

**PENGARUH PERSEN REDUKSI TERHADAP KARAKTERISTIK
KOMPOSIT Al 6061 BERPENGUAT SiC HASIL PROSES
THIXOFORMING DAN *ARTIFICIAL AGING***

Tugas Akhir

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



Disusun Oleh:

Tristan Verrill Adam

3331200006

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

2024

TUGAS AKHIR

Pengaruh Persen Reduksi Terhadap Karakteristik Komposit Al 6061 Berpenguat SiC Hasil Proses Thixoforming dan Artificial Aging

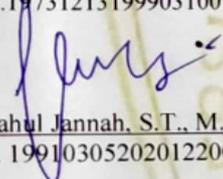
Dipersiapkan dan disusun Oleh :

Tristan Verrill Adam
3331200006

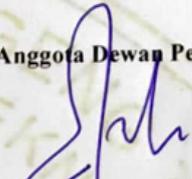
telah dipertahankan di depan Dewan Penguji
pada tanggal, 25 September 2024

Pembimbing Utama

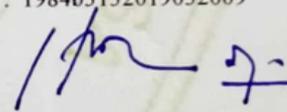

Prof. Dr. Eng. A. Ali Alhamidi, ST., MT.
NIP.197312131999031001

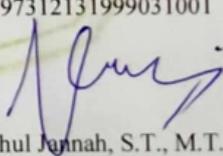

Miftahul Jannah, S.T., M.T.
NIP. 199103052020122000

Anggota Dewan Penguji


Dr. Erwin, ST., MT.
NIP.197310062009121001

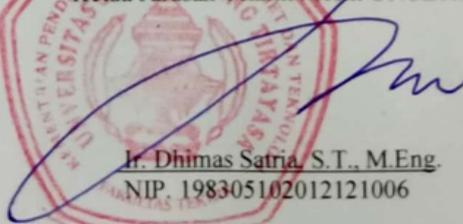

Shofiatul Ula, M.Eng.
NIP. 198403132019032009


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


Miftahul Jannah, S.T., M.T.
NIP. 199103052020122000

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

Tanggal, 14 Oktober 2024
Ketua Jurusan Teknik Mesin UNTIRTA


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

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Tristan Verrill Adam
NPM : 3331200006
Judul : Pengaruh Persen Reduksi Terhadap Karakteristik Komposit Al 6061
Berpenguat SiC Hasil Proses *Thixoforming* dan *Artificial Aging*

Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.

MENYATAKAN

Bahwa tugas akhir ini adalah hasil karya sendiri dan tidak ada duplikasi dengan karya orang lain, kecuali yang telah disebutkan sumbernya.

Cilegon, Oktober 2024



Tristan Verrill Adam
NIM. 3331200006

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	iii
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL	viii
KATA PENGANTAR	ix
ABSTRAK	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Metodologi Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Komposit	5
2.1.1 Pengertian Komposit	5
2.1.2 Klasifikasi Material Komposit	6
2.1.3 <i>Aluminium Matrix Composite</i> (AMC)	7
2.2 Material <i>Aluminium Matrix Composite</i>	7
2.2.1 Aluminium 6061	7
2.2.2 Silikon Karbida (SiC)	10
2.2.3 Magnesium	11
2.3 Metode Pembuatan Material	12
2.3.1 <i>Thixoforming</i>	12
2.3.2 <i>Stir Casting</i>	13
2.4 <i>Artificial aging</i>	14
2.5 Reduksi Ketebalan	15

2.6	Pengujian Material.....	17
2.6.1	Pengujian merusak (<i>destructive test</i>)	17
2.6.2	Analisis Metalografi.....	18
2.7	Penelitian Terdahulu.....	20
BAB III	METODOLOGI PENELITIAN	22
3.1	Diagram Alir Penelitian.....	22
3.2	Alat dan Bahan	25
3.2.1	Alat.....	25
3.2.2	Bahan.....	30
3.3	Prosedur Penelitian.....	32
3.3.1	<i>Stir Casting</i>	32
3.3.2	<i>Thixoforming</i>	33
3.3.3	<i>Heat Treatment</i>	34
3.3.4	<i>Artificial Aging</i>	34
3.3.5	<i>Rolling</i>	34
3.3.6	Uji Kekerasan.....	35
3.3.7	Uji Impak	35
3.3.8	Pengamatan Metalografi	36
3.2	Variabel Penelitian	36
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	37
4.1	Hasil <i>Thixoforming</i>	37
4.2	Hasil <i>Rolling</i>	38
4.3	Hasil Pengujian Impak	39
4.4	Hasil Pengujian Kekerasan.....	42
4.5	Hasil Pengamatan Metalografi	44
4.6	Diskusi Hasil	56
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN	59
5.1	Kesimpulan.....	59
5.2	Saran	60
	DAFTAR PUSTAKA	61
	LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Ilustrasi Komposit.....	5
Gambar 2.2 Diagram Fasa Al 6061	10
Gambar 2.3 Proses <i>Thixoforming</i>	13
Gambar 2.4 Proses <i>Stir Casting</i>	13
Gambar 2.5 Contoh <i>Artificial Aging</i> pada Logam.....	15
Gambar 2.6 Proses <i>Rolling</i>	16
Gambar 2.7 Uji Impak.....	17
Gambar 2.8 Uji Kekerasan	18
Gambar 2.9 <i>Scanning Electron Microscope</i>	19
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	23
Gambar 3.2 Alat <i>Press</i>	25
Gambar 3.3 Cetakan atau <i>Dies</i>	25
Gambar 3.4 <i>Infrared Thermogun</i>	26
Gambar 3.5 Timbangan Digital.....	26
Gambar 3.6 Gerinda	27
Gambar 3.7 <i>Muffle Furnace</i>	27
Gambar 3.8 SEM (<i>Scanning Electron Microscope</i>).....	28
Gambar 3.9 <i>Rockwell Type Hardness Tester FR-X Series</i>	28
Gambar 3.10 Alat Uji Impak.....	29
Gambar 3.11 Mesin <i>Roll</i>	29
Gambar 3.12 Alat Peleburan	30
Gambar 3.13 Mesin <i>Grinding and Polishing</i>	30
Gambar 3.14 Aluminium 6061.....	31
Gambar 3.15 SiC (Silikon Karbida).....	31
Gambar 3.16 Mg (Magnesium)	32
Gambar 4.1 Material Komposit Setelah <i>Thixoforming</i>	38
Gambar 4.2 Sampel Komposit yang Pecah akibat <i>Rolling</i>	39
Gambar 4.3 Grafik Nilai Impak Komposit dengan Variabel Reduksi Ketebalan	40

Gambar 4.4 Patahan Sampel dengan Reduksi Ketebalan 2%	41
Gambar 4.5 Patahan Sampel dengan Reduksi Ketebalan 4%	42
Gambar 4.6 Grafik Nilai Kekerasan Komposit dengan Variabel Reduksi Ketebalan.....	43
Gambar 4.7 Sampel Komposit dengan Reduksi Ketebalan 2%	44
Gambar 4.8 Sampel Komposit dengan Reduksi Ketebalan 4%	45
Gambar 4.9 Sampel Komposit dengan Reduksi Ketebalan 5%	45
Gambar 4.10 Cacat pada Sampel dengan Reduksi 2%.....	47
Gambar 4.11 Cacat pada Sampel dengan Reduksi 4%.....	47
Gambar 4.12 Cacat pada Sampel dengan Reduksi 5%.....	48
Gambar 4.13 EDS <i>Mapping</i> Sampel Komposit Hasil Reduksi 2%.....	49
Gambar 4.14 EDS <i>Mapping</i> Sampel Komposit Hasil Reduksi 4%.....	49
Gambar 4.15 EDS <i>Mapping</i> Sampel Komposit Hasil Reduksi 5%.....	50
Gambar 4.16 Unsur Al pada Komposit (a. Reduksi 2%; b. Reduksi 4%; c. Reduksi 5%).....	50
Gambar 4.17 Unsur O pada Komposit (a. Reduksi 2%; b. Reduksi 4%; c. Reduksi 5%).....	51
Gambar 4.18 Unsur Mg pada Komposit (a. Reduksi 2%; b. Reduksi 4%; c. Reduksi 5%).....	51
Gambar 4.19 Unsur Si pada Komposit (a. Reduksi 2%; b. Reduksi 4%; c. Reduksi 5%).....	52
Gambar 4.20 Unsur Fe pada Komposit (a. Reduksi 2%; b. Reduksi 4%; c. Reduksi 5%).....	52
Gambar 4.21 Unsur C pada Komposit (a. Reduksi 2%; b. Reduksi 4%; c. Reduksi 5%).....	53
Gambar 4.22 Spektrum EDS Sampel dengan Reduksi 2%	53
Gambar 4.23 Spektrum EDS Sampel dengan Reduksi 4%	54
Gambar 4.24 Spektrum EDS Sampel dengan Reduksi 5%	55

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Komposisi Kimia Aluminium 6061	8
Tabel 2.2 Perbandingan Sifat Mekanik Al 6061	9
Tabel 2.3 Sifat Mekanik Silikon Karbida (SiC)	11
Tabel 2.4 Nilai Kekerasan Material Uji setelah Melalui Artificial Aging	15
Tabel 4.1 Ketebalan Komposit Hasil Thixoforming	37
Tabel 4.2 Ketebalan Komposit Hasil Rolling.....	38
Tabel 4.3 Nilai Hasil Uji Impak Komposit dengan Variabel Reduksi Ketebalan	40
Tabel 4.4 Hasil Uji Kekerasan dengan Variabel Reduksi Ketebalan	42
Tabel 4.5 Komposisi Unsur Sampel Komposit dengan Reduksi 2% Hasil EDS .	54
Tabel 4.6 Komposisi Unsur Sampel Komposit dengan Reduksi 4% Hasil EDS .	54
Tabel 4.7 Komposisi Unsur Sampel Komposit dengan Reduksi 5% Hasil EDS .	55

KATA PENGANTAR

Bismillahirrohmanirrahim

Alhamdulillah puji syukur atas rahmat Allah SWT penulis ucapkan telah dapat menyelesaikan Proposal Skripsi yang berjudul “Pengaruh Persen Reduksi Terhadap Karakteristik Komposit Al 6061 Berpenguat SiC Hasil Proses Thixoforming”. Usulan Penelitian ini disusun sebagai salah satu syarat tugas akhir menjadi Sarjana Teknik, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.

