a. Variasi dalam persen reduksi material selama proses *rolling*.
 - b. Suhu dan waktu *precipitation hardening*.
 - c. Suhu dan waktu *artificial aging*.
3. Variabel Terkontrol
 - a. Jenis material yang digunakan Aluminium Al 6061 dan bubuk Alumina (Al_2O_3) digunakan sebagai bahan baku.
 - b. Metode uji yang digunakan, Metode pengujian seperti uji kekerasan Rockwell, uji impak Charpy, dan SEM untuk analisis struktur mikro.
 - c. Kondisi Lingkungan Suhu ruangan, tekanan udara, dan kondisi laboratorium saat melakukan pengujian.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 *Stir Casting*

Proses pembuatan komposit ini dimulai dengan metode *stir casting*, di mana Al 6061 dilebur dalam tungku pada suhu 900°C selama sekitar 45 menit. Setelah Al 6061 sepenuhnya mencair, dilakukan pengadukan dan penambahan Alumina (Al_2O_3) sebanyak 5% menggunakan alat pengaduk modifikasi dari bor tangan. Pengadukan dilakukan pada kecepatan 1500 rpm selama 3 menit. Dalam komposit ini, Al 6061 berfungsi sebagai matriks, sementara Alumina bertindak sebagai penguat. Alumina dipilih karena kekerasannya dan stabilitasnya yang baik.

Setelah Al 6061 yang sudah tercampur dengan Alumina (Al_2O_3) selesai dilebur, campuran tersebut kemudian dituangkan ke dalam cetakan yang sebelumnya telah dipanaskan. Pemanasan cetakan ini bertujuan untuk mencegah penurunan suhu yang drastis, yang dapat mengakibatkan keretakan pada hasil pengecoran. Leburan komposit dituangkan hingga ketinggian sampel melebihi tinggi cetakan, yang akan mempermudah proses selanjutnya. Ketika suhu sampel mendekati suhu ruangan, sampel tersebut dikeluarkan dari cetakan dan dilakukan sedikit perapihan. Apabila sampel yang dihasilkan sesuai dengan bentuk cetakan tanpa adanya retak atau patahan, maka proses *stir casting* dianggap berhasil.

Tabel 4.1 Berat Paduan Komposit

Paduan Komposit Aluminium berpenguat Alumina					
No	Nomor Sampel	Aluminium Al 6061 (g)	Alumina (Al_2O_3) (g)	Persen Aluminium	Persen Alumina
1	Spesimen 1	281,51	14,11	95 %	5 %
2	Spesimen 2	274,48	13,75	95 %	5 %
3	Spesimen 3	288,45	14,53	95 %	5 %

4.2 *Thixoforming*

Aluminium Al 6061 yang telah dicampur dengan Alumina (Al_2O_3) dan sudah memadat kemudian dipotong untuk menghilangkan bagian-bagian yang berlebihan, seperti sisi-sisi sampel yang melebihi ukuran cetakan. Setelah itu, sampel tersebut dimasukkan kembali ke dalam cetakan dan ditempatkan dalam *muffle furnace* yang diatur pada suhu $620^\circ C$. Dari suhu awal *muffle furnace* yang berada pada suhu ruangan hingga mencapai $620^\circ C$ memerlukan waktu sekitar 30 menit. Pada suhu tersebut, komposit masih dalam kondisi *semi-solid* atau belum sepenuhnya mencair, yang dapat diamati dari hasil penekanan.

Ketika ruang bakar mencapai suhu $620^\circ C$, cetakan berisi komposit segera dikeluarkan dari *muffle furnace* dan ditempatkan pada mesin press dengan kekuatan 392 mpa dan ditahan dalam kondisi tersebut selama 5 menit. Setelah waktu tersebut tercapai, tekanan dilepaskan, dan cetakan beserta sampel didinginkan pada suhu ruangan. Dari hasil penekanan, tampak cairan komposit yang meluap membentuk pola melingkar, serta adanya pengurangan ketebalan pada sampel, yang menandakan bahwa sampel telah menerima tekanan dari mesin press. Dengan tekanan ini, diharapkan porositas pada hasil pengecoran akan berkurang atau bahkan hilang.

Tabel 4.2 Reduksi Ketebalan *Thixoforming*

Reduksi Ketebalan pada Proses <i>Thixoforming</i>					
No	Spesimen <i>Thixoforming</i>	Ketebalan (mm)		Total Reduksi (mm)	Rata-Rata Reduksi (mm)
		Sebelum	Sesudah		
1	Spesimen 1 (10%)	16,8	15,0	1,8	1,6
2	Spesimen 2 (5%)	15,8	14,9	0,9	
3	Spesimen 3 (15%)	16,4	14,4	2,0	

4.3 *Rolling*

Proses *rolling* merupakan metode deformasi plastis yang digunakan untuk mengurangi ketebalan spesimen dengan menerapkan tekanan melalui rol, proses pertama dalam melakukan *rolling* adalah dengan preparasi sampel dengan mengurangi ketebalan sampel dengan gerinda poles, proses ini

dilakukan karena mesin *rolling* yang digunakan memiliki kapasitas maksimum ketebalan sampel sebesar 11mm. Setelah dilakukan proses preparasi sampel, spesimen diukur menggunakan jangka sorong sebanyak 5 titik pengukuran. Setelah itu proses *rolling* dilakukan beberapa kali *rolling* dengan arah yang sama hingga mencapai ketebalan yang ditargetkan. Dalam penelitian ini, digunakan tiga variabel *rolling* dengan target reduksi ketebalan sebesar 5%, 10%, dan 15%.

Tabel 4.3 Pengukuran Ketebalan Sebelum Proses *Rolling*

No	Persen Reduksi	Ketebalan Sebelum <i>Rolling</i> (mm)					
		Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4	Titik 5	Rata-rata ketebalan
1	Spesimen 1 (10%)	10,7	10,2	10,6	10,5	10,8	10,6
2	Spesimen 2 (5%)	10,3	10,3	10,5	10,3	10,6	10,4
3	Spesimen 3 (15%)	9,2	10,3	10,2	10,3	10,5	10,1

Tabel 4.4 Pengukuran Ketebalan Sesudah Proses *Rolling*

No	Persen Reduksi	Ketebalan Sesudah <i>Rolling</i> (mm)					
		Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4	Titik 5	Rata-rata ketebalan
1	Spesimen 1 (10%)	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6
2	Spesimen 2 (5%)	9,9	9,8	9,9	9,9	9,9	9,9
3	Spesimen 3 (15%)	8,5	8,5	8,6	8,5	8,5	8,5

Tabel 4.5 Reduksi Ketebalan pada Proses *Rolling*

No	Persen Reduksi	Ketebalan (mm)		Total Reduksi (mm)	Persen Reduksi (%)
		Sebelum	Sesudah		
1	Spesimen 1 (10%)	10,6	9,6	1,0	9,4 %
2	Spesimen 2 (5%)	10,4	9,9	0,5	4,8 %
3	Spesimen 3 (15%)	10,1	8,5	1,6	15,8 %

Pada spesimen pertama, yang ditargetkan mengalami reduksi 10%, ketebalan awalnya adalah 10,6 mm, dan setelah *rolling*, ketebalannya berkurang menjadi 9,6 mm, dengan persentase reduksi 9,4%. Spesimen kedua, yang diroll untuk mencapai reduksi 5%, memiliki ketebalan awal 10,4 mm, dan setelah *rolling*, ketebalannya berkurang menjadi 9,9 mm, dengan persentase reduksi 4,8%. Sedangkan spesimen ketiga, yang ditargetkan untuk reduksi 15%, memiliki ketebalan awal 10,1 mm, yang kemudian berkurang menjadi 8,5 mm setelah *rolling*, menghasilkan persentase reduksi 15,8%. Proses *rolling* ini diharapkan dapat meningkatkan sifat mekanis material seperti kekerasan dan kekuatan.

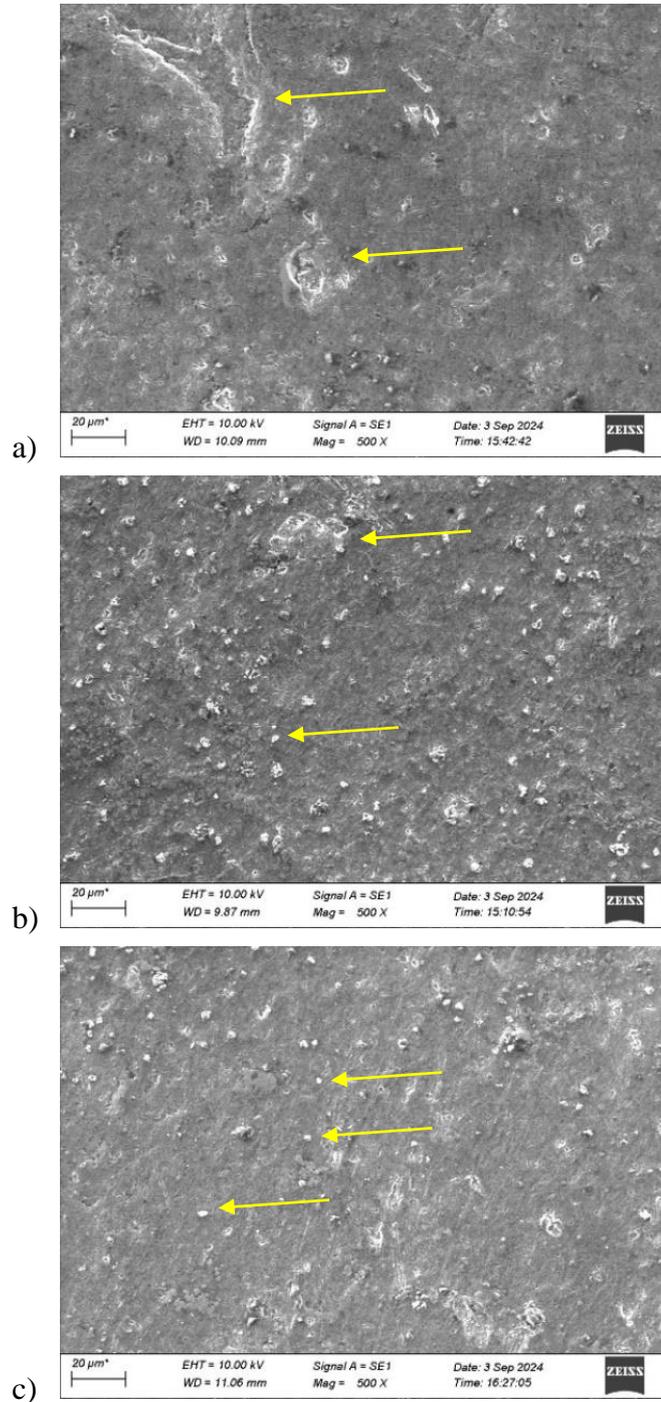
4.4 *Precipitation Hardening*

Pada proses *precipitation hardening*, terdapat tiga tahapan utama yang melibatkan perlakuan panas, yaitu *solutioning*, *quenching*, dan *artificial aging*. Tahap pertama, *solutioning*, dilakukan dengan memanaskan material hingga mencapai suhu 550°C untuk melarutkan partikel-partikel penguat ke dalam matriks logam, menciptakan larutan padat homogen. Setelah itu, material langsung didinginkan dengan cepat melalui proses *quenching* pada media air dengan suhu 1°C untuk mengunci struktur larutan padat tersebut, mencegah partikel-partikel penguat mengendap kembali. Tahap terakhir adalah *artificial aging*, di mana material dipanaskan pada suhu yang lebih rendah yaitu dengan suhu 190°C pada waktu 2 Jam. Tujuan dari tahap ini adalah untuk mengendapkan partikel penguat secara terkontrol, yang akan meningkatkan kekerasan dan kekuatan material secara signifikan. Setelah semua tahapan ini dilakukan, spesimen memasuki tahap *machining* untuk membentuk spesimen agar memiliki dimensi yang sesuai dengan standar pengujian yang akan dilakukan.