Dalam kesempatan ini penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya atas segala bimbingan dan bantuan yang telah diberikan dalam penyusunan proposal usulan penelitian ini, kepada:

1. Dhimas Satria, S.T., M.Eng selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa atas kesempatan dan fasilitas yang telah diberikan selama proses penyusunan tugas akhir ini..
2. Dr. Ir. Ni Ketut Caturwati, M.T selaku dosen pembimbing akademik yang senantiasa mengarahkan selama masa perkuliahan.
3. Prof. Dr.Eng A. Ali Alhamidi, S.T., M.T selaku dosen pembimbing I atas bimbingan, waktu, dan ilmu pengetahuan yang telah diberikan selama proses penyusunan tugas akhir ini.
4. Miftahul Jannah, S.T., M.T selaku dosen pembimbing II atas bimbingan, waktu, dan ilmu pengetahuan yang telah diberikan selama proses penyusunan tugas akhir ini.
5. Dr. Erwin, S.T., M.T selaku dosen penguji I yang telah menguji dan memberikan saran konstruktif dalam penyusunan tugas akhir ini.
6. Shofiatul Ula, M.Eng selaku dosen penguji II yang telah menguji dan memberikan saran konstruktif dalam penyusunan tugas akhir ini.
7. Yusvardi Yusuf, S.T., M.T selaku Koordinator Tugas Akhir Jurusan Teknik Mesin Universitas Sultan Ageng Tirtayasa yang telah memberikan bimbingan dan arahan selama proses penyusunan tugas akhir ini.

8. Seluruh Staff dan jajaran dosen Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa atas segala kontribusi yang telah diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan studi dan menyusun tugas akhir ini.
9. Bapak Hilman dan Ibu Faridah Safitry selaku kedua orang tua atas kasih sayang, doa, dan dukungan yang tak pernah putus sehingga menjadi motivasi terbesar bagi penulis untuk menyelesaikan studi ini dengan baik.
10. Velisa Illona Rahmadhani, Zaura Ilmira Mahya, dan Muhammad Haikal Al Ghifari selaku adik dari penulis yang selalu memberikan semangat dan dukungan serta menjadi tempat untuk bermain hingga belajar bersama.
11. Intan Diah Permata Sari selaku pujaan hati yang selalu mendengarkan keluhan, memberikan perhatian dan motivasi kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik.
12. Sheikhan Azmi Riyanto, Narendra Putra Vendana, Ghifari Arifianto, Muhammad Farrel Ludira, dan Muhammad Naufal Hanif selaku rekan satu tim dalam Tugas Akhir yang bekerja sama dengan baik dan saling mendukung selama proses penyusunan tugas akhir ini.
13. Seluruh teman-teman Teknik Mesin angkatan kapal (2020) Universitas Sultan Ageng Tirtayasa yang saling membantu selama perkuliahan berlangsung.
14. Seluruh pihak yang terlibat dalam Tugas Akhir ini, baik secara praktik maupun secara teori.

Penulis menyadari masih banyak yang dapat dikembangkan pada laporan kerja praktik ini. Oleh karena itu penulis menerima setiap masukan dan kritik yang diberikan. Semoga laporan kerja praktik ini dapat memberikan manfaat baik bagi penulis sendiri dan para pembaca pada umumnya.

Cilegon, Oktober 2024

Penulis

ABSTRAK

Komposit Al-SiC telah menarik perhatian luas dalam industri karena kombinasi unik antara kekuatan tinggi, ketahanan suhu tinggi, dan ketahanan korosi yang dimilikinya. Sifat-sifat unggul ini menjadikan komposit Al-SiC sebagai kandidat yang sangat baik untuk aplikasi di berbagai sektor, seperti otomotif, *aerospace*, dan militer. Proses *thixoforming* menawarkan potensi untuk menghasilkan komposit Al-SiC dengan struktur mikro yang lebih halus dan seragam, sehingga meningkatkan sifat mekaniknya. Sementara itu, proses *artificial aging* memberikan mekanisme pengerasan tambahan melalui pengendapan presipitasi yang halus di dalam matriks logam. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi persen reduksi ketebalan melalui proses *rolling* terhadap sifat mekanik, struktur mikro, dan karakteristik metalografi komposit Al 6061-SiC yang telah mengalami proses *thixoforming* dan *artificial aging*. Dengan menggabungkan kedua proses tersebut, diharapkan dapat diperoleh komposit Al-SiC dengan kinerja yang optimal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai kekerasan dan ketangguhan tertinggi ada pada sampel dengan reduksi 4%, yaitu berturut-turut 0,034 J/mm², dan 50,6 HRB. Namun, reduksi yang berlebihan dapat menyebabkan munculnya kembali porositas dan retak, yang akan mengurangi kekuatan dari komposit. Penelitian ini memberikan pemahaman yang lebih baik mengenai pengaruh proses pembentukan dan perlakuan panas terhadap sifat komposit Al-SiC, sehingga dapat dimanfaatkan untuk pengembangan material komposit dengan kinerja yang lebih baik untuk aplikasi-aplikasi yang menuntut.

Kata Kunci: *Al-SiC, artificial aging, komposit, thixoforming, & reduksi ketebalan*

ABSTRACT

Al-SiC composites have attracted widespread attention in industry due to their unique combination of high strength, high temperature resistance, and corrosion resistance. These superior properties make Al-SiC composites excellent candidates for applications in various sectors, such as automotive, aerospace, and military. The thixoforming process offers the potential to produce Al-SiC composites with a finer and more uniform microstructure, thereby improving their mechanical properties. Meanwhile, the artificial aging process provides an additional hardening mechanism through the deposition of fine precipitates within the metal matrix. This study aims to evaluate the effect of thickness reduction percent variation through rolling process on the mechanical properties, microstructure, and metallographic characteristics of Al 6061-SiC composites that have undergone thixoforming and artificial aging processes. By combining the two processes, it is expected to obtain Al-SiC composites with optimal performance. The results show that the highest hardness and toughness values are in the sample with 4% reduction, which are 0.034 J/mm², and 50.6 HRB, respectively. However, excessive reduction can lead to the reappearance of porosity and cracks, which will reduce the strength of the composite. This research provides a better understanding of the effect of forming process and heat treatment on the properties of Al-SiC composites, which can be utilized for the development of composite materials with better performance for demanding applications.

Keywords: *Al-SiC, artificial aging, composite, thickness reduction, & thixoforming*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Material komposit adalah inovasi manufaktur yang memungkinkan kombinasi dua atau lebih bahan untuk menghasilkan produk yang memiliki karakteristik yang unggul dari masing-masing komponennya. Pembuatan material komposit dengan penguat serat gelas pendek untuk campuran semen telah dilakukan sejak 1930 dan material dengan matriks resin yang diperkuat serat sudah mulai dikembangkan sejak tahun 1940-an [1]. Karena memiliki sifat mekanik seperti kekuatan dan kekerasan yang baik, aluminium (Al) dan silikon karbida (SiC) adalah dua material yang sering digunakan dalam pembuatan komposit. Komposit Al-SiC memiliki keunggulan memberikan peningkatan resistansi suhu tinggi dan *thermal shock* [2]. Komposit Al-SiC banyak diaplikasikan sebagai material dasar komponen produk otomotif, militer, pesawat terbang (*aerospace*), dan lain-lain [3].

Proses *thixoforming*, yang mengkombinasikan proses pelelehan setengah padat (*Thixo*) dan pembentukan (*forming*), telah menjadi perhatian utama dalam pembentukan komposit *metal-matrix* karena kemampuannya untuk menghasilkan struktur material dengan distribusi partikel yang seragam dan karakteristik mekanik yang unggul. Proses ini memanfaatkan fase setengah padat dari material logam, yang memungkinkan manipulasi mikrostruktur dan sifat mekanik dari komposit Al 6061 dengan penguat SiC. Selain itu, proses *artificial aging* telah dikenal sebagai metode pengerasan untuk meningkatkan sifat mekanik dan termal dari material logam. Proses ini melibatkan pemanasan dan pendinginan kontrol yang disesuaikan untuk mencapai struktur kristal yang diinginkan dalam material.

Proses *thixoforming* akan menghasilkan kualitas bahan yang lebih baik dari produk konvensional karena struktur mikro yang dihasilkan adalah bulat. Struktur mikro bulat memberikan kemampuan aliran dalam *billet* selama

pembentukan. Selain itu, sifat mekanik produk akhir juga ditingkatkan dengan struktur mikro yang halus dan seragam [4].

Meskipun banyak penelitian telah dilakukan tentang komposit Al 6061 dengan penguat SiC, belum ada banyak penelitian yang mengeksplorasi pengaruh reduksi ketebalan terhadap karakteristik material dari komposit tersebut, khususnya setelah mengalami proses *thixoforming* dan *artificial aging*. Diberikannya reduksi ketebalan pada komposit hasil *thixoforming* adalah untuk meningkatkan kekuatan dan ketahanan material. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis bagaimana variasi persen reduksi ketebalan dengan menggunakan metode *rolling*, dapat mempengaruhi sifat mekanik, struktur mikro, dan karakteristik metalografi dari komposit Al 6061 dengan penguat SiC, serta bagaimana pengaruh dari kombinasi proses *artificial aging* terhadap karakteristik material tersebut. Dengan memperoleh pemahaman yang lebih mendalam tentang bagaimana penurunan persen terhadap karakteristik komposit Al 6061 dengan penguat SiC mempengaruhi sifatnya, penelitian ini diharapkan dapat membantu mengembangkan teknologi material yang lebih efisien dan unggul secara mekanik. Selain itu, penelitian ini akan memperluas pengetahuan pembaca tentang pembentukan logam dan pilihan material dalam industri manufaktur.

1.2 Perumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang dapat dirumuskan dan menjadi fokus dalam penelitian ini di antaranya:

1. Bagaimana karakteristik dari material komposit Al 6061 berpenguat SiC hasil dari proses *thixoforming* dan *artificial aging*?
2. Bagaimana pengaruh persen reduksi terhadap karakteristik mekanik dari komposit Al 6061 dengan penguat SiC hasil proses *thixoforming*?
3. Bagaimana hubungan antara sifat mekanik dengan persen reduksi dan distribusi penguat pada material komposit Al 6061 berpenguat SiC?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah, didapatkan beberapa tujuan yang menjadi pedoman penelitian sebagai berikut:

1. Menganalisis karakteristik dari material komposit Al 6061 berpenguat SiC hasil dari proses *thixoforming* dan *artificial aging*.
2. Menganalisis pengaruh persen reduksi terhadap karakteristik mekanik menggunakan beberapa pengujian seperti: uji impak, uji kekerasan, dan dan pengamatan metalografi pada sampel komposit Al 6061 dengan penguat SiC hasil proses *thixoforming* dan *artificial aging*.
3. Menganalisis hubungan antara sifat mekanik dengan persen reduksi dan distribusi penguat pada material komposit Al 6061 berpenguat SiC.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan bisa diperoleh dari penelitian dan penyusunan skripsi ini di antaranya:

1. Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, dapat mempelajari lebih lanjut tentang bagaimana persen reduksi mempengaruhi karakteristik material, atau memperluas penelitian ini ke komposit lainnya atau bahkan ke material non-logam.
2. Produsen manufaktur, dapat mengoptimalkan parameter proses pembuatan, termasuk persen reduksi, untuk menghasilkan produk dengan kualitas produk dan efisiensi yang lebih tinggi.
3. Mahasiswa, dapat meningkatkan pemahaman dan pengetahuan tentang rekayasa material dan berkontribusi pada literatur akademik dalam disiplin ilmu tertentu.
4. Penelitian selanjutnya, dapat membantu industri manufaktur mengembangkan teknologi baru, terutama dalam pembuatan logam dan penggunaan material komposit, khususnya komposit Al 6061 berpenguat SiC.