4.5 Hasil Uji Struktur Mikro

Setelah proses reduksi ketebalan melalui *rolling* selesai dilakukan, pengujian struktur mikro dilakukan menggunakan alat Zeiss EVO 10 *Scanning Electron Microscope* (SEM). Pengujian ini menghasilkan gambar dari SEM

yang memberikan visualisasi detail dari struktur mikro komposit, serta gambar dari *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (EDX) yang memberikan informasi mengenai distribusi unsur pada sampel. Pengamatan ini difokuskan pada bagian atas (*top section*) dari sampel, untuk menganalisis persebaran penguat Alumina (Al_2O_3) dalam matriks Al 6061 pasca *rolling*.



Gambar 4.1 Uji SEM perbesaran 500 \times

a) Reduksi 5%, b) Reduksi 10%, dan c) Reduksi 15%

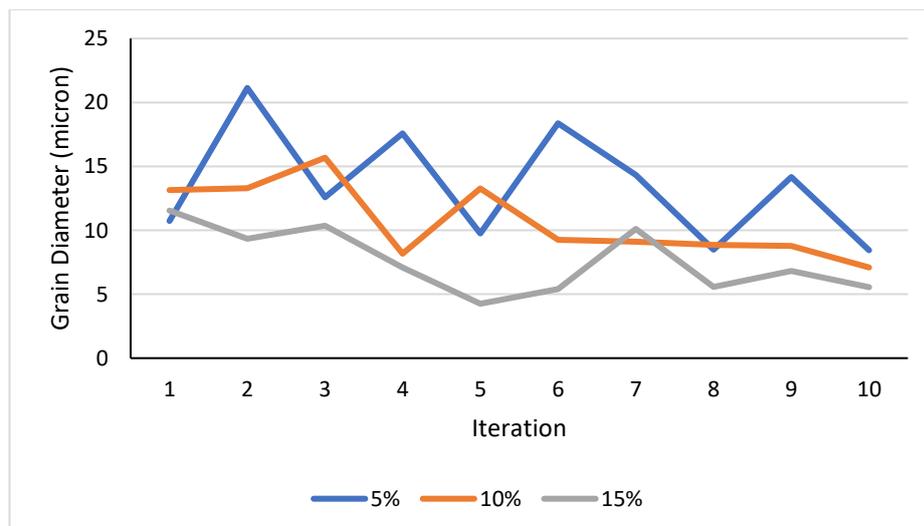
Persentase reduksi pada proses *rolling* berpengaruh signifikan terhadap struktur butir material. Semakin tinggi persentase reduksi, material mengalami deformasi plastis yang lebih besar, sehingga menyebabkan perpanjangan butir-butir dan peningkatan tekstur arah tertentu (*preferred orientation*).

Dapat dilihat pada Gambar 4.1 (a) bahwa batas butir masih tampak pada permukaan. Jarak antara butir masih dalam nilai yang tergolong cukup besar. Namun, seiring dengan meningkatnya persen reduksi menjadi 10%, ditampilkan pada Gambar 4.1 (b) bahwa batas butir semakin menghilang hingga mencapai persen reduksi 15% pada Gambar 4.1 (c). Hal ini sesuai dengan literatur [16] yang menyatakan bahwa seiring dengan meningkatnya persentase *rolling*, maka terjadi proses *Dynamic Recrystallization* (DRX) dimana terjadi pembentukan butir baru akibat deformasi. Hal ini menyebabkan butir-butir menjadi lebih halus. Selain itu, dilakukan Analisa untuk mengetahui distribusi butir pada sampel. Diperoleh nilai distribusi sebagaimana Tabel dan Grafik di bawah ini

Tabel 4.6 Distribusi Butir Sampel

Sampel	Micron (μm)			
	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Mean</i>	<i>St.Dev</i>
5%	8.441	21.137	13.5567	4.384617
10%	7.095	15.681	10.6659	2.889069
15%	4.257	11.545	7.6068	2.531544

Pada Tabel 4.4 dapat dilihat bahwa seiring dengan meningkatnya persen reduksi *rolling*, maka nilai dari rata-rata diameter butir juga cenderung menurun hingga 56% dari nilai 13.5 μm menjadi 7.6 μm . Hal ini diakibatkan oleh adanya fenomena *grain refinement* yang diakibatkan oleh adanya deformasi. Fenomena ini menghasilkan rekristalisasi dan membentuk butir yang lebih halus dalam sisi morfologi [17]



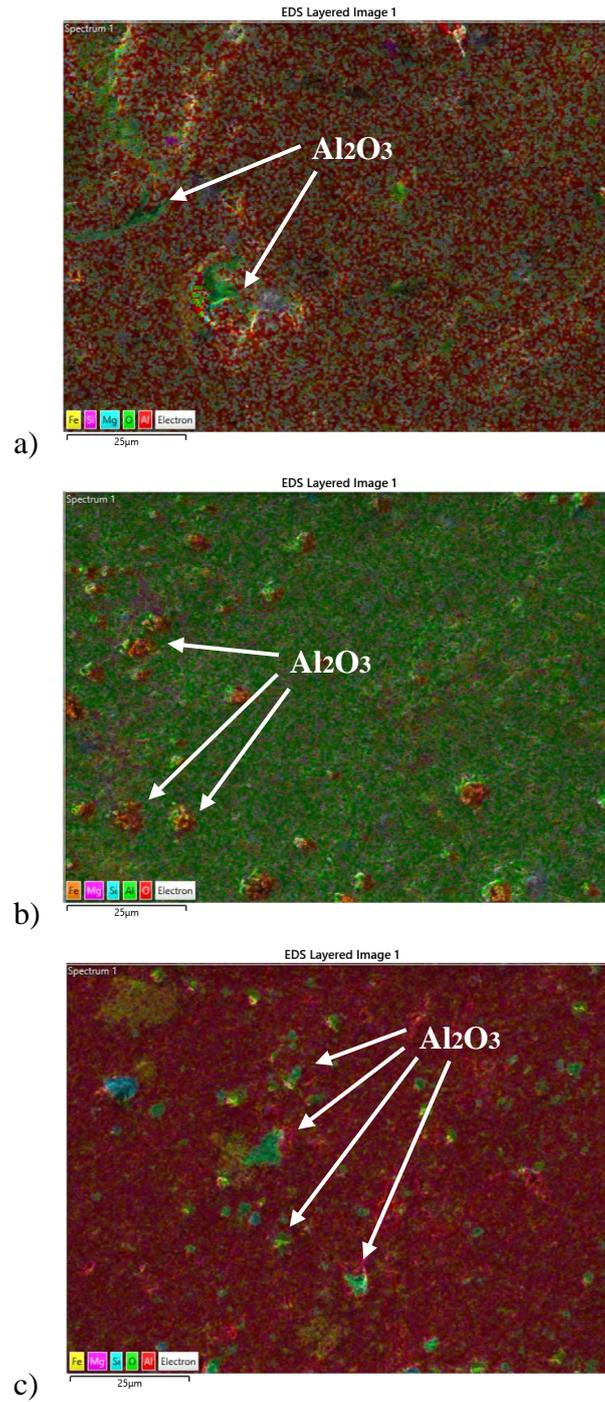
Gambar 4.2 Hasil Iterasi Pengukuran Butir dengan *Software ImageJ*

Selain itu dapat dilihat pula bahwa standar deviasi cenderung menurun seiring dengan meningkatnya reduksi sampel dari nilai 5% sebesar 4,3 μm menjadi 2,8 μm pada 10% reduksi, dan 2,5 μm pada 15% reduksi, standar deviasi dihitung menggunakan Rumus 4.1. Hal ini juga diperkuat oleh hasil pengukuran iterasi dengan *software ImageJ* yang ditampilkan pada Gambar 4.2. Fenomena ini disebut homogenisasi dimana ukuran butir cenderung menyusut dan berada pada *range* yang hampir homogen dengan ditandai oleh standar deviasi yang menurun.

Pada sampel terdapat variasi persentase berat unsur melalui analisa EDX, diketahui variasi berat unsur sebagaimana tabel dan gambar di bawah ini.

Tabel 4.7 Hasil Uji EDX

% wt	5%	10%	15%
O	11.23	10.39	10.62
Mg	0.68	0.67	0.63
Al	83.97	85.1	83.87
Si	2.98	2.05	3.28
Mn	0.66	0	0.34
Fe	0.49	1.78	1.26
Total	100	100	100



Gambar 4.3 Mapping Uji EDX

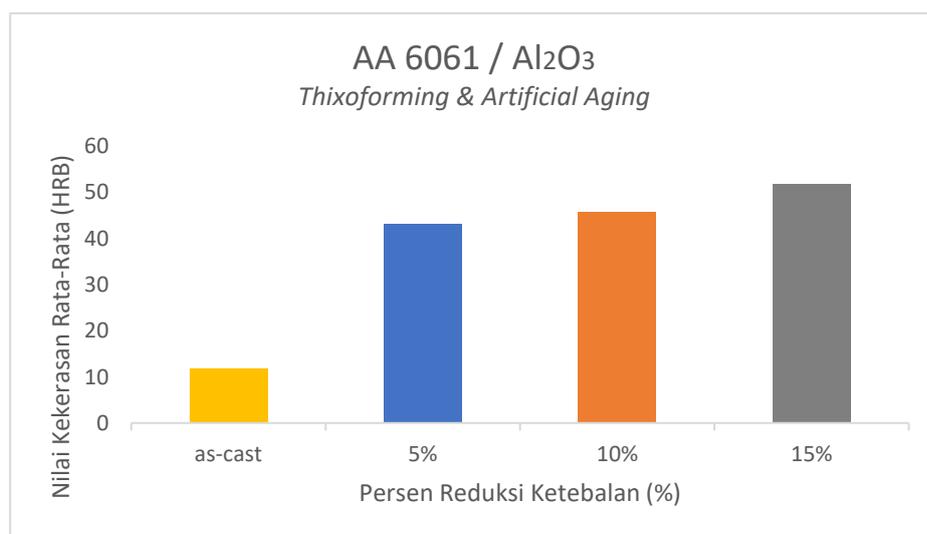
a) Reduksi 5%, b) Reduksi 10%, dan c) Reduksi 15%

4.6 Hasil Uji Kekerasan

Hasil uji kekerasan menunjukkan perbedaan signifikan antara berbagai sampel. Untuk aluminium murni, nilai kekerasan rata-rata yang diperoleh adalah 11,8 HRB. Sampel dengan penambahan persen reduksi *rolling* 5% menunjukkan peningkatan kekerasan rata-rata menjadi 43,1 HRB. Peningkatan kekerasan lebih lanjut terlihat pada sampel dengan persen reduksi *rolling* 10%, yang memiliki nilai kekerasan rata-rata sebesar 45,7 HRB. Sampel dengan persen reduksi *rolling* 15% menunjukkan peningkatan kekerasan yang paling tinggi, dengan nilai rata-rata mencapai 51,8 HRB. Data ini mengindikasikan bahwa penambahan persentase persen reduksi *rolling* secara signifikan meningkatkan kekerasan material.