1.5 Metodologi Penelitian

Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini yaitu eksperimental sesuai dengan parameter-parameter yang diujikan. Diawali dengan studi literatur untuk memahami landasan teoritis dan penelitian terdahulu terkait dengan: komposit Al 6061 dengan penguat SiC, proses *thixoforming*, *artificial aging*, pengaruh persen reduksi terhadap karakteristik material, pembuatan sampel komposit, dan pengujian sampel komposit dengan: uji kekerasan, uji impak, dan pengamatan metalografi.

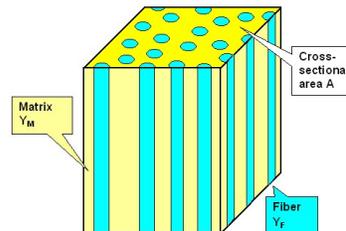
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Komposit

2.1.1 Pengertian Komposit

Komposit adalah suatu jenis bahan baru hasil rekayasa yang terdiri dari dua atau lebih bahan dimana sifat masing-masing bahan berbeda satu sama lainnya baik itu sifat kimia maupun fisiknya dan tetap terpisah dalam hasil akhir bahan tersebut (bahan komposit). Dengan adanya perbedaan dari material penyusunnya maka komposit antar material harus berikatan dengan kuat, sehingga perlu adanya penambahan *wetting agent* [5]. *Wetting agent* yang umum digunakan di antaranya: surfaktan, *coupling agent*, polimer, dan pelarut. Dalam komposit, komponen-komponen tersebut tetap terpisah dan mempertahankan identitasnya, tetapi bekerja bersama untuk mencapai kinerja yang lebih baik. Komponen utama dalam komposit biasanya disebut matriks dan pengisi atau penguat. Ilustrasi dari susunan komposit ini dapat dilihat pada gambar 2.1 berikut,



Gambar 2.1 Ilustrasi Komposit

(Sumber: tf.uni-kiel.de)

. Komposit merupakan gabungan bahan utama (matriks) dan jenis penguat (*reinforcement*) untuk mendapatkan gabungan sifat dari 2 bahan tersebut [6]. Matriks bertindak sebagai "pengikat" yang menyatukan komponen-komponen komposit dan mentransfer beban di antara mereka. Bahan matriks dapat berupa polimer, keramik, logam atau karbon [7].

Matriks mempunyai fungsi sebagai mentransfer tegangan ke serat, membentuk ikatan koheren permukaan matrik atau serat, melindungi serat, memisahkan serat, melepas ikatan, dan stabil setelah proses manufaktur. Pengisi atau penguat (*reinforcement*) adalah komponen dalam komposit yang memberikan sifat-sifat khusus seperti kekuatan, kekakuan, atau ketahanan. Pengisi atau penguat ini biasanya terdiri dari dua jenis bahan yaitu: serat dan partikel. Bahan yang biasa digunakan bisa terdiri dari bahan sintetis hingga bahan alam yang ramah lingkungan. Seiring dengan adanya berbagai inovasi yang dilakukan dalam bidang material, serat alam kembali dikembangkan. Hal ini dikarenakan serat alam memiliki kelebihan yaitu memiliki sifat fisik yang bagus, kandungannya melimpah di alam, ramah lingkungan, dan biaya produksi yang lebih rendah [8].

2.1.2 Klasifikasi Material Komposit

Aplikasi material komposit yang digunakan pada berbagai bidang terdiri dari beberapa klasifikasi. Menurut Nayiroh (2013), material komposit dapat diklasifikasikan berdasarkan matriksnya, dimana terdapat tiga kelompok besar, yaitu:

1. Komposit matriks logam (*metal matrix composite*) (MMC). Kelompok komposit ini mencakup berbagai macam bahan yang dapat diidentifikasi berdasarkan logam dasarnya (seperti aluminium, tembaga, atau titanium); fase penguatnya (seperti serat, atau partikel); atau metode pembuatannya (seperti metalurgi serbuk, ikatan difusi, infiltrasi, atau pengecoran) [9].
2. Komposit matriks keramik (*ceramic matrix composite*) (CMC). Komposit dengan matriks utama berbahan dasar keramik (seperti: silikon karbida, alumina, dan zirconia) ini dikenal memiliki beberapa sifat seperti: kepadatan rendah, kelembaman kimiawi, dan kekuatan serta stabilitas yang relatif baik pada suhu tinggi [10].
3. Komposit matriks polimer (*polymer matrix composite*) (PMC). Merupakan material komposit yang terbuat dari polimer organik dengan penguat serat dikenal sebagai material matriks polimer. Biasanya,

kekuatan dan modulus serat secara signifikan lebih tinggi daripada bahan matriks pada umumnya [11].

2.1.3 Aluminium Matrix Composite (AMC)

Aluminium Matrix Composite atau jika diartikan adalah komposit matriks aluminium (AMC), adalah salah satu jenis komposit yang memiliki aluminium sebagai matriksnya. Aluminium sebagai bahan matriks memiliki banyak keuntungan, termasuk kekakuan tinggi, ketahanan lelah yang baik, dan biaya pembuatan yang rendah. Variasi dalam komposit aluminium telah diteliti selama bertahun-tahun. Bahan penguat dalam komposit ini terdiri dari berbagai macam, diantaranya: serat kontinu, serat pendek, *whiskers*, partikulat, dan monofilamen dan multifilamen.

AMC ini merupakan salah satu dari MMC yang banyak berkembang di zaman sekarang. Aplikasi dari AMC sudah diterapkan di berbagai sektor seperti: penerbangan, otomotif, permesinan, militer, hingga olahraga. AMC memiliki popularitas yang luas di sektor transportasi karena memberi efek kebisingan yang lebih rendah dan konsumsi bahan bakar yang lebih rendah dibandingkan bahan lain [12].

2.2 Material Aluminium Matrix Composite

Dalam penelitian ini, digunakan beberapa material sebagai bahan pembuatan AMC yang terdiri dari: aluminium 6061 sebagai matriks, silikon karbida (SiC) sebagai penguat, dan magnesium sebagai *wetting agent*.

2.2.1 Aluminium 6061

Aluminium memiliki banyak jenisnya, terdapat lebih dari 300 komposisi yang ditambahkan pada paduan aluminium. Setiap jenis paduan aluminium mengandung paling sedikit dua unsur kimia yang berfungsi untuk mempengaruhi sifat mekanik daripada paduan aluminium tersebut. Pada penelitian yang akan dilakukan ini, digunakan aluminium 6061. Material jenis 6XXX banyak diaplikasikan dalam bidang otomotif dan alat konstruksi, dikarenakan material jenis ini memiliki ketahanan korosi, konduktivitas termal, dan konduktivitas elektrik yang cukup baik.

Salah satu paduan aluminium yang paling umum digunakan dalam industri adalah aluminium 6061, yang terdiri dari aluminium, magnesium, dan silikon sebagai komponen utama, dengan sedikit unsur tambahan seperti tembaga, seng, kromium, dan mangan untuk meningkatkan sifatnya. Paduan ini memiliki sifat mekanik yang baik, seperti kekuatan tarik, kekerasan, dan modulus elastisitas, yang membuatnya cocok untuk berbagai aplikasi, seperti konstruksi, aeronautika, dan industri otomotif [13]. Al 6061 memiliki kekuatan dan kekakuan yang sangat baik. Sifat mekaniknya ini pun bisa ditingkatkan kembali melalui proses perlakuan panas, contohnya: pemanasan dan pendinginan yang sesuai.

Aluminium 6061 ini, tersusun atas beberapa material kimia yang disatukan supaya mendapatkan kombinasi yang menghasilkan kekuatan, kekakuan dan ketahanan korosi yang baik. Berdasarkan *data sheet* yang dikeluarkan oleh Thyssenkrupp, paduan aluminium 6061 memiliki komposisi kimia yang dapat dilihat pada gambar 2.6 berikut,

Tabel 2.1 Komposisi Kimia Aluminium 6061

Chemical composition in %

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.40–0.8	≤ 0.70	0.10–0.40	≤ 0.15	0.8–1.2	0.04–0.35	≤ 0.25	≤ 0.15	Rest

Others^a: Each: max. 0.05 %

Total^b: max. 0.15 %

^a „Others“ includes listed elements for which no specific limit is shown as well as unlisted metallic elements. The producer may analyze samples for trace elements not specified in the registration or specification. However, such analysis is not required and may not cover all metallic „Others“ elements. Should any analysis by the producer or the purchaser establish that an „Others“ element exceeds the limit of „Each“ or that the aggregate of several „Others“ elements exceeds the limit of „Total“, the material shall be considered non-conforming.

^b The sum of those „Others“ metallic elements 0.010 % or more each, expressed to the second decimal place before determining the sum.

(Sumber: ucpcdn.thyssenkrupp.com)

Dapat dilihat pada gambar di atas, komposisi kimia yang terbesar setelah aluminium dalam Al 6061 adalah magnesium. Alasan banyaknya komposisi magnesium yang diberikan dalam paduan aluminium adalah karena magnesium memiliki beberapa sifat mekanik yang menguntungkan.

1. Kekuatan dan kekakuan, magnesium meningkatkan kekuatan dan kekakuan paduan aluminium. Aluminium 6061 menjadi lebih kuat dan lebih kaku, sehingga cocok untuk aplikasi yang membutuhkan komponen struktural yang kuat.
2. Pengerasan panas, magnesium juga meningkatkan kemampuan paduan untuk mengalami pengerasan panas. Proses pengerasan panas

meningkatkan sifat mekanik paduan, seperti kekuatan dan kekerasan, membuatnya lebih tahan terhadap beban mekanis.

3. Ketahanan korosi, Magnesium juga dapat meningkatkan ketahanan paduan aluminium. Aluminium 6061 yang diperkaya magnesium sangat tahan korosi, terutama di udara laut atau lingkungan industri.
4. Pembentukan dan pengecoran, Kemampuan paduan untuk pembentukan dan pengecoran dapat ditingkatkan dengan magnesium, yang memungkinkan pembuatan komponen dengan kompleksitas geometri yang tinggi dan detail yang tepat.

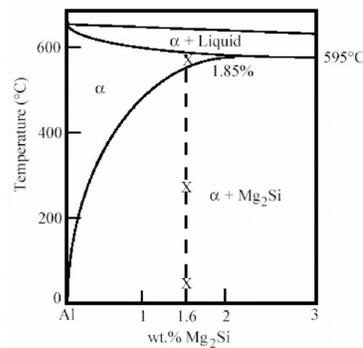
Aluminium 6061 ini banyak digunakan di berbagai bidang dikarenakan memiliki sifat mekanik yang baik, di antaranya: kekerasan, kekuatan tarik, modulus young, dan elongasi. Berikut telah dilakukan penelitian untuk membandingkan sifat mekanik yang telah disebutkan antara paduan Al 6061 yang dibuat dari hasil *cast*, dengan komposit Al- TiB_{2p}, diperoleh data yang dapat dilihat pada tabel 2.2 berikut [14],

Tabel 2.2 Perbandingan Sifat Mekanik Al 6061

Material	Hardness(BHN)	Tensile Strength(MPa)	Young's Modulus(GPa)	% Elongation
Al-6061 (as cast)	62.8	134.8	79.8	8.0
Al-TiB _{2p}	88.6	173.6	94.2	7.0

(Sumber: Christy *et al.*, 2010)

Selain sifat mekanik, hal yang juga perlu diketahui adalah sifat termal. Hal ini dikarenakan setiap material pasti memiliki karakteristik termalnya masing-masing. Karakterisasi termal suatu bahan melibatkan penentuan sifat termal seperti konduktivitas termal, difusivitas termal, ekspansifitas termal, dan kapasitas panas spesifik untuk memahami bagaimana bahan tersebut merespons perubahan suhu [15]. Diagram fasa dari aluminium 6061 dapat dilihat pada gambar 2.2 berikut,



Gambar 2.2 Diagram Fasa Al 6061

(Sumber: researchgate.net)

2.2.2 Silikon Karbida (SiC)

Silikon karbida (SiC) adalah salah satu material keramik yang paling populer karena berbagai karakteristiknya yang luar biasa, yang membuatnya sangat diminati dalam berbagai aplikasi industri. Sifatnya yang kuat disebabkan karena SiC memiliki komposisi kimia yang terdiri dari silikon (Si) dan karbon (C) dengan perbandingan 1:1. Tidak hanya itu, bergantung pada metode pembuatannya, SiC ini memiliki struktur kristal heksagonal atau kubik. Dengan struktur tersebut, SiC memiliki kestabilan dimensi yang baik, serta ketahanan terhadap perubahan suhu. Keunggulan-keunggulan lainnya yang menyebabkan SiC banyak diaplikasikan pada berbagai bidang khususnya yang menyangkut suhu tinggi, kecepatan tinggi, frekuensi tinggi, dan berdaya tinggi, di antaranya adalah: celah pita energi yang lebar, konduktivitas termal yang tinggi, kecepatan elektron jenuh tinggi, dan medan listrik berdaya rusak tinggi.

Sifat mekanik dari SiC juga memiliki keistimewaan. Menurut penelitian sejauh ini, SiC merupakan salah satu material terkeras. SiC cenderung mempertahankan kekerasan dan elastisitas, meskipun pada suhu yang sangat tinggi. Sifat mekanik dari SiC dapat dilihat pada tabel 2.3 berikut [16],

Tabel 2.3 Sifat Mekanik Silikon Karbida (SiC)**Table 2.6** Major mechanical and thermal properties of SiC and Si at room temperature [30, 45].

Properties	4H- or 6H-SiC	Si
Density (g cm^{-3})	3.21	2.33
Young's modulus (GPa)	390–690	160
Fracture strength (GPa)	21	7
Poisson's ratio	0.21	0.22
Elastic constant (GPa)		
c_{11}	501	166
c_{12}	111	64
c_{13}	52	—
c_{33}	553	—
c_{44}	163	80
Specific heat ($\text{J g}^{-1} \text{K}^{-1}$)	0.69	0.7
Thermal conductivity ($\text{W cm}^{-1} \text{K}^{-1}$)	3.3–4.9	1.4–1.5

(Sumber: Kimoto & Cooper, 2014)

Kekerasan dan modulus Young (380-700 GPa) dari SiC jauh lebih tinggi daripada Si, sedangkan rasio Poisson (0,21) dari SiC sangat mirip dengan semikonduktor lainnya [17]. Sintesis kimia, deposisi uap kimia (CVD), dan pembentukan sintetis adalah beberapa metode pembuatan silikon karbida, yang dapat menghasilkan material dengan berbagai struktur dan sifat sesuai dengan kebutuhan aplikasi tertentu. Silikon karbida digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti sebagai substrat dan semikonduktor dalam industri elektronik; sebagai bahan untuk alat potong dan penggiling; dan sebagai bahan abrasif dan lapisan pelindung dalam industri manufaktur.

2.2.3 Magnesium

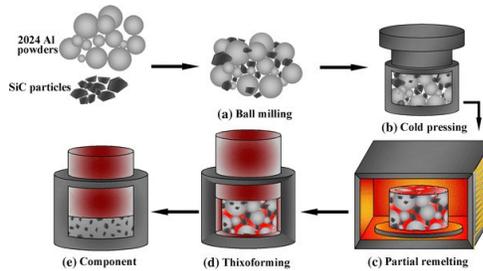
Magnesium (Mg) sering digunakan bersama dengan bahan lain untuk membuat material yang tangguh dan kuat. Ini dilakukan dalam industri pengecoran material komposit (MMC) untuk meningkatkan *wettability* atau kemampuan basah partikel penguat, sehingga matriks logam dapat mengikat partikel penguat dengan baik dan memastikan persebarannya merata. Magnesium dalam komposit matriks paduan aluminium meningkatkan pembasahan dengan mengais oksigen dari permukaan dispersoid, menipiskan lapisan gas, dan meningkatkan pembasahan yang dibantu oleh reaksi [18].

2.3 Metode Pembuatan Material

2.3.1 *Thixoforming*

Thixoforming, singkatan dari "*Thixotropic Forming*," adalah sebuah proses manufaktur yang melibatkan pemrosesan bahan dalam kondisi setengah padat yang disebut juga sebagai "kondisi pasta" atau "bahan tiksotropi." *Thixoforming* adalah proses pembentukan yang mengeksploitasi perilaku reologi logam selama rentang suhu solidus dan liquidus. Metode ini ditemukan pertama kali oleh Fleming pada tahun 1971. Tujuan dari pembentukan pada fasa semi-padat adalah untuk menciptakan struktur *non-dendritic* atau stuktur yang bundar, sehingga dapat menghasilkan sifat komponen yang lebih baik dibandingkan dengan komponen yang dibentuk dengan pengecoran konvensional [19]. *Thixoforming* umumnya digunakan dalam industri otomotif dan manufaktur untuk memproduksi komponen logam yang ringan dan kuat. Langkah-langkah *thixoforming* adalah *billet* bahan baku dengan struktur mikro bulat yang disiapkan secara khusus, dipotong memanjang, dipanaskan ke dalam suhu padat-cair untuk mencapai fraksi padat yang sesuai, kemudian produk akhir dibentuk dengan berbagai metode [20]. Proses ini memungkinkan material untuk diproses dengan cara mirip dengan material plastik, yaitu dibentuk, diekstrusi, atau ditekan menjadi bentuk akhir yang diinginkan. Metode *thixoforming* ini menawarkan opsi desain yang lebih luas yang menarik orang-orang di area ini untuk terus meningkatkannya [21].

Viskositas adalah parameter utama untuk reologi dalam pemrosesan *semi-solid*. Viskositas menunjukkan kemampuan bahan semi padat dalam mengisi cetakan, perilaku aliran dan gaya yang diperlukan untuk deformasi [22]. Contoh aplikasi termasuk pembuatan komponen otomotif, perangkat elektronik, alat medis, militer, *aviation (aerospace)*, dan lain-lain. Ilustrasi dari proses *thixoforming* dapat dilihat pada gambar 2.3 berikut,

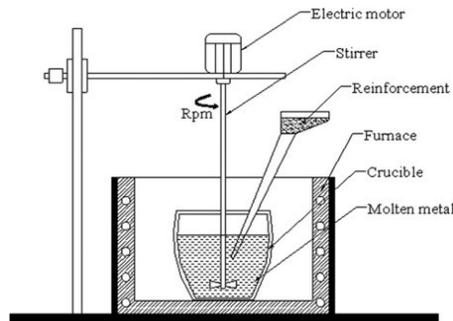


Gambar 2.3 Proses *Thixoforming*

(Sumber: researchgate.net)

2.3.2 *Stir Casting*

Stir casting adalah teknik pembuatan material komposit, khususnya komposit matriks logam (MMC), di mana partikel penguat dicampur secara mekanis dengan logam cair. Teknik ini berupaya menciptakan material baru dengan atribut yang lebih unggul daripada logam dasar, seperti peningkatan kekuatan, ketahanan terhadap suhu tinggi, dan ketahanan aus yang lebih baik. Paduan cair yang mengandung partikel keramik dapat digunakan untuk *die casting*, pengecoran cetakan permanen, atau pengecoran pasir. Pengecoran aduk dapat menghasilkan komposit dengan penguat hingga 30% volume. Ilustrasi proses *stir casting* dapat dilihat pada gambar 2.4 berikut,



Gambar 2.4 Proses *Stir Casting*

(Sumber: ScienceDirect.com)

Terdapat beberapa faktor penting yang perlu diperhatikan dalam proses *stir casting*. Beberapa faktor tersebut di antaranya:

1. Kecepatan pengadukan, kecepatan putaran *impeller* memiliki dampak langsung pada energi yang diberikan ke sistem, serta kecepatan

penyebaran partikel penguat dalam matriks logam. Kecepatan yang terlalu lambat menghasilkan dispersi partikel yang tidak merata, sementara kecepatan yang terlalu cepat menyebabkan kerusakan partikel dan peningkatan suhu yang berlebihan.

2. Waktu pengadukan, lamanya waktu partikel penguat berinteraksi dengan logam cair ditentukan oleh durasi pengadukan. Waktu yang terlalu singkat dapat mengakibatkan distribusi partikel yang tidak teratur, sementara waktu yang terlalu lama dapat menyebabkan oksidasi dan hilangnya komponen paduan.
3. Ukuran partikel, ukuran partikel penguat memiliki efek yang cukup besar pada area permukaan kontak antara partikel dan matriks. Partikel yang lebih halus memiliki luas permukaan yang lebih besar, yang meningkatkan kemungkinan koneksi antarmuka yang lebih kuat. Namun, partikel kecil dapat meningkatkan viskositas cairan, sehingga sulit untuk diaduk.
4. Bentuk partikel, hal ini juga mempengaruhi dispersibilitas dan kekuatan ikatan antar muka. Partikel berbentuk bola lebih mudah didistribusikan, sedangkan partikel yang tidak beraturan dapat menghasilkan kekuatan yang lebih besar.