Tabel 4.8 Hasil Uji Kekerasan AA 6061 & Alumina

Hasil Pengujian Kekerasan					
No	Persen Reduksi	Titik 1 (HRB)	Titik 2 (HRB)	Titik 3 (HRB)	Nilai Kekerasan Rata-Rata (HRB)
1	as-Cast	13,3	9,3	12,7	11,8
2	5%	40,3	46,5	42,4	43,1
3	10%	45,7	47,3	44,2	45,7
4	15%	51,4	50,6	53,5	51,8



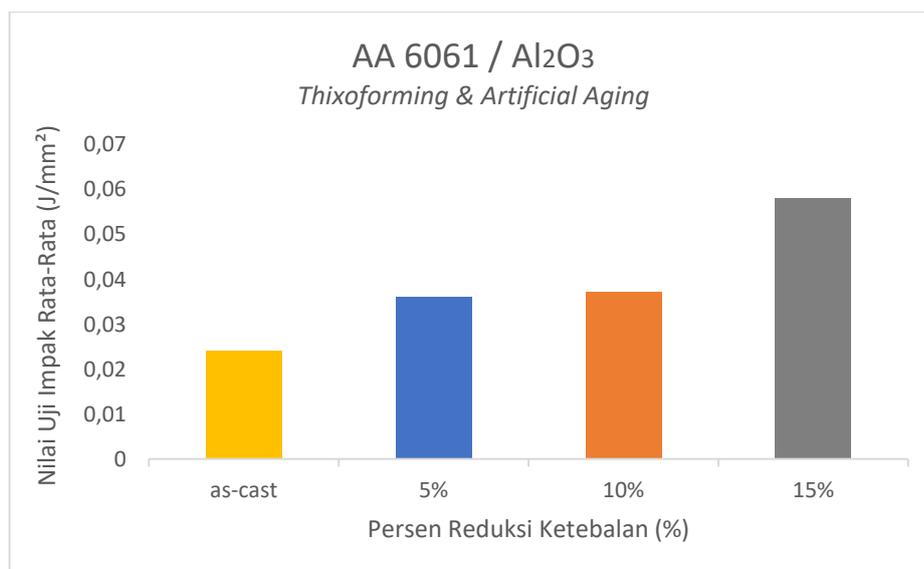
Gambar 4.4 Grafik Uji Kekerasan AA 6061 & Alumina

4.7 Hasil Uji Impak

Hasil uji impak menunjukkan variasi nilai ketangguhan material berdasarkan persentase persen reduksi *rolling* yang digunakan. Untuk aluminium murni, nilai impak rata-rata yang diperoleh adalah 0,024 J/mm². Pada sampel dengan persen reduksi *rolling* 5% nilai impak rata-rata meningkat menjadi 0,036 J/mm². Peningkatan kecil terlihat pada sampel dengan persen reduksi *rolling* 10% dengan nilai impak rata-rata 0,0372 J/mm². Namun, peningkatan signifikan terjadi pada sampel dengan persen reduksi *rolling* 15% yang memiliki nilai impak rata-rata sebesar 0,0581 J/mm².

Tabel 4.9 Hasil Uji Impak AA 6061 & Alumina

Nilai Uji Impak							
No	Persen Reduksi	Uji 1 (J)	Uji 2 (J)	Uji 3 (J)	Energi rata-tata (J)	Luas Penampang (mm ²)	Nilai Uji Impak (J/mm ²)
1	As-Cast	2,7	2,1	2,3	2,37	100	0,024
2	5%	3,2	3,8	3,8	3,6	100	0,036
3	10%	1,8	4,5	4,4	3,6	96	0,0372
4	15%	5	5,1	4,9	5	86	0,0581



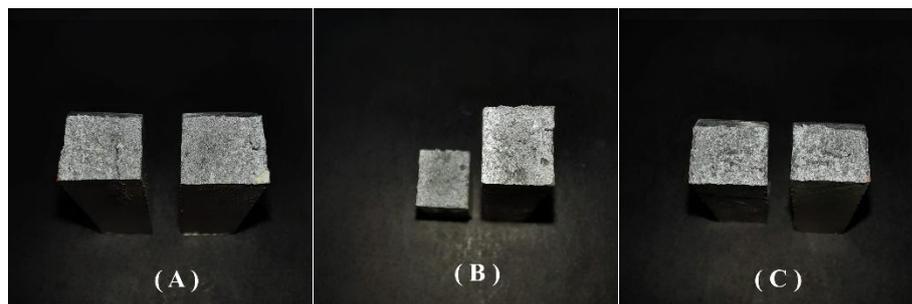
Gambar 4.5 Grafik Uji Impak AA 6061 & Alumina

Pada sampel dengan persen reduksi *rolling* 10% pada pengujian pertama menunjukkan bahwa terdapat *defect crack* pada spesimen yang menyebabkan kenaikan nilai impact yang relatif kecil dibandingkan dengan persentase persen reduksi *rolling* lainnya. *Defect* tersebut berkontribusi pada penurunan performa material dalam menyerap energi saat terkena beban impact sehingga pada pengujian impact titik patahan tidak pada *v-groove* yang dibuat, melainkan patah pada *defect crack* tersebut. Hal ini membuat grafik yang dihasilkan tidak berbanding lurus terhadap persen reduksi *rolling* yang digunakan.



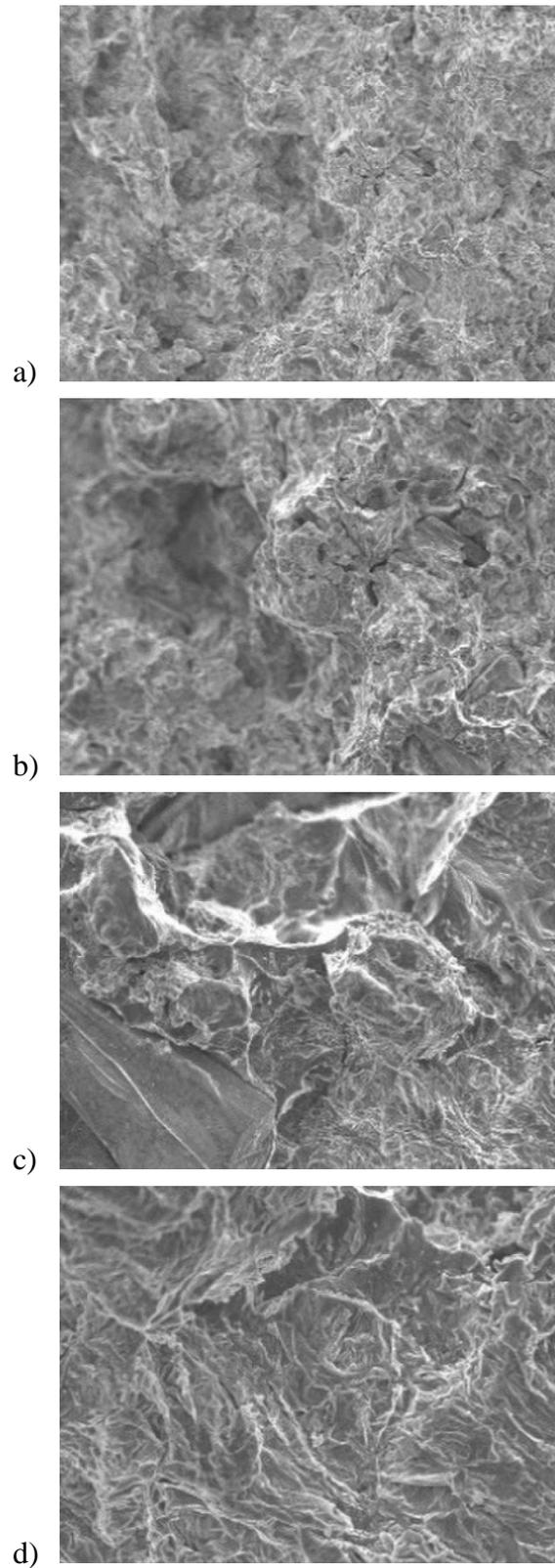
Gambar 4.6 Defect pada spesimen uji impact

Hasil patahan menunjukkan fraktur getas (Gambar 4.7) karena material telah melalui proses-proses seperti *thixoforming*, *rolling*, dan *artificial aging*. Proses ini meningkatkan kekerasan dan kekakuan material, namun mengurangi kemampuan material untuk mengalami deformasi plastis. Berikut adalah gambar hasil patahan pada uji impact.



Gambar 4.7 Hasil patahan pada uji impact

a) Reduksi 5%; b) Reduksi 10%; c) Reduksi 15%



Gambar 4.8 Permukaan Patahan Uji Impak Variasi Reduksi 15% dengan SEM

a) Perbesaran 25×, b) Perbesaran 50×, c) Perbesaran 200×,
dan d) Perbesaran 500×

Pada patahan uji impak yang dilakukan perbesaran menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dengan perbesaran Perbesaran 25×, 50×, 200×, dan 500×. Dapat disimpulkan bahwa patahan yang terjadi pada komposit Aluminium Al 6061 bersifat getas. Hal ini ditandai oleh sedikit dimple, permukaan patahan yang relatif halus, dan adanya fitur-fitur seperti batas butir yang jelas. Pada perbesaran 500x, terlihat dengan jelas bahwa batas butir memiliki peran penting dalam mekanisme patahan. Kemungkinan besar, patahan terjadi sepanjang batas butir (*intergranular fracture*), yang mengindikasikan adanya masalah pada ikatan antar butir atau segregasi elemen paduan pada batas butir.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Setelah dilakukannya penelitian pada komposit Aluminium Al 6061 berpenguat Alumina (Al_2O_3) yang telah dilakukan maka dapat diambil suatu kesimpulan untuk menjawab tujuan dilakukannya penelitian.

1. Persen reduksi dalam proses *rolling* berdampak terhadap morfologi, mikrostruktur, dan distribusi penguat Al_2O_3 pada komposit. Reduksi yang lebih tinggi menyebabkan deformasi plastis yang menghasilkan perpanjangan butir serta pembentukan orientasi butir tertentu. *Dynamic Recrystallization* (DRX) terlihat pada reduksi 10% dan 15%, menyebabkan *grain refinement* dengan penurunan ukuran butir rata-rata hingga 56%, dari 13.5 μm pada reduksi 5% menjadi 7.6 μm pada reduksi 15%.
2. Persen reduksi memengaruhi peningkatan nilai kekerasan material. Data yang dihasilkan menunjukkan bahwa material Aluminium Al 6061 murni memiliki nilai kekerasan rata-rata sebesar 11,8 HRB, sementara setelah dilakukan *rolling* dengan reduksi 5%, nilai kekerasan meningkat drastis menjadi 43,1 HRB. Pada reduksi 10%, nilai kekerasan rata-rata terus meningkat menjadi 45,7 HRB, dan akhirnya, pada reduksi 15%, kekerasan mencapai puncaknya dengan rata-rata 51,8 HRB. Peningkatan kekerasan ini sejalan dengan hasil uji struktur mikro, yang dimana pada reduksi yang lebih tinggi menghasilkan deformasi plastis yang signifikan, butir yang lebih halus, serta distribusi Al_2O_3 yang lebih homogen. Hal ini menunjukkan bahwa selain meningkatkan kekerasan, peningkatan reduksi juga berkontribusi pada penyempurnaan mikrostruktur material, yang berperan penting dalam memperkuat material secara keseluruhan.

3. Peningkatan persen reduksi berkontribusi pada peningkatan nilai uji impak. Pada material Al 6061 murni, nilai impak rata-rata yang dihasilkan adalah 0,024 J/mm². Setelah dilakukan *rolling* dengan reduksi 5%, nilai impak meningkat menjadi 0,036 J/mm². Selanjutnya, pada reduksi 10%, nilai impak rata-rata sedikit meningkat menjadi 0,0372 J/mm², namun peningkatan ini kurang signifikan yang kemungkinan disebabkan oleh faktor *defect* pada benda uji impak. Terakhir, pada reduksi 15%, terjadi peningkatan yang lebih signifikan pada nilai impak rata-rata, yaitu mencapai 0,0581 J/mm².

5.2 Saran

Setelah dilakukannya penelitian pada komposit Aluminium Al 6061 berpenguat Alumina (Al₂O₃) yang telah dilakukan maka terdapat beberapa saran untuk peneliti selanjutnya.

1. Melakukan proses *stir casting* dengan alat pengaduk yang memiliki putaran yang stabil sehingga penyebaran penguat pada komposit yang diproses menyebar dengan baik
2. Menggunakan pemanas induksi yang terintegrasi dengan mesin press sehingga proses *thixoforming* lebih terkontrol dan cepat
3. Melakukan *trial and error* pada sampel komposit percobaan untuk mengetahui kapasitas maksimal *rolling* pada material yang akan dilakukan proses pengerolan.
4. Melakukan pengujian XRD untuk mengetahui presipitat yang hadir pada proses *artificial aging* sehingga analisis lebih lengkap tentang pengaruh kekuatan apakah dari penguat, reduksi, atau presipitat pada *artificial aging*

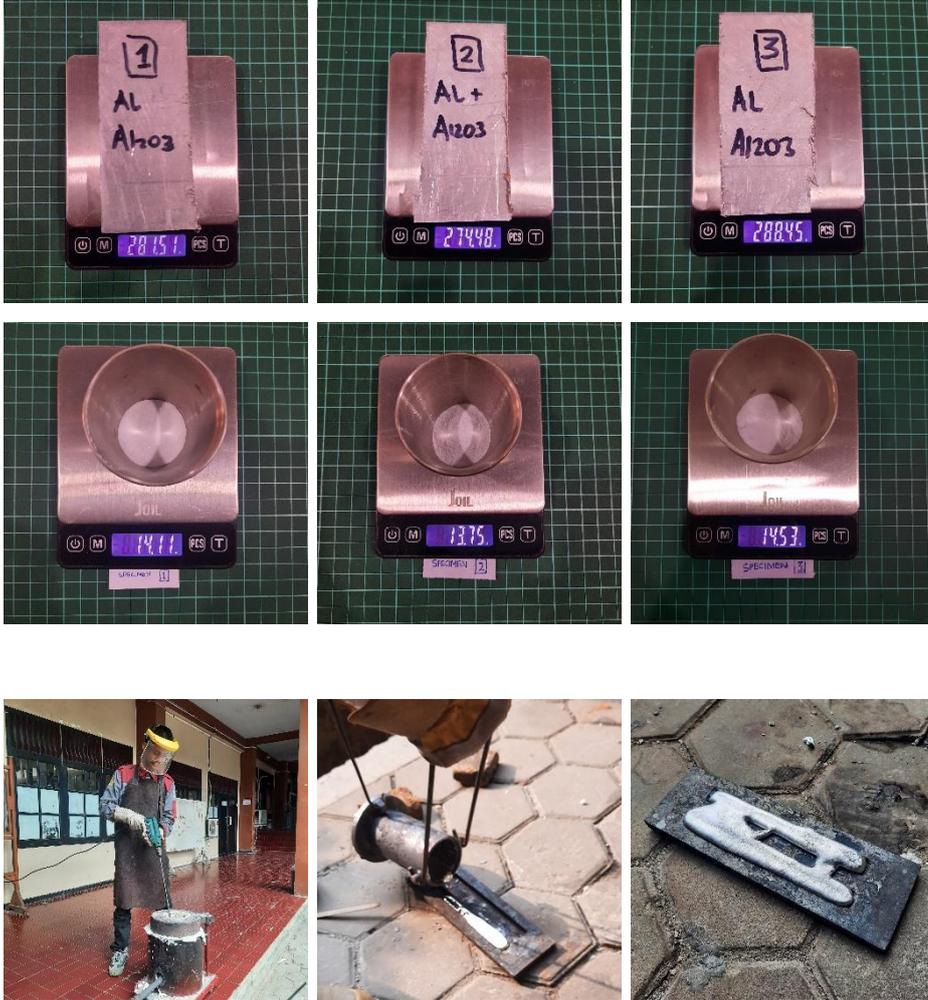
DAFTAR PUSTAKA

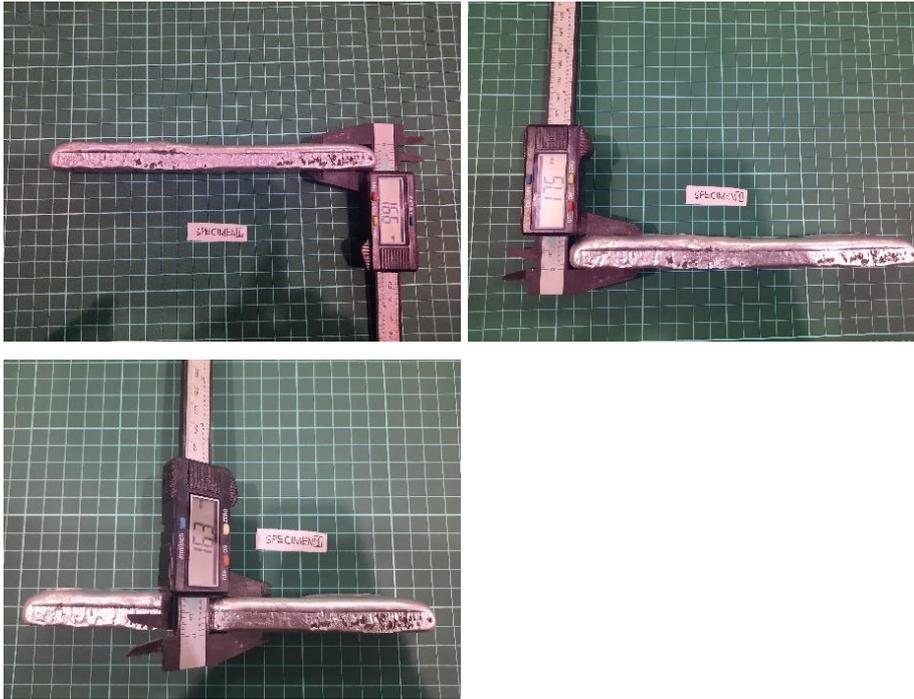
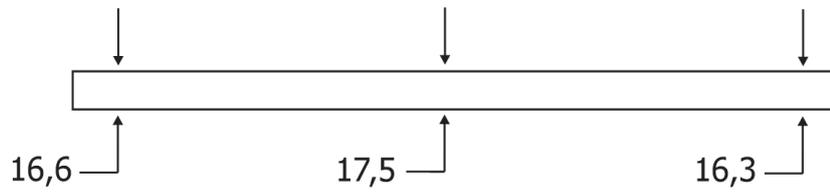
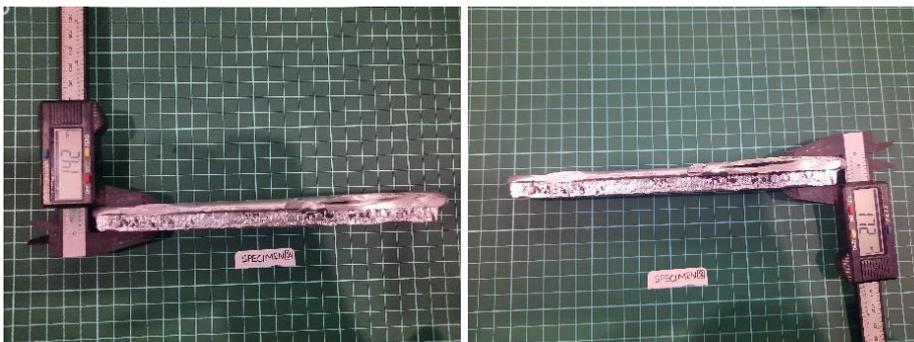
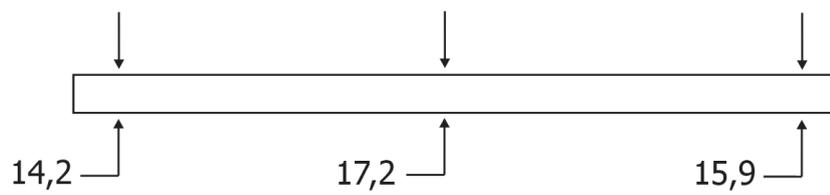
- [1] G. Hirt and R. Kopp, *Thixoforming: Semi-Solid Metal Processing*, Aachen, Germany: Wiley-VCH, 2009.
- [2] N. H. Husain, A. H. Ahmad and M. M. Rashidi, "An Overview of Thixoforming Process," *Materials Science and Engineering* 257, pp. 1-9, 2017.
- [3] S. MacKenzie, "Heat treatment of aluminum VI – Artificial aging," 15 Maret 2021. [Online]. Available: thermalprocessing.com/heat-treatment-of-aluminum-vi-artificial-aging/.
- [4] C. Pillajo, A. Melo, F. Neto, Casanova, P. M. M. d. S. J., J. Anglada-Rivera and Y. Leyet, "Shorter and efficient heat treatment parameters for 6061/6063 aluminium alloys. ," *Canadian Metallurgical Quarterly*, vol. 60, no. (4), p. 359–365. , 2021.
- [5] Ze Zhao, Michael Stuebner, Jim Lua, Nam Phan and Jinhui Yan, "Full-field temperature recovery during water quenching processes via physics-informed machine learning," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 303, no. 117534, 2022.
- [6] Y. S. Irawan, "Tekstur Bidang Geser (111) pada Pelat Aluminium A1100P dengan Berbagai Rasio Pengerolan Dingin Berpengaruh terhadap Kekuatan Tarik," *Seminar Nasional Pascasarjana VIII*, 2008.
- [7] G. Bădărău, M. Popa, G. Stoian, A.-M. Roman, R.-I. Comănesci, B. Pricop, u. Nicanor Cimpoes and L.-G. Bujoreanu, "Uncommon Cold-Rolling Faults in an Fe–Mn–Si–Cr Shape-Memory Alloy," *Crystals*, vol. 250, p. 14, 2024.
- [8] N. Nayiroh, *Teknologi material komposit*, Malang: Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim, 2013.
- [9] V. Vlack and L. H, *Elements of Materials Science and Engineering*, Michigan: Addison-Wesley Publishing Company, 1985.
- [10] T. V. Christy, N. Murugan and S. Kumar, "A comparative study on the microstructures and mechanical properties of Al 6061 alloy and the MMC Al

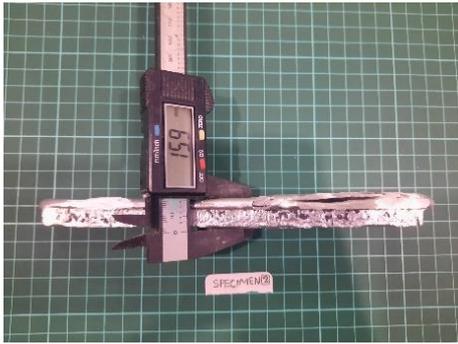
- 6061/TiB₂/12p," *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 9(1), pp. 57-65, 2010.
- [11] P. Gudlur, A. Forness, J. Lentzc, M. Radovic and A. Muliana, "Thermal and mechanical properties of Al/Al₂O₃ composites at elevated," *Materials Science and Engineering A 531*, pp. 18-27, 2012.
- [12] Kumar, D. Amru, S. Dadan and R. Zulfikar, "Perancangan Alat Uji Impak Charpy Sederhana Untuk Material Logam Baja St 30," *Journal of Mechanical Engineering, Manufactures, Materials and Energy*, pp. 1-9, 2017.
- [13] G. Barbato, M. Galetto, A. Germak and F. (. Mazzoleni, "Influence of the indenter shape in Rockwell hardness test," *Proc. of the HARDMEKO '98*, pp. 21-23, 1998.
- [14] H. Setiawan, "Pengaruh Proses Heat Treatment pada Kekerasan Material Special K (K100)," *Jurnal UMK*, pp. 1-11, 2012.
- [15] M. A. Fikri, I. N. Gusniar and V. Naubnome, "Tensile Test Analysis And Microstructure Observation Of Shielded Metal Arc Welding S45c Steel Against Current Variations," *Traksi : Majalah Ilmiah Teknik Mesin*, pp. 65-78, 2022.
- [16] E. Tolouie and R. Jamaati, "Effect of rolling reduction on the microstructure, texture, and mechanical behavior of AZ91 alloy," *Journal of materials research and technology*, pp. 7947 - 7957, 2023.
- [17] A. A. Alhamidi and M. Dewi, "MICROSTRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES AL 6061 PROCESSED BY COLD ROLLING AND AGING," *VANOS Journal of Mechanical Engineering Education*, pp. 2528-2611, 2018.
- [18] G. Pratomo, "Analisa Struktur Mikro dan Tingkat Kekerasan Logam Aluminium Hasil Cold Rolling Dengan Variasi Reduksi Pada Jarak Roller 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm.," Universitas Muhammadiyah Surakarta, 2019.
- [19] E. Tolouie and R. Jamaati, "Effect of rolling reduction on the microstructure, texture, and mechanical behavior of AZ91 alloy," *journal of materials research and technology*, pp. 7947 - 7957, 2023.