2.4 Artificial aging

Artificial aging adalah proses pemanasan kembali larutan padat jenuh ke suatu temperatur di bawah garis solvus dan dibiarkan pada temperatur tersebut selama jangka waktu tertentu. *Artificial aging* merupakan salah satu metode peningkatan kekuatan paduan aluminium [23]. Dalam proses ini, material dipanaskan pada suhu tertentu untuk waktu tertentu, lalu didinginkan dengan cepat untuk mengunci struktur mikro yang diinginkan. Setelah itu, bahan dikenakan pada suhu yang lebih rendah untuk proses penuaan, yang memperbaiki dan memperkuat struktur mikrologam. Ilustrasi proses *artificial aging* dapat dilihat pada gambar 2.5 berikut,



Gambar 2.5 Contoh *Artificial Aging* pada Logam

(Sumber: metalsupermarkets.co.uk)

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, diperoleh hasil uji kekerasan yang membuktikan bahwa apabila *artificial aging* dilakukan pada suhu yang tepat, maka semakin lama waktu *artificial aging*, akan semakin tinggi pula tingkat kekerasan suatu material.

Tabel 2.4 Nilai Kekerasan Material Uji setelah Melalui *Artificial Aging*

Waktu penuaan (jam)	Kekerasan (HV)		
	Al 10Sn 0Cu	Al 10Sn 10Cu	Al 10Sn 20Cu
1	26,3	47,36	68,71
5	32,66	65,12	81,8
10	53,84	104,9	106

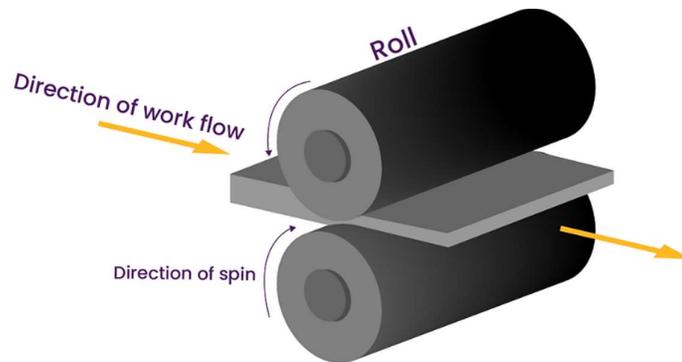
(Sumber: Prayitno dan Apriandini, 2019)

Artificial aging merupakan salah satu metode *treatment* pada aluminium yang bertujuan untuk mempercepat laju pertumbuhan *presipitat*, sehingga sifat mekanik dari aluminium dapat disesuaikan dan dicapai. Sifat mekanik dari suatu material akan sangat terpengaruh oleh temperatur dan waktu tahan dari proses *artificial aging*.

2.5 Reduksi Ketebalan

Pada penelitian ini akan dilakukan prosedur atau proses pengurangan ketebalan atau reduksi terhadap ketebalan sampel komposit yang telah dibuat. Deformasi logam pada suhu ruang diakomodasi oleh lapisan atom-atom yang bergeser dari satu butiran kristal ke butiran kristal lainnya pada logam [24]. Ketika pergeseran terjadi, butiran logam menjadi terdistorsi, lapisan-lapisan

atom saling berkait, dan ada peningkatan tegangan pada daerah kecil di dislokasi atom dalam butir. Peristiwa ini disebut juga dengan *work hardening*. Pengurangan ketebalan material komposit umumnya dilakukan dengan cara *rolling*. *Rolling* merupakan salah satu metode pembentukan logam yang dilakukan dengan menggilas spesimen di antara dua buah alat *roll* atau lebih dengan arah yang berlawanan. Ilustrasi dari proses *rolling* dapat dilihat pada gambar 2.6 berikut,



Gambar 2.6 Proses *Rolling*

(Sumber: blog.imajin.id)

Terdapat dua jenis metode *rolling* yang umum digunakan dalam proses pembentukan logam. Kedua jenis tersebut di antaranya adalah:

1. *Hot rolling*, merupakan proses pembuatan logam dengan menggunakan suhu yang tinggi, dimana logam akan dipanaskan sebelum diletakkan di antara rol. Suhu yang digunakan dalam *hot rolling* biasanya antara 800°C hingga 1200°C.
2. *Cold rolling*, merupakan proses pembuatan logam dengan menggunakan suhu yang relatif rendah. suhu yang digunakan dalam *cold rolling* umumnya antara 20°C hingga 200°C.

Proses *roll* ini dilakukan untuk mengubah susunan struktur mikro dari sampel komposit untuk memperkuat sifat mekanik. Dengan dilakukannya persen reduksi terhadap ketebalan komposit, diharapkan akan menyatukan struktur mikro yang masih renggang. Ukuran dari mikrostruktur material dapat memberikan pengaruh kuat terhadap sifat mekanik yang disebabkan adanya pembatas terhadap mekanisme deformasi tertentu [25]. Selain adanya

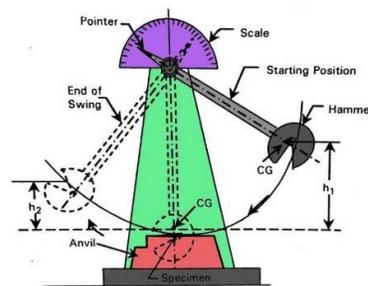
keuntungan dari proses *rolling*, terdapat juga kerugian yang cukup fatal pada material. Kerugian proses *rolling* salah satunya adalah membentuk porositas yang dapat memicu terjadinya *crack*.

2.6 Pengujian Material

2.6.1 Pengujian merusak (*destructive test*)

Pengujian destruktif atau merusak adalah teknik di mana sampel akan dibuat gagal dengan cara yang tidak terkendali untuk menguji ketahanannya dan menemukan titik kegagalan, menentukan kelemahan desain dan masa pakai [26]. Pengujian merusak dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui bagaimana material akan bereaksi terhadap beban mekanik dan untuk menemukan titik kegagalan atau deformasi plastis pada material tersebut. Beberapa *destructive test* yang dilakukan dalam penelitian ini antara lain:

1. Uji impact, adalah pengujian mekanik yang menilai ketahanan suatu material terhadap beban benturan tiba-tiba. Pengujian benturan menentukan kekuatan material terhadap ketahanan guncangan, seperti kerapuhan yang disebabkan oleh perlakuan panas atau kerapuhan produk pengecoran, dan pengaruh bentuk produk [27]. Ilustrasi uji impact dapat dilihat pada gambar 2.7 berikut,

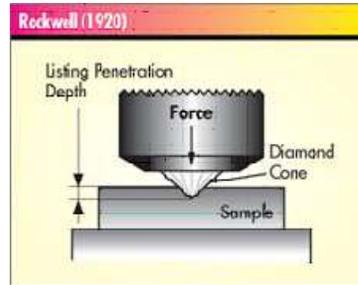


Gambar 2.7 Uji Impact

(Sumber: anakteknik.co.id)

2. Uji kekerasan, merupakan metode analisis material yang bertujuan untuk menentukan ketahanan permukaan suatu material terhadap deformasi plastis lokal akibat penetrasi *indenter* yang lebih keras. Pengujian kekerasan pada material mengukur ketahanan material terhadap

deformasi melalui tekanan, penginderaan non-kontak, atau *indenter* berinstrumen [28]. Ilustrasi pengujian kekerasan dapat dilihat pada gambar 2.8 berikut,



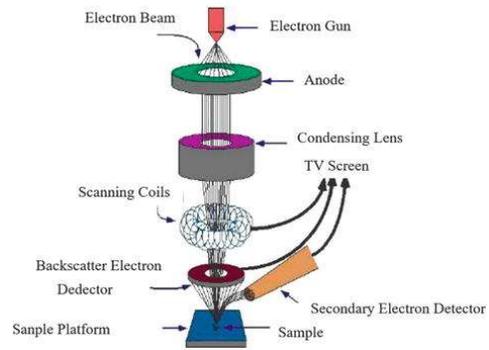
Gambar 2.8 Uji Kekerasan

(Sumber: alatuji.com)

2.6.2 Analisis Metalografi

Metalografi adalah cabang ilmu material yang berkonsentrasi pada analisis struktur mikro logam dan gabungannya. Analisis metalografi adalah alat deteksi yang digunakan untuk mengidentifikasi logam dan paduan, mengevaluasi pemrosesan paduan, memeriksa berbagai fase, dan menemukan ketidaksempurnaan pada bahan [29]. Terdapat beberapa alat yang umum digunakan dalam analisis metalografi, antara lain: mikroskop optik, *scanning electron microscope* (SEM), dan *transmission electron microscope* (TEM). Penelitian ini akan berfokus pada penggunaan SEM sebagai alat analisis metalografi material.

Sebuah teknik mikroskopi elektron yang digunakan secara luas dalam analisis material, khususnya dalam bidang metalografi, adalah *scanning electron microscopy* (SEM). SEM adalah instrumen serbaguna yang digunakan untuk analisis mikrostruktural, memberikan informasi mengenai fitur topografi, morfologi, distribusi fasa, perbedaan komposisi, struktur kristal, dan cacat listrik pada material [30]. Prinsip kerja SEM didasarkan pada interaksi antara sinar elektron berenergi tinggi dengan permukaan sampel. Ilustrasi dari penggunaan SEM dapat dilihat pada gambar 2.9 berikut,



Gambar 2.9 *Scanning Electron Microscope*
(Sumber: intechopen.com)