LAMPIRAN

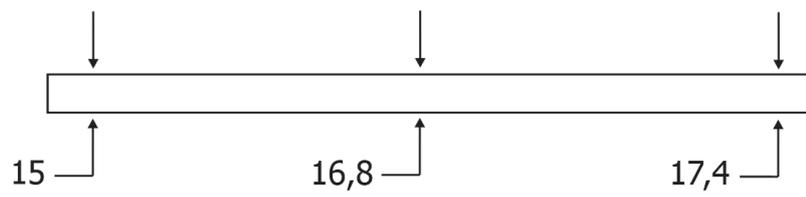
Lampiran 1. Dokumentasi *Stir Casting*



a) Pengukuran Hasil *Stir Casting* (Spesimen 1)b) Pengukuran Hasil *Stir Casting* (Spesimen 2)



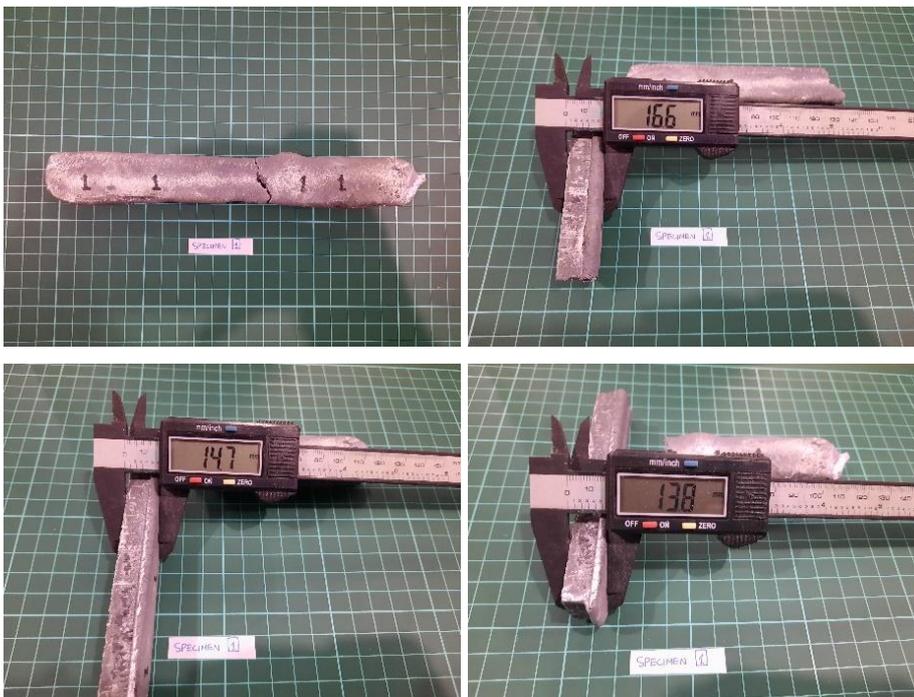
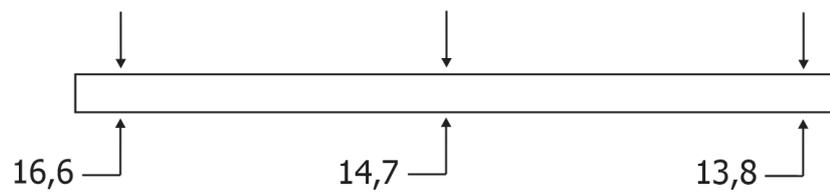
c) Pengukuran Hasil *Stir Casting* (Spesimen 3)



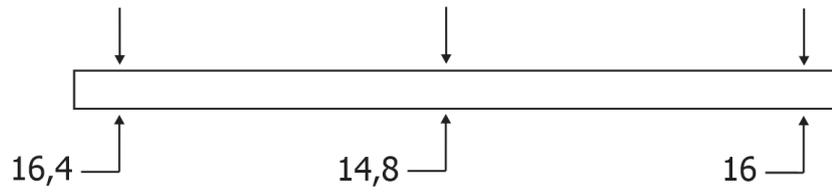
Lampiran 2. Dokumentasi *Thixoforming*



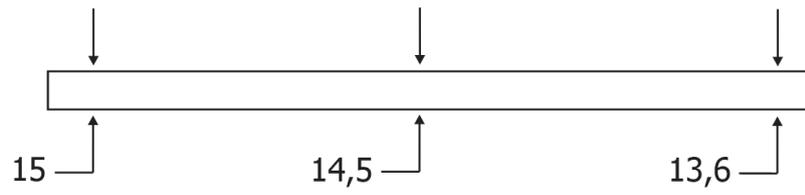
a) Pengukuran hasil thixoforming (Spesimen 1)



b) Pengukuran hasil thixoforming (Spesimen 2)



c) Pengukuran hasil thixoforming (Spesimen 3)



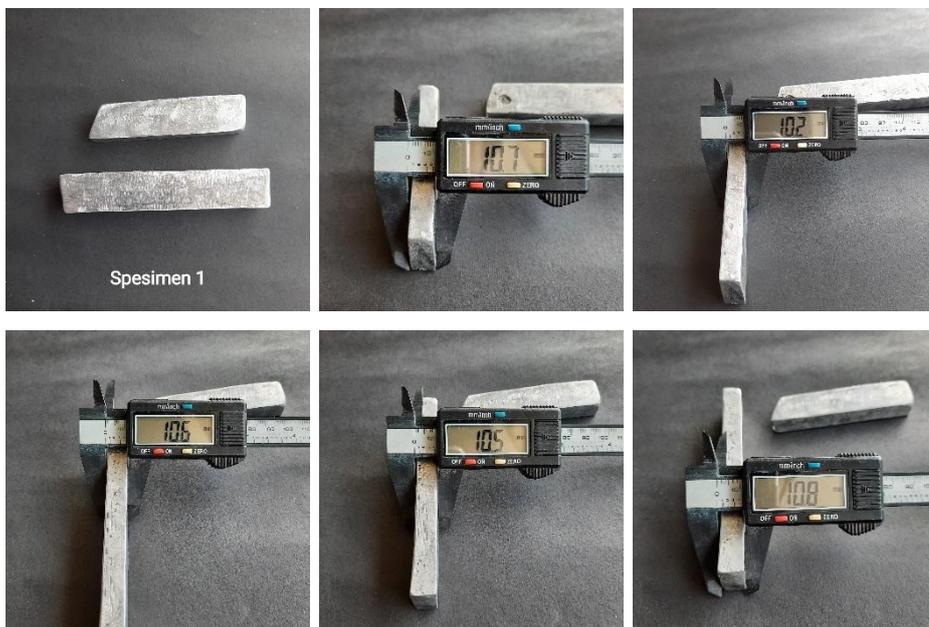
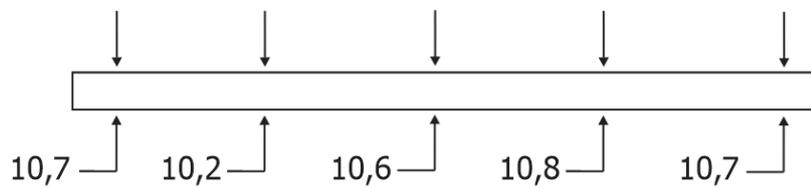
Lampiran 3. Dokumentasi *Rolling*

1. Dokumentasi alat dan identifikasi sampel

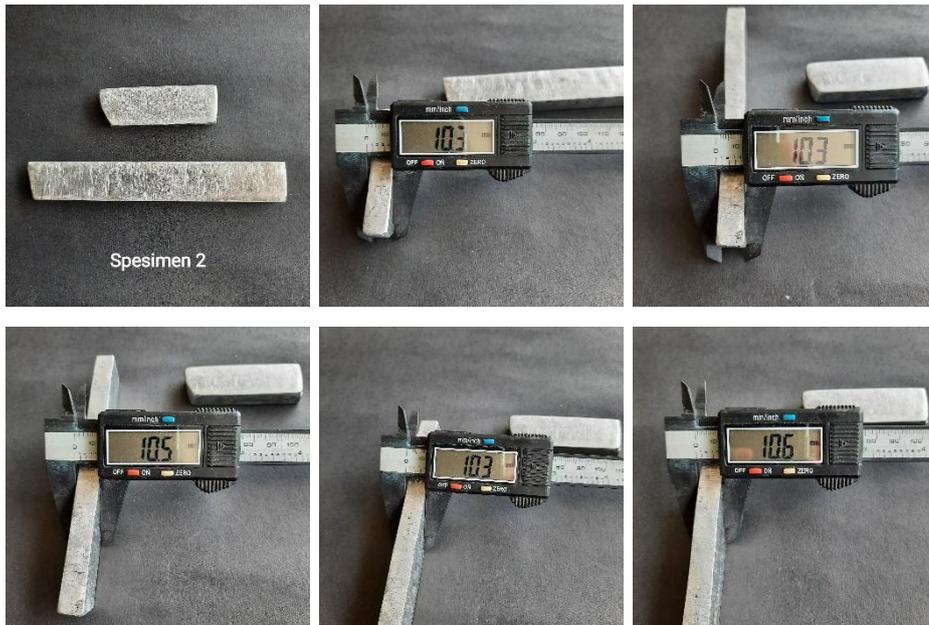
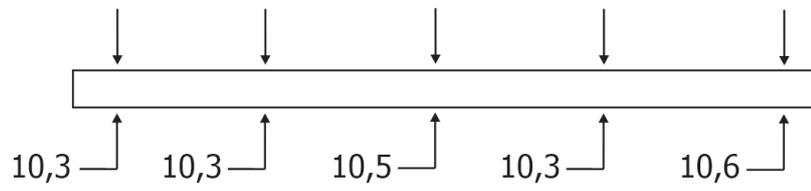


2. Ketebalan Sebelum *Rolling*

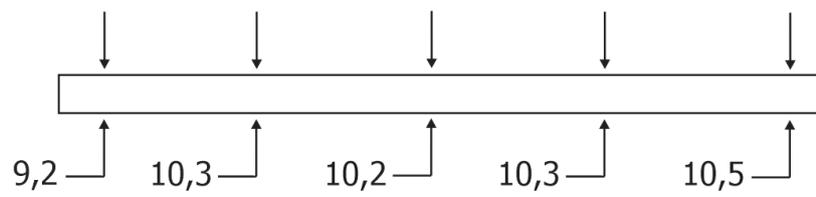
a) Spesimen 1



b) Spesimen 2



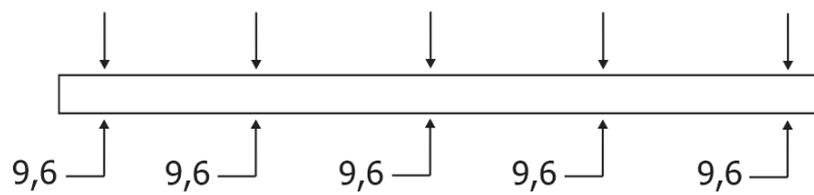
c) Spesimen 3



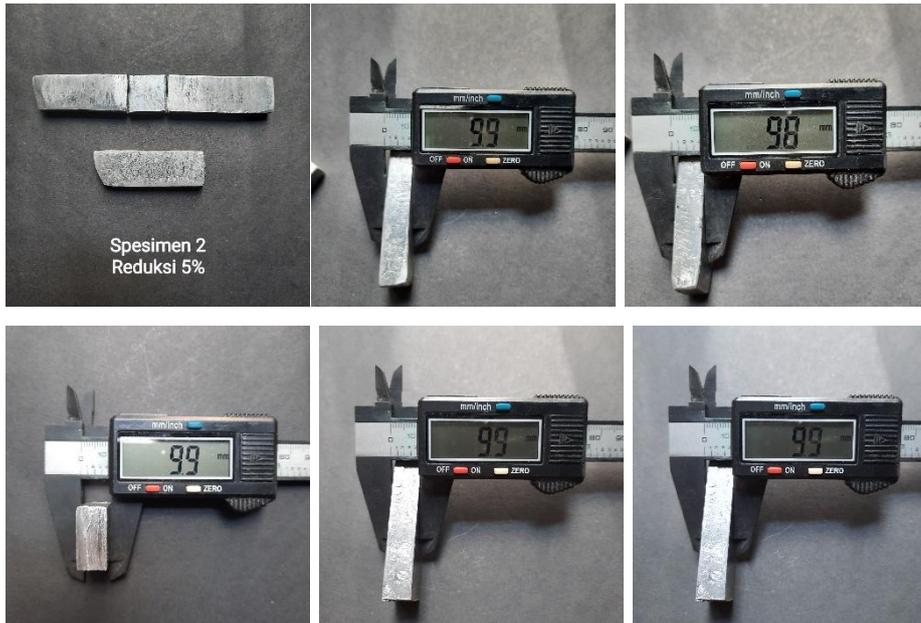
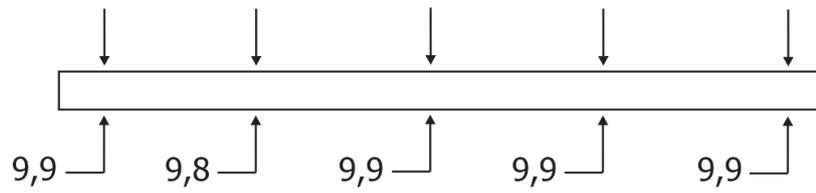


3. Ketebalan Sesudah *Rolling*

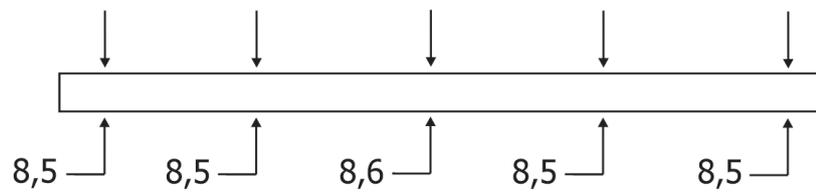
a) Spesimen 1



b) Spesimen 2



c) Spesimen 3



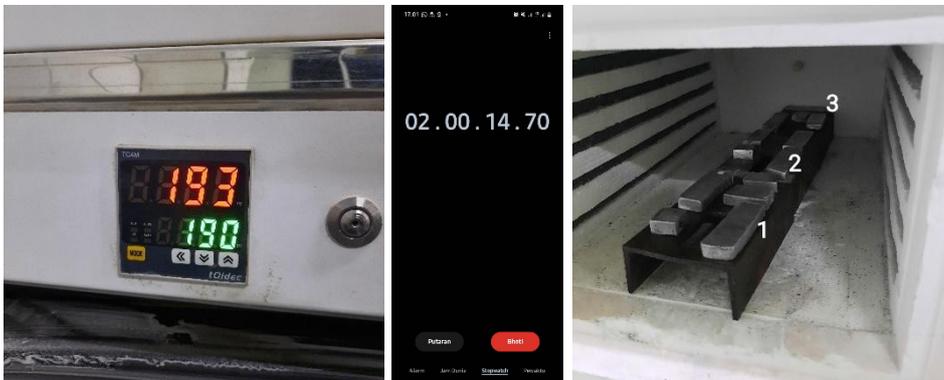


Lampiran 4. Dokumentasi Perlakuan Panas dan Artificial Aging

1. Proses Solutioning



2. Proses Artificial Aging



Lampiran 5. Hasil Uji Kekerasan

1. Sampel yang diuji



2. Hasil Uji Kekerasan (Reduksi 10%)



3. Hasil Uji Kekerasan (Reduksi 5%)



4. Hasil Uji Kekerasan (Reduksi 15%)



5. Hasil Uji Kekerasan AA 6061 Cast



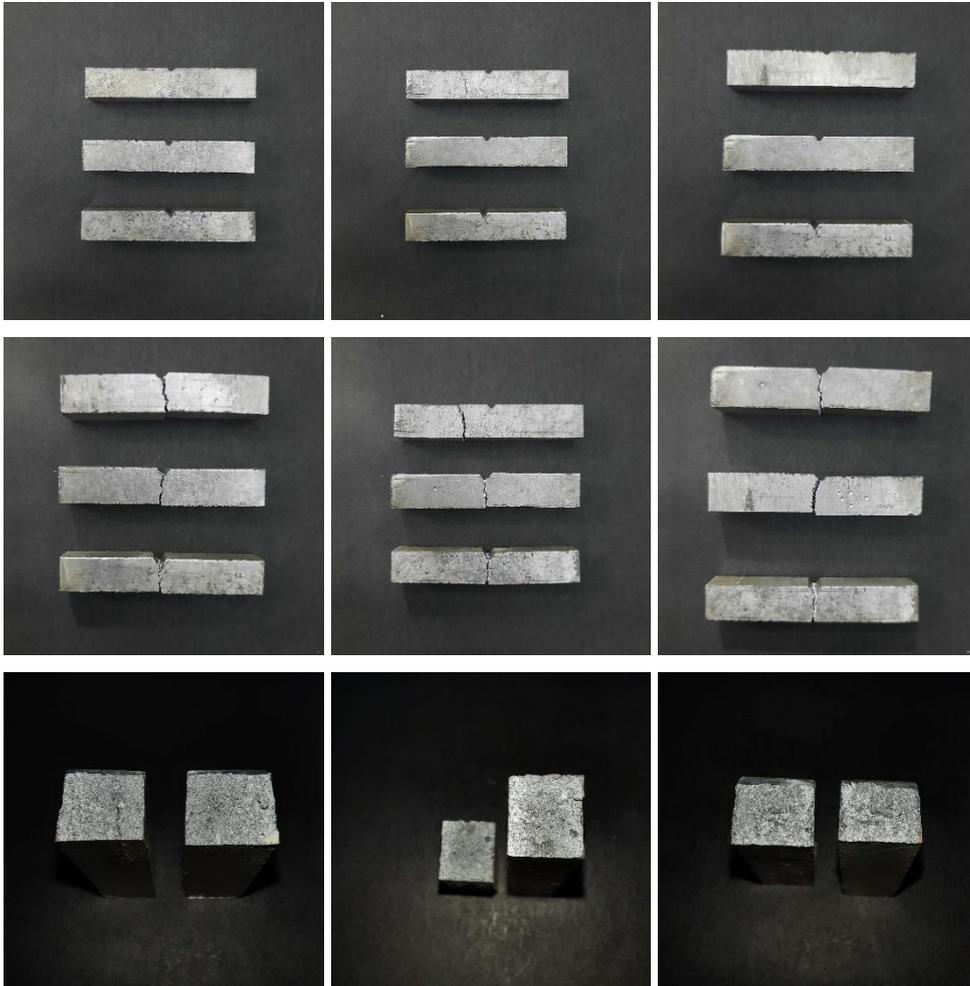
Lampiran 6. Hasil Uji Impak

1. Spesimen Uji Impak

5%

10%

15%



2. Hasil Uji Impak (Reduksi 5%)



3. Hasil Uji Impak (Reduksi 10%)



4. Hasil Uji Impak (Reduksi 15%)



5. Hasil Uji Impak AA 6061 Cast



Lampiran 7. Hasil Uji SEM & EDX

Test Report**ENERGY DISPERSIVE X-RAY (EDX) – SPECTRUM**

Name of Sample	Komposit Aluminium Al 6061 + Alumina Al ₂ O ₃
User Name	Ghifari Arifianto
Name of the Test	SEM-EDX
Test Date	September 03, 2024

Test Conditions

Parameters	Voltage 10kV
	Magnification 500, 1000, 2500, 5000
Preparation	No Coating, Alumina Polishing