2.7 Penelitian Terdahulu

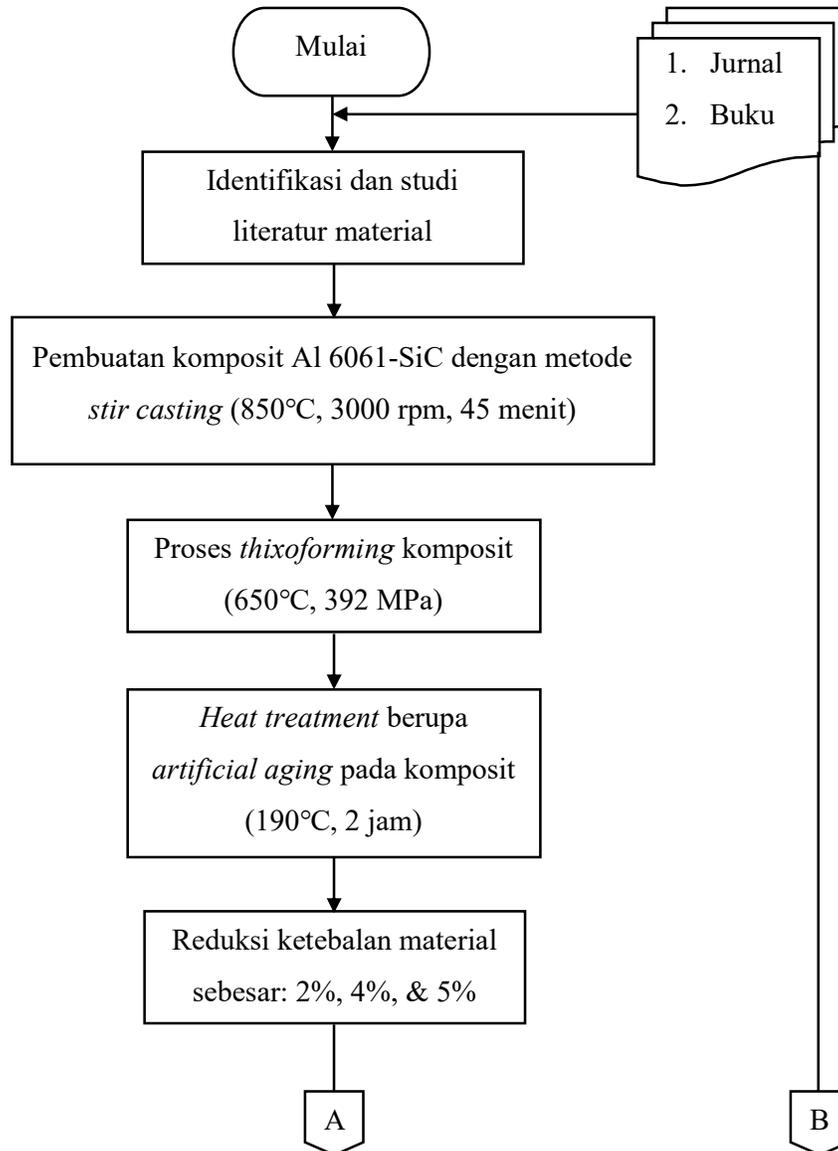
No.	Nama Penulis	Tahun	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
1.	Dutkiewicz <i>et al.</i>	2009	<i>Thixoforming Technology of High Carbon X210CrW12 Steel</i>	Penelitian ini melakukan pembentukan baja paduan X210CrW12 menggunakan proses <i>thixoforming</i> . Sampel hasil proses <i>thixoforming</i> memiliki struktur mikro bulat yang tertanam dalam eutektik, yang diidentifikasi sebagai austenit dengan difraksi sinar-X dan dikonfirmasi dengan difraksi elektron.
2.	Ali <i>et al.</i>	2022	<i>Mechanical Behaviour and Morphology of Thixoformed Aluminium Alloy Reinforced by Graphene.</i>	Berdasarkan hasil penelitian ini, proses <i>thixoforming</i> bermanfaat untuk distribusi yang homogen GNP, menghasilkan peningkatan kekuatan luluh dan kekuatan tarik ultimat. Struktur GNP yang berkerut dan ikatan yang efektif dapat dikaitkan dengan perilaku ini.

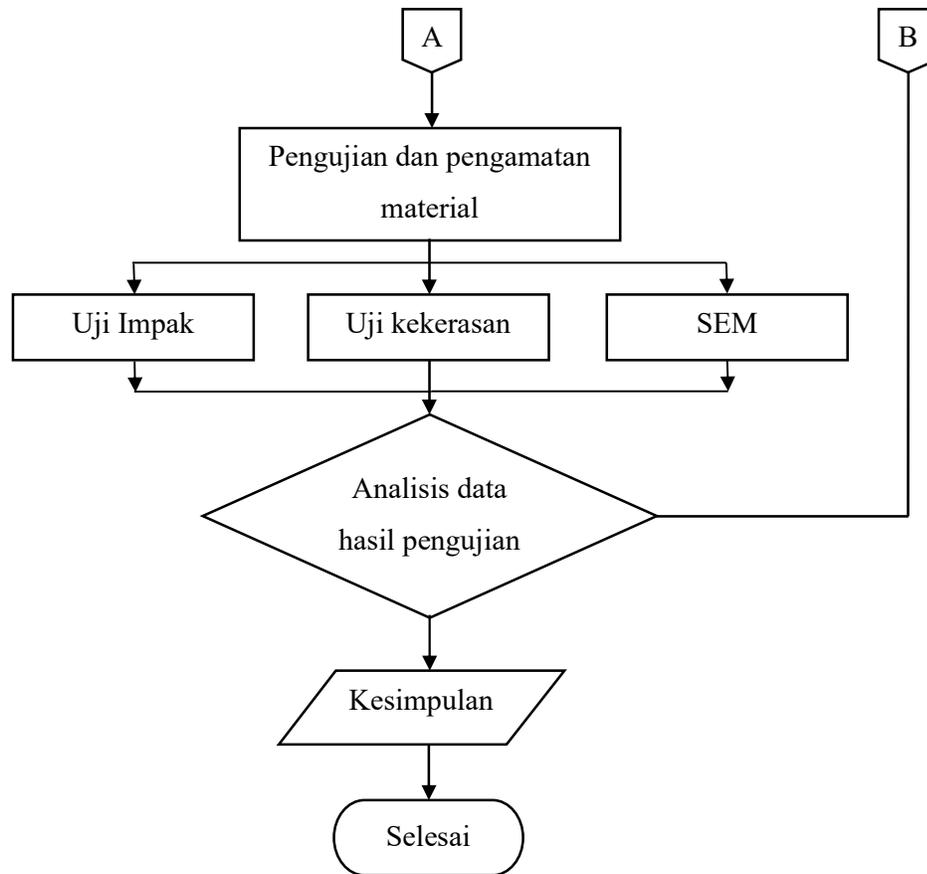
No.	Nama Penulis	Tahun	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
3.	Mulyanti	2011	Pengaruh Temperatur Proses <i>Aging</i> Terhadap Karakteristik Material Komposit Logam Al-SiC Hasil <i>Stircasting</i> .	Berdasarkan hasil penelitian ini, proses perlakuan panas akan meningkatkan kekuatan tarik dan menurunkan nilai elongasi. Pemanasan dengan temperatur 200°C meningkatkan kekerasan komposit Al-SiC dibandingkan dengan temperatur 100°C. Selain itu pengamatan struktur mikro menunjukkan bahwa distribusi partikel penguat akan terdispersi secara homogen dan peningkatan jumlah pengendapan partikel lebih besar pada material dengan pemanasan 200°C.
4.	K. A. Gogaev <i>et al.</i>	2018	<i>The Influence of Deformation Modes on The Structure and Properties of Al-Mg-X Powder Composites. I. The Influence of Rolling Conditions on The Mechanical Properties of Aluminium Powder Ribbons Strengthened with SiC Nanoparticles.</i>	Penggulungan sebagai langkah pemrosesan deformasi tambahan meningkatkan struktur komposit dengan menghaluskan aglomerat SiC, penggulungan asimetris menjadi teknik pengerasan regangan yang lebih efektif untuk komposit serbuk aluminium. Pengerasan kompleks pita serbuk aluminium memungkinkan peningkatan kekuatan lebih dari dua kali lipat tanpa pengurangan karakteristik elastis dan parameter ulet.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini diawali dengan pembuatan material komposit dengan proses *stir casting*, *thixoforming*, *artificial aging*, dan *rolling*, kemudian diakhiri dengan *destructive test* dan pengamatan metalografi. Adapun diagram alir penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.1 berikut,





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

Adapun penjelasan dari setiap proses pada diagram alir di atas adalah sebagai berikut:

1. Identifikasi dan studi literatur material bahan

Pada penelitian ini terdapat 2 material sebagai bahan utama komposit yaitu: Al 6061 dan SiC. Sebelum melakukan pembuatan dan pengujian sampel, dilakukan identifikasi dan studi berbagai literatur, mulai dari material hingga proses pembentukan sampel.

2. Pembuatan material komposit

Terdapat 2 metode yang digunakan dalam pembuatan komposit ini, yaitu: *stir casting* dan *thixoforming*. Pembuatan material diawali dengan proses *stir casting* untuk menyatukan semua bahan, kemudian dilanjut ke proses *thixoforming* untuk pembentukan lanjutan. Proses *stir casting* dilakukan dengan melebur Al 6061 dan SiC dengan tambahan magnesium yang

berperan sebagai *wetting agent*. Kecepatan adukan yang digunakan dalam *stir casting* adalah 3000 rpm. Proses *thixoforming* dilakukan ke material baru yang dihasilkan dari pencampuran pada *stir casting*. Proses *thixoforming* dilakukan pada suhu 650°C dengan tekanan yang diberikan sebesar 392 MPa.

3. *Heat treatment* material

Material yang telah selesai dibuat, diberikan *heat treatment* berupa *artificial aging* yang bertujuan untuk mempercepat pertumbuhan presipitat pada material komposit. Proses *artificial aging* ini dilakukan pada suhu 190°C selama 2 jam.

4. Reduksi ketebalan material

Material komposit yang telah dibentuk dan diberikan *heat treatment*, direduksi ketebalannya dengan metode *rolling*. Reduksi ketebalan dengan *rolling* ini bertujuan untuk membuat partikel-partikel bahan mengisi ruang-ruang kosong dalam material komposit, sehingga diasumsikan kekuatan dari material tersebut akan meningkat. Reduksi yang digunakan adalah sebesar: 2%, 4%, dan 5%.

5. Pengujian dan pengamatan material

Setelah material komposit telah selesai dibuat dan diberikan *heat treatment*, material di preparasi untuk dilakukan pengujian. Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini di antaranya: uji impak, dan uji kekerasan. Selain itu, dilakukan juga pengamatan terhadap struktur material dengan metode SEM (*Scanning Electron Microscopy*).

6. Analisis data pengujian

Setiap analisis yang dilakukan, akan menghasilkan data terkait karakteristik daripada sampel yang telah dibuat. Analisis dilakukan terhadap beberapa karakteristik dari komposit tersebut, mulai dari kekuatan, kekerasan, hingga struktur mikro yang dihasilkan.

7. Kesimpulan

Setelah didapatkan data analisis dari setiap pengujian yang telah dilakukan, dibuat kesimpulan dari hasil penelitian.

3.2 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam proses penelitian ini di antaranya adalah,

3.2.1 Alat

1. Alat *press*

Merupakan alat yang dibuat dari kombinasi antara: *hydraulic jack* dan rangka besi UNP. Alat ini digunakan untuk proses *thixoforming* yang memerlukan penekanan pada material di dalam cetakan.



Gambar 3.2 Alat *Press*

2. Cetakan (*dies*)

Terbuat dari bahan baja atau logam lainnya yang memiliki titik lebur lebih tinggi daripada aluminium 6061. Cetakan ini digunakan dalam proses *stir casting* dan *thixoforming*, sebagai wadah dari material komposit.