Test Runs Image

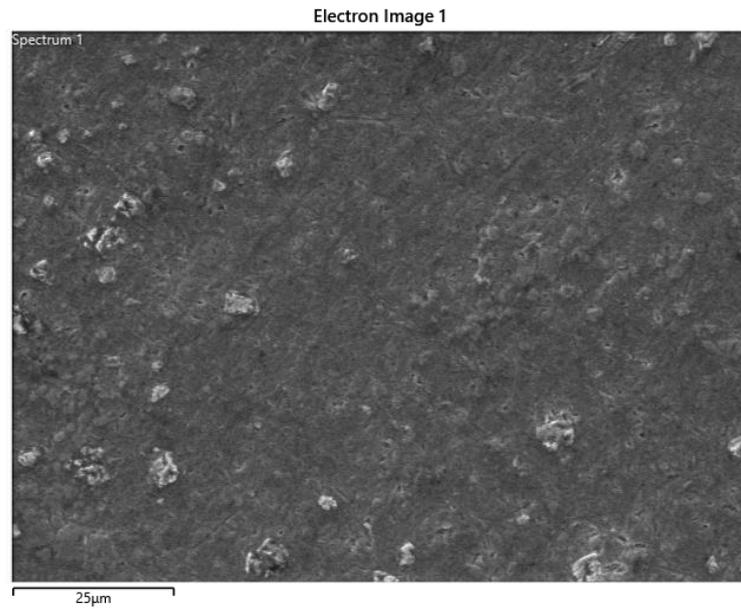
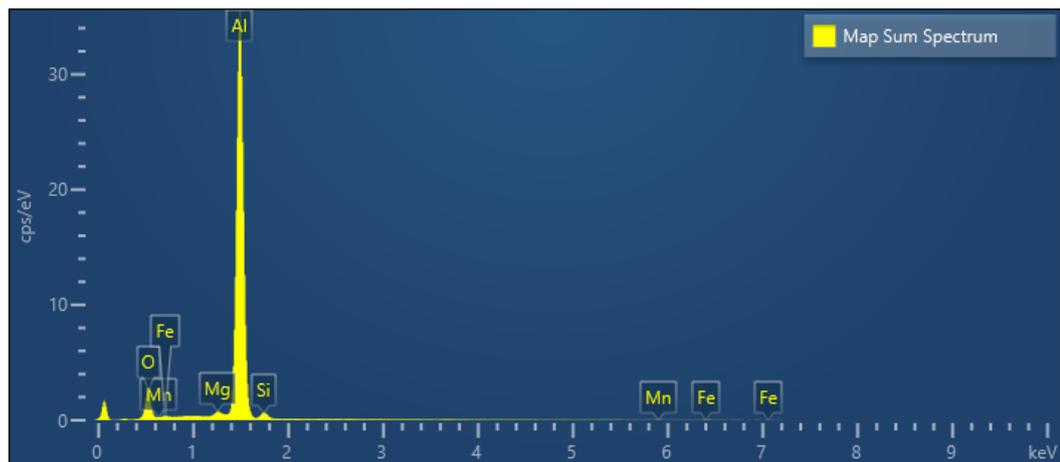
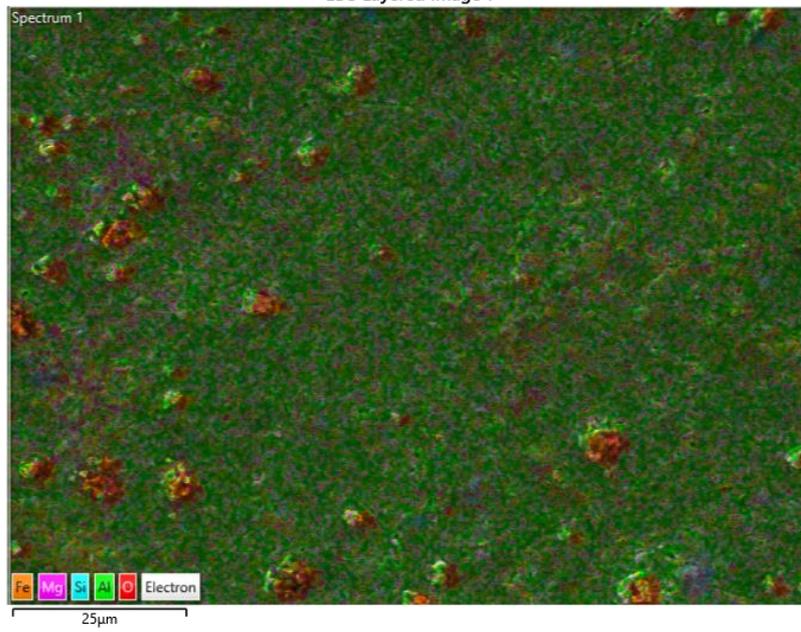
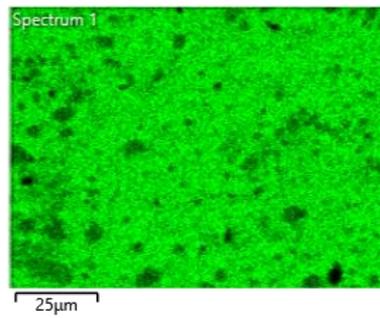
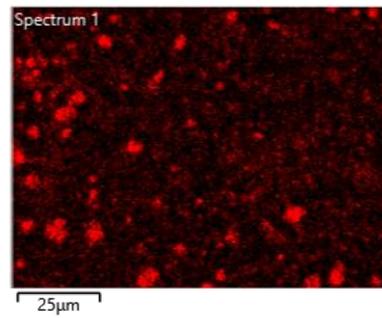
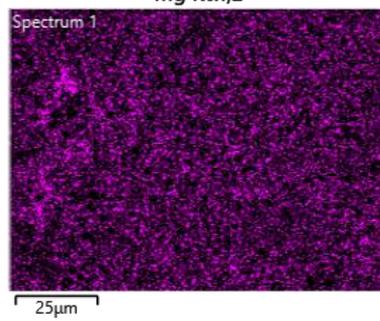
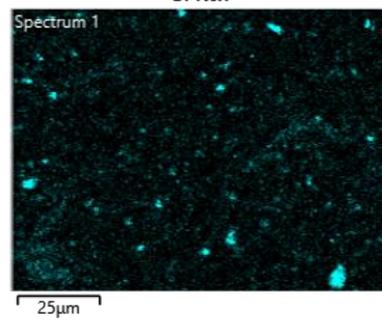
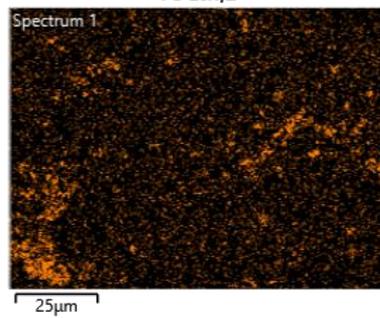
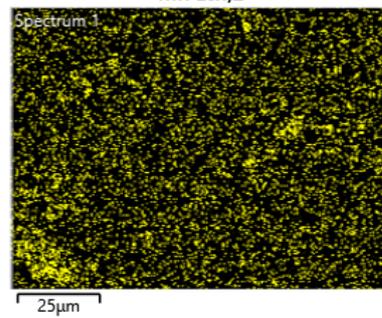


Figure 1. Al 6061 + Al₂O₃ 10%



Spectrum 1				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
O	K series	10.39	0.08	16.50
Mg	K series	0.67	0.03	0.70
Al	K series	85.10	0.20	80.13
Si	K series	2.05	0.04	1.86
Mn	L series	0.00	0.36	0.00
Fe	L series	1.78	0.21	0.81
Total		100.00		100.00

EDS Layered Image 1

Al K α 1O K α 1Mg K α 1,2Si K α 1Fe L α 1,2Mn L α 1,2

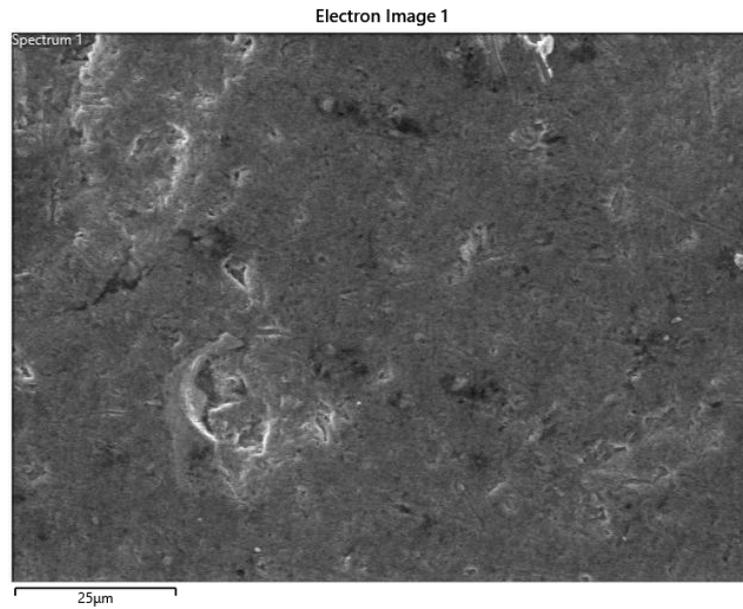
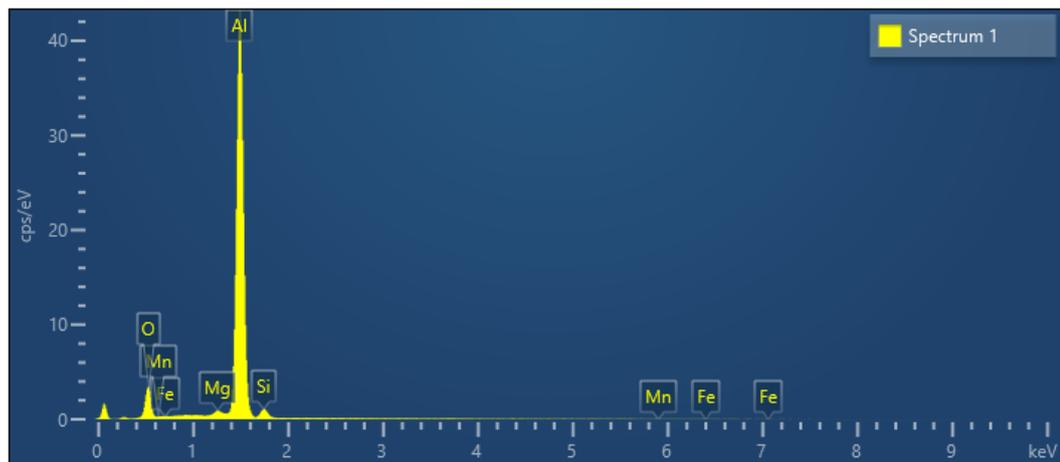
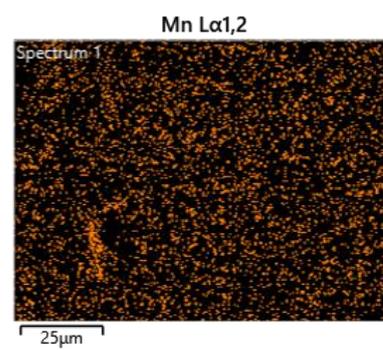
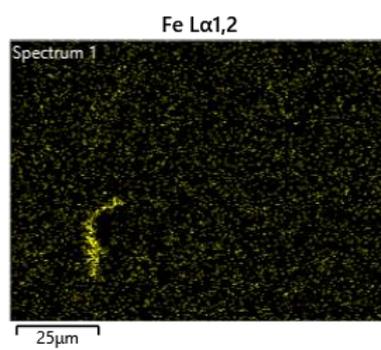
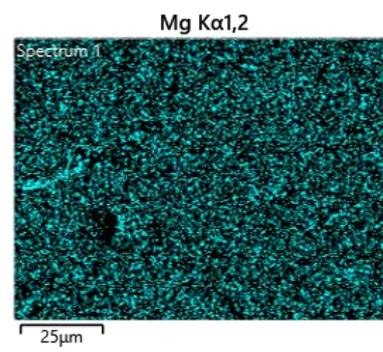
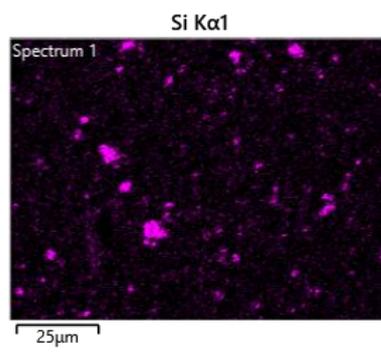
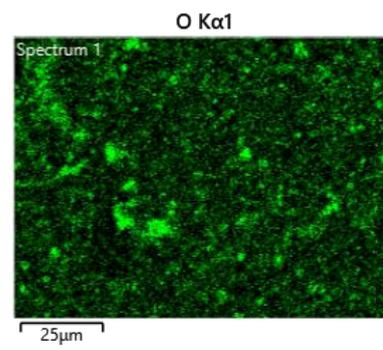
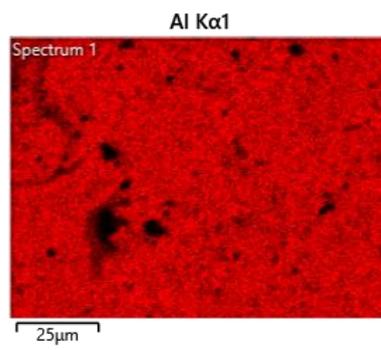
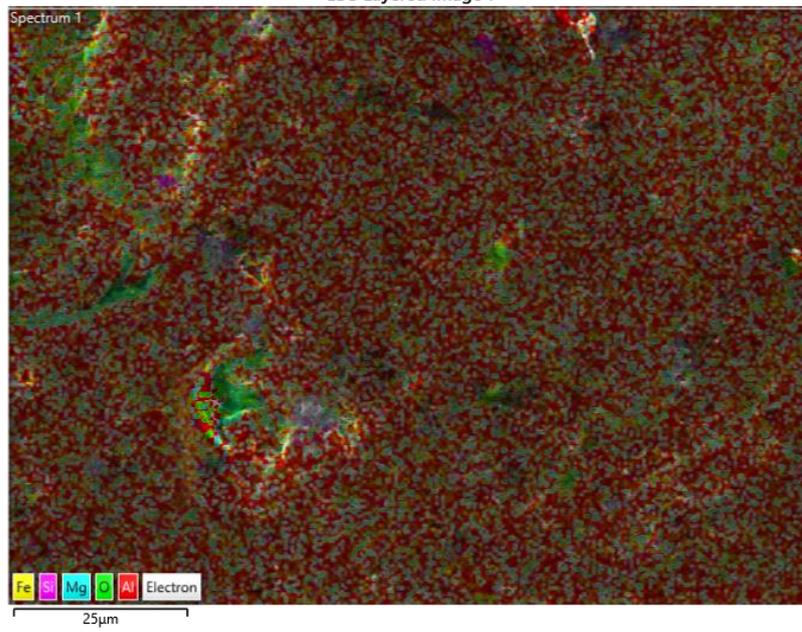