Gambar 3.3 Cetakan atau *Dies*

3. *Infrared thermogun*

Alat pengukur suhu non-kontak, juga disebut *pyrometer* atau termometer inframerah, menggunakan teknologi inframerah untuk mengukur suhu permukaan objek tanpa bersentuhan langsung dengannya.



Gambar 3.4 *Infrared Thermogun*

4. Timbangan digital

Digunakan untuk mengidentifikasi berat bahan atau material yang digunakan dalam penelitian. Selain itu, timbangan ini juga digunakan untuk mengatur komposisi bahan-bahan penyusun material komposit.



Gambar 3.5 Timbangan Digital

5. Gerinda

Alat untuk memotong ataupun membentuk bahan dan material yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 3.6 Gerinda

6. *Muffle furnace*

Merupakan alat yang berperan seperti halnya oven. Digunakan untuk memanaskan material tanpa adanya kontak langsung. Alat ini digunakan dalam proses *thixoforming*.



Gambar 3.7 *Muffle Furnace*

7. Alat pengamat struktur mikro

Merupakan alat yang digunakan untuk melihat susunan struktur mikro atau kecil dari suatu material. Pada penelitian ini dilakukan pengamatan struktur mikro dengan metode SEM. Adapun alat yang digunakan adalah Zeiss EVO 10 *Scanning Electron Microscope*.



Gambar 3.8 SEM (*Scanning Electron Microscope*)

8. Alat uji kekerasan

Merupakan alat yang digunakan untuk menguji tingkat kekerasan daripada suatu material. Prinsip kerja dari alat ini adalah dengan memberikan tekanan ke permukaan material menggunakan *indenter*, yang kemudian nilai kekerasan material akan ditampilkan pada *display*. Pengujian kekerasan pada penelitian ini menggunakan *Rockwell Type Hardness Tester FR-X Series*.



Gambar 3.9 *Rockwell Type Hardness Tester FR-X Series*

9. Alat uji impak

Merupakan alat yang dilakukan untuk menguji nilai ketangguhan suatu material dengan melihat kemampuan penyerapan energi yang diberikan kepadanya.



Gambar 3.10 Alat Uji Impak

10. Mesin *roll*

Adalah alat yang digunakan untuk membentuk lembaran logam atau bahan lainnya menjadi profil yang diinginkan. Dalam penelitian ini, mesin *roll* digunakan untuk mereduksi ketebalan material komposit.



Gambar 3.11 Mesin *Roll*

11. Alat peleburan

Adalah kombinasi dari sebuah tungku dan pemanas, yang digunakan untuk melebur bahan-bahan penyusun material yang dilakukan dalam proses *stir casting*.



Gambar 3.12 Alat Peleburan

12. Mesin *grinding and polishing*

Adalah alat yang digunakan untuk meratakan permukaan suatu material. Alat ini bekerja dengan menggerus permukaan material secara bertahap dengan peningkatan mesh amplas yang digunakan, dan pada akhirnya permukaan tersebut dipoles.



Gambar 3.13 Mesin *Grinding and Polishing*

3.2.2 Bahan

1. Aluminium 6061 (Al 6061)

Penelitian ini menggunakan aluminium 6061 sebagai *matrix* daripada material komposit yang diinginkan.



Gambar 3.14 Aluminium 6061

2. Silikon karbida (SiC) bubuk

SiC ini digunakan sebagai penguat pada material komposit yang diinginkan. SiC ini memiliki spesifikasi 1200 mesh.



Gambar 3.15 SiC (Silikon Karbida)

3. Magnesium (Mg) bubuk

Digunakan sebagai bahan pelarut dan *wetting agent* dalam proses *stir casting*, sehingga semua bahan material dapat bercampur secara sempurna.



Gambar 3.16 Mg (Magnesium)

3.3 Prosedur Penelitian

Beberapa prosedur yang dilakukan dalam penelitian ini terdiri dari beberapa proses, di antaranya,

3.3.1 *Stir Casting*

Pembuatan material dalam penelitian ini diawali dengan penyatuan seluruh bahan yang dilakukan dengan proses *stir casting*. Proses ini dipilih supaya penyatuan kedua bahan yaitu: Al 6061 dan SiC, dapat lebih sempurna. Material komposit ini tersusun atas: Al 6061 dengan konsentrasi 90%, SiC dengan konsentrasi 5%, dan Mg dengan konsentrasi 5%. Penentuan konsentrasi dari setiap bahan dipilih berdasarkan fraksi berat. Adapun prosedur *stir casting* yang dilakukan adalah sebagai berikut,

1. Menyiapkan alat dan bahan yang akan digunakan dalam proses *stir casting*. Persiapan ini meliputi: persiapan alat peleburan, pemotongan Al 6061, dan penentuan persentase setiap bahan sesuai dengan komposisi yang telah ditentukan.
2. Meletakkan Al 6061 yang telah disiapkan sebelumnya, ke dalam krusibel. Selanjutnya alat peleburan dinyalakan untuk melebur Al 6061 tersebut. Suhu yang digunakan untuk melebur Al 6061 adalah sekitar 850°C.
3. Setelah Al 6061 sudah melebur dengan sempurna, akan terdapat terak pada bagian permukaan leburan Al 6061 tersebut. Terak yang ada di permukaan, diambil dan dibuang.

4. Mencampurkan leburan Al 6061 dan SiC dengan menggunakan bor tangan yang telah dimodifikasi dengan *impeller* untuk stir casting. Pencampuran ini menggunakan Mg sebagai *wetting agent*, supaya kedua bahan komposit dapat tercampur merata. Adapun kecepatan putaran yang digunakan dalam proses ini adalah 3000 rpm yang dilakukan selama 3 x 5 menit.
5. Menuangkan leburan komposit Al 6061 dan SiC pada saat keduanya sudah tercampur secara merata, ke cetakan yang telah dibersihkan sebelumnya.

3.3.2 Thixoforming

Setelah proses pencampuran bahan Al 6061 dan SiC dengan metode *stir casting* selesai, dilakukan proses *thixoforming*. Proses *thixoforming* ini bertujuan untuk meningkatkan kekuatan dari komposit dengan mengurangi rongga, pori-pori ataupun retak yang dihasilkan dari proses pembentukan sebelumnya. Adapun langkah-langkah proses ini adalah sebagai berikut,

1. Mempersiapkan cetakan berisi *ingot* komposit hasil *stir casting* pada *muffle furnace*, dan mengatur suhu yang akan digunakan yaitu 650°C.
2. Memanaskan komposit beserta cetakannya pada suhu yang telah ditentukan selama ± 45 menit.
3. Mengeluarkan komposit dan cetakannya dari *muffle furnace*, kemudian menekannya menggunakan alat *press*. Tekanan yang digunakan pada proses *pressing* ini adalah 392 MPa, sesuai dengan spesifikasi dongkrak hidrolik yang digunakan pada alat *press*.
4. Diamkan komposit beserta cetakannya dalam kondisi tertekan pada alat *press* selama 5 menit untuk menurunkan suhu komposit dan membuatnya lebih stabil.
5. Dinginkan komposit dan cetakannya dengan cara didiamkan pada udara terbuka. Setelah komposit sudah mendekati suhu ruang, komposit tersebut dikeluarkan dari cetakan.

3.3.3 Heat Treatment

Untuk meningkatkan sifat mekanik dari komposit Al 6061 dan SiC yang telah dibuat, dilakukan proses heat treatment setelah rangkaian proses pembentukan telah selesai. *Heat treatment* yang diberikan pada komposit berupa *solution hardening* dan *quenching*. Berikut adalah langkah-langkah yang dilakukan,

1. Komposit dipanaskan kembali menggunakan *muffle furnace* pada suhu 550°C selama 45 menit. Proses ini disebut *solution hardening*.
2. Melakukan *quenching* menggunakan air es dengan suhu 0°C, setelah proses *solution hardening* selesai dilakukan.

3.3.4 Artificial Aging

Setelah komposit diberikan *heat treatment* berupa *solution hardening* dan *quenching*, untuk meningkatkan kembali kekuatan daripada komposit, dilakukanlah *artificial aging*. Proses ini akan menginduksi perubahan sifat mekanik material secara terkendali. Berikut adalah langkah-langkahnya,

1. Menyusun komposit ke dalam *muffle furnace*.
2. Mengatur suhu ke 190°C dan memanaskan komposit tersebut selama 2 jam.

3.3.5 Rolling

Selanjutnya dilakukan proses *rolling* yang menjadi variabel bebas dalam penelitian ini. Proses ini dilakukan untuk mereduksi ketebalan dari material dengan tujuan untuk memberikan penyebaran yang lebih merata di setiap sisi komposit, dan membantu menutup porositas yang masih terdapat pada komposit. berikut adalah langkah-langkah dari proses *rolling*,

1. Mengidentifikasi dan membedakan sampel komposit yang akan dilakukan *rolling*. Adapun variasi persen reduksi yang digunakan pada setiap sampelnya adalah: 2%, 4%, dan 5%.
2. Melakukan proses *rolling* secara bertahap, dengan tujuan untuk menghindari adanya beban berlebih pada sampel komposit, dan mesin *rolling*.

3. Rolling dilakukan secara bertahap dengan pengurangan ketebalan $\pm 0,5$ mm per 3x *rolling*.

3.3.6 Uji Kekerasan

Untuk mengetahui tingkat kekerasan dari komposit, maka dilakukan uji kekerasan. Pengujian kekerasan ini menggunakan metode *rockwell*, dimana permukaan komposit akan diberikan tekanan berupa penetrasi menggunakan bola baja *indentor*. Standar yang digunakan dalam pengujian kekerasan ini ialah ASTM E18. Pengujian kekerasan ini menggunakan beban sebesar 100 kgf. Berikut langkah-langkah pengujian kekerasan yang dilakukan,

1. Mempersiapkan alat uji dan sampel komposit dengan mengatur keduanya sesuai standar ASTM E18.
2. Sampel komposit disesuaikan pada alat uji. Dilakukan kalibrasi pada sampel hingga lampu indikator menyala pada bagian tombol *start*.
3. Melakukan uji kekerasan sebanyak 3 titik, guna mendapatkan hasil yang lebih akurat.
4. Mencatat nilai kekerasan dari setiap sampel yang ditampilkan pada *display* alat uji kekerasan.

3.3.7 Uji Impak

Selain nilai kekerasan, komposit juga akan dilihat nilai ketangguhannya terhadap beban impact atau tiba-tiba, maka dilakukanlah pengujian impact. Pengujian ini digunakan untuk mengetahui tingkat ketangguhan komposit, dengan mengukur energi maksimal yang dapat diserap oleh komposit tersebut. Uji impact yang dilakukan, menggunakan metode *charpy* dan standar ASTM E23. Berikut langkah-langkah dari pengujian impact yang dilakukan,

1. Mempersiapkan alat uji impact dan sampel material sesuai dengan standar ASTM E23.
2. Memposisikan sampel sesuai dengan metode *charpy*.
3. Mengatur pembebanan yang akan digunakan, yaitu sebesar 300 joule, serta mengkalibrasikan alat uji impact pada indikator.
4. Melepaskan bandul impact dan mengamati nilai impact pada indikator.