Figure 2. Al 6061 + Al₂O₃ 5%



Spectrum 1				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
O	K series	11.23	0.17	17.68
Mg	K series	0.68	0.05	0.70
Al	K series	83.97	0.68	78.42
Si	K series	2.98	0.09	2.67
Mn	L series	0.66	0.67	0.30
Fe	L series	0.49	0.40	0.22
Total		100.00		100.00

EDS Layered Image 1



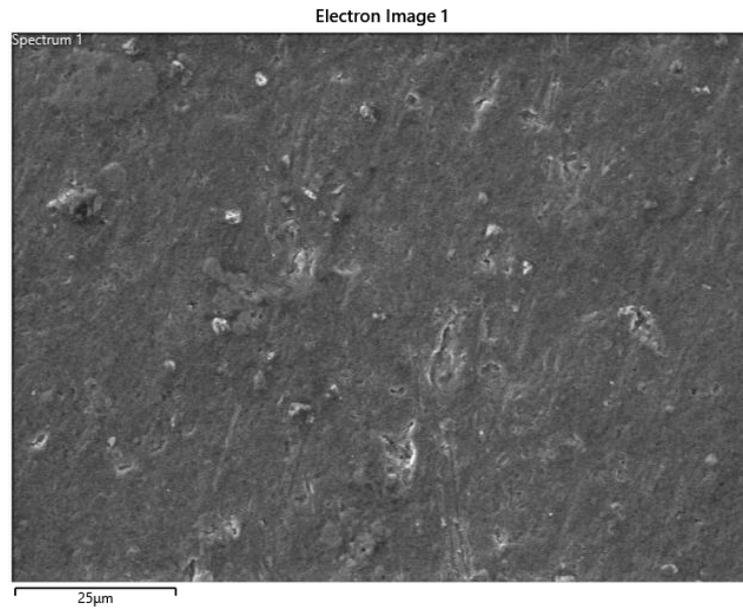
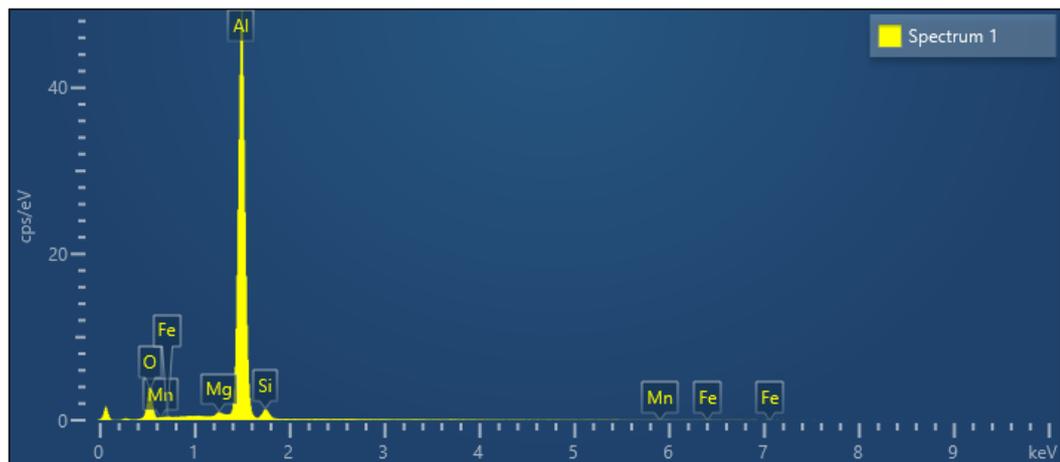
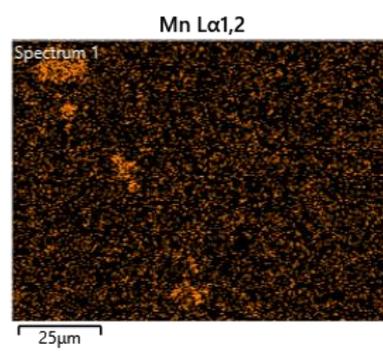
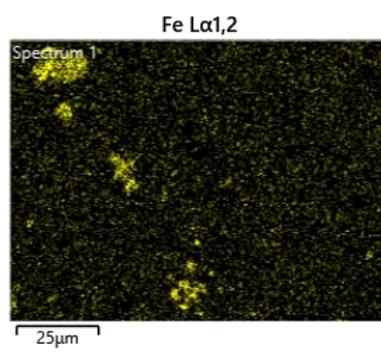
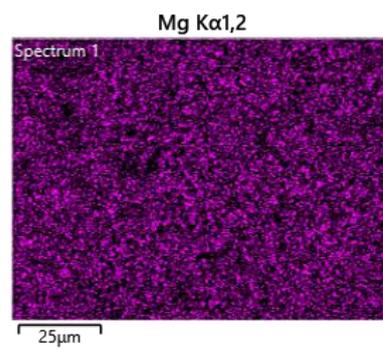
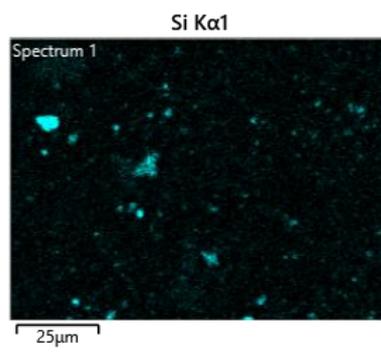
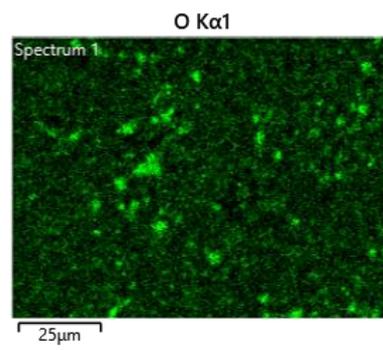
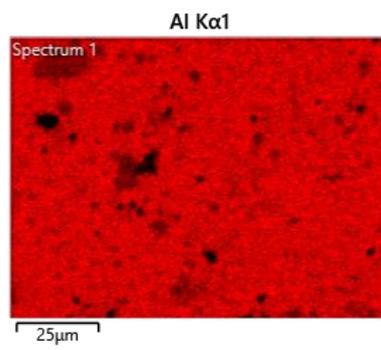
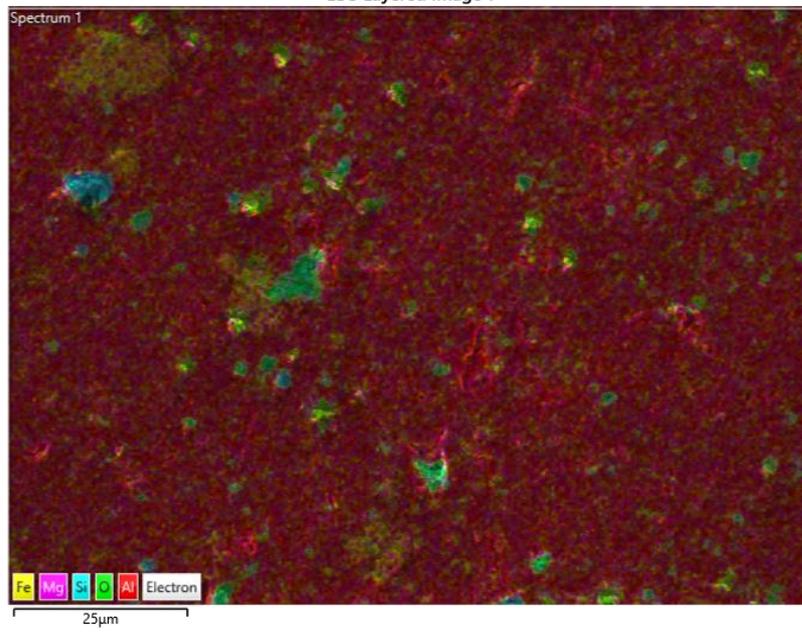


Figure 3. Al 6061 + Al₂O₃ 15%



Spectrum 1				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
O	K series	10.62	0.15	16.83
Mg	K series	0.63	0.05	0.66
Al	K series	83.87	0.64	78.82
Si	K series	3.28	0.09	2.96
Mn	L series	0.34	0.64	0.16
Fe	L series	1.26	0.37	0.57
Total		100.00		100.00

EDS Layered Image 1



Lampiran 8. Invoice Pembelian Bahan

1. Alumina

tokopedia INVOICE
INV/20240322/MPL/3807989326

DITERBITKAN ATAS NAMA
Penjual : Kimiopedia

UNTUK
Pembeli :
Tanggal Pembelian : 22 Maret 2024
Alamat Pengiriman :

INFO PRODUK	JUMLAH	HARGA SATUAN	TOTAL HARGA
Aluminium Oksida Putih / White Aluminium Oxide / Alumina 1Kg Berat: 1.10 kg	1	Rp50.000	Rp50.000
TOTAL HARGA (1 BARANG)			Rp50.000
Total Ongkos Kirim			Rp23.600
Diskon Ongkos Kirim			-Rp20.000
TOTAL BELANJA			Rp53.600
Biaya Layanan			Rp 1.000
Biaya Jasa Aplikasi			Rp1.000
TOTAL TAGIHAN			Rp55.600
Promo Tokopedia			
Bebas Ongkir hingga Rp30.000			Rp20.000*
*Promo yang didapat bisa berubah. Cek S&K			

Kurir: Kurir Rekomendasi - Reguler BIAYA PENGIRAN GRATIS

Metode Pembayaran: **BCA Virtual Account**
GoPay Coins

2. Aluminium Al 6061

tokopedia INVOICE
INV/20240702/MPL/4001456812

DITERBITKAN ATAS NAMA
Penjual : Findustri

UNTUK
Pembeli :
Tanggal Pembelian : 02 Juli 2024
Alamat Pengiriman :

INFO PRODUK	JUMLAH	HARGA SATUAN	TOTAL HARGA
Plat Aluminium 20mm Aluminium 6061 harga per 1 cm2 Berat: 6 gr 10cmx20cm	200	Rp820	Rp164.000
TOTAL HARGA (200 BARANG)			Rp164.000
Total Ongkos Kirim			Rp8.300
Total Diskon Barang			-Rp11.480
Biaya Asuransi Pengiriman			Rp1.100
TOTAL BELANJA			Rp161.920
Biaya Layanan			Rp 1.000
Biaya Jasa Aplikasi			Rp1.000
TOTAL TAGIHAN			Rp163.920
Promo Tokopedia			
Diskon 7% hingga Rp100.000			Rp11.480*
*Promo yang didapat bisa berubah. Cek S&K			

Asuransi Pengiriman Tokopedia

Metode Pembayaran: **BCA Virtual Account**