5. Mencatat nilai impak dan mengolahnya sesuai dengan rumus yang telah ditentukan.

3.3.8 Pengamatan Metalografi

Pengamatan metalografi juga dilakukan pada komposit yang telah dibuat, dengan menggunakan alat *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Pengamatan struktur mikro komposit dilakukan pada bagian permukaan dari sampel. Pengamatan ini dilakukan dengan tujuan untuk menganalisis morfologi, struktur mikro, serta komposisi kimia dari komposit. Berikut langkah-langkah dari pengamatan metalografi yang dilakukan,

1. Melakukan preparasi permukaan sampel dengan menghilangkan kotoran yang terkontaminasi pada sampel
2. Memasang sampel pada *holder*, dan meletakkannya ke dalam ruang uji
3. Mengkondisikan ruang pengujian, yaitu membuatnya menjadi kedap udara
4. Melakukan pengujian dengan perbesaran yang telah ditentukan.

3.2 Variabel Penelitian

Dalam sebuah penelitian, diperlukan adanya variabel yang bertujuan untuk membatasi penelitian tersebut supaya tidak memiliki cakupan yang terlalu luas. Adapun beberapa variabel penelitian ini di antaranya,

1. Variabel bebas
 - a. Variasi persen reduksi ketebalan komposit
2. Variabel terikat
 - a. Data hasil pengujian kekerasan dan impak
3. Variabel kontrol
 - a. Waktu pengadukan dan kecepatan putar pada stir casting
 - b. Suhu dan tekanan pada *thixoforming*
 - c. Suhu *solution hardening*
 - d. Suhu dan waktu *artificial aging*
 - e. Komposisi material penyusun komposit

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil *Thixoforming*

Setelah diperoleh *ingot* material komposit Al 6061 dengan penguat SiC, dilakukan proses *thixoforming* untuk meningkatkan kekuatan material komposit. Peningkatan kekuatan material disebabkan karena adanya ikatan yang lebih baik antara matriks dan penguat sebagai hasil dari penggabungan proses pengecoran dan penempaan sehingga menghasilkan komponen struktural dengan bentuk yang kompleks [31]. Selain itu, harapan dilakukannya *thixoforming* adalah untuk mengurangi porositas hasil *stir casting*, sebagai akibat dari paduan matriks dan penguat yang mungkin terpisah saat proses pendinginan. Hasil *thixoforming* akan menyebabkan tereduksinya ketebalan dari komposit hasil *stir casting*, sebagai akibat pemberian tekanan kepadanya dalam kondisi *semi-solid*. Adapun hasil proses *thixoforming* dapat dilihat pada tabel berikut,

Tabel 4.1 Ketebalan Komposit Hasil *Thixoforming*

Sampel Komposit ke-	Ketebalan (mm)		Total Reduksi (mm)	Rata-Rata Reduksi (mm)
	Sebelum	Sesudah		
1	17,5	14,5	3	3,5
2	15	11,5	3,5	
3	16,5	12,5	4	

Dapat dilihat dari hasil *thixoforming* yang telah dilakukan, terdapat pengurangan ketebalan dari komposit, hal ini menunjukkan proses *thixoforming* berhasil dilakukan dan tekanan yang diberikan sudah cukup optimal. Berikut adalah gambar sampel setelah mengalami proses *thixoforming*,



Gambar 4.1 Material Komposit Setelah *Thixoforming*

4.2 Hasil *Rolling*

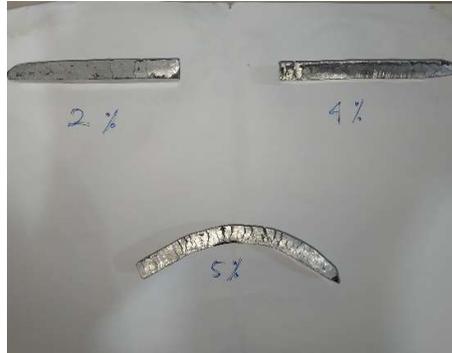
Setelah proses *thixoforming* dan *artificial aging* dilakukan pada komposit, dilakukan proses *rolling* bertujuan untuk mereduksi ketebalan dan membantu mengurangi porositas yang masih ada di dalam struktur mikro komposit hasil *stir casting* dan *thixoforming*, serta membuat penyebaran penguat menjadi lebih merata. Karena proses *thixoforming* dan *artificial aging* menghasilkan dimensi sampel yang kurang proporsional, maka dilakukan preparasi sampel terlebih dahulu. Selain untuk merapikan dimensi setiap sampel, proses ini juga bertujuan untuk menghilangkan lapisan oksidasi yang terbentuk selama proses pembentukan dan *heat treatment* sebelumnya. Preparasi ini dilakukan dengan manual menggunakan alat gerinda. Adapun dimensi sampel komposit hasil proses *rolling* dapat dilihat pada tabel berikut,

Tabel 4.2 Ketebalan Komposit Hasil *Rolling*

Sampel Komposit ke-	Ketebalan (mm)		Total Reduksi (%)
	Sebelum	Sesudah	
1	10	9,8	2
2	10,1	9,6	4
3	10	9,5	5

Setelah dilakukan proses *rolling* pada material komposit dengan beberapa variasi persen reduksi, didapatkan hasil ketebalan komposit yang

lebih tipis dan diasumsikan bahwa struktur mikro pada komposit telah menguat. Namun, pada persen reduksi 5%, diperoleh hasil sampel komposit yang rapuh hingga pecah. Hal ini disebabkan karena reduksi ketebalan yang terlalu besar pada material, serta masih terdapatnya porositas yang menyebabkan konsentrasi tegangan yang menyebabkan *crack* pada sampel komposit [32]. Berikut adalah gambar sampel komposit hasil *rolling*,



Gambar 4.2 Sampel Komposit setelah *Rolling*



Gambar 4.3 Sampel Komposit yang Pecah Akibat *Rolling*

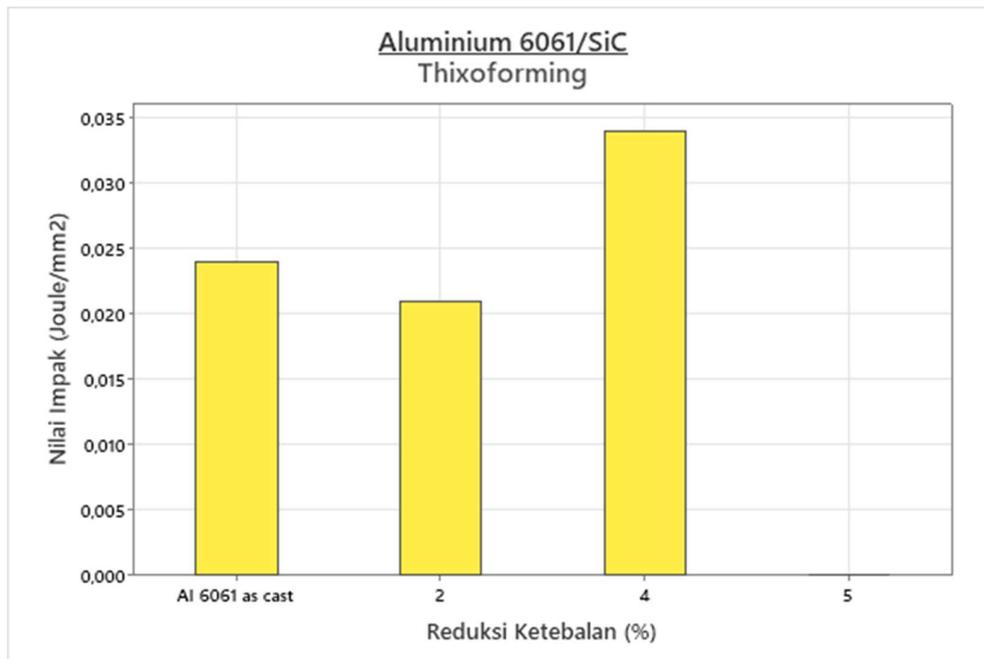
4.3 Hasil Pengujian Impak

Dilakukan pengujian impak pada komposit untuk mengetahui tingkat ketangguhan material komposit. Setelah dilakukan pengujian impak, didapatkan hasil nilai ketangguhan dari material komposit yang dapat dilihat sebagai berikut,

Tabel 4.3 Nilai Hasil Uji Impak Komposit dengan Variabel Reduksi Ketebalan

Variabel Sampel	Sampel ke-	Luas Penampang (l x t)	Energi Diserap (Joule)	Nilai Impak (Joule/mm ²)	Rata-Rata (Joule/mm ²)
Al 6061 as cast	1	100	2,7	0,027	0,024
	2	100	2,1	0,021	
	3	100	2,3	0,023	
Sampel reduksi 2%	1	100	1,9	0,019	0,021
	2	100	2,2	0,022	
	3	100	2,1	0,021	
Sampel reduksi 4%	1	100	3,7	0,037	0,034
	2	100	3,5	0,035	
	3	100	2,9	0,029	

Nilai-nilai yang telah diperoleh dari hasil pengujian, kemudian di sajikan dalam bentuk grafik yang dapat dilihat sebagai berikut,

**Gambar 4.4** Grafik Nilai Impak Komposit dengan Variabel Reduksi Ketebalan

Berdasarkan grafik nilai impak komposit dapat dilihat bahwa tingkat ketangguhan dari komposit meningkat seiring dengan penambahan persen reduksi yang diberikan. Namun sampel dengan reduksi ketebalan 2% memiliki nilai yang lebih rendah daripada Al 6061 murni hasil *casting*. Ini disebabkan oleh daya rekat yang lemah antara pengisi logam dan bahan matriks, yang dapat menyebabkan transfer beban yang buruk dan peningkatan kerentanan terhadap keretakan saat terjadi benturan [33]. Adanya peningkatan ketangguhan disebabkan karena deformasi plastis yang terjadi, dan menyebabkan densitas dislokasi meningkat, atau disebut juga dengan *work hardening*. Sampel komposit dengan reduksi ketebalan 4% memiliki nilai tertinggi dari semua sampel yang diujikan. Sedangkan sampel komposit dengan persen reduksi sebesar 5% dianggap gagal karena tidak dapat diujikan, mengingat sampel tersebut mengalami kegagalan setelah dilakukan proses *rolling*.

Adapun bentuk patahan yang dihasilkan oleh komposit ini adalah termasuk patahan getas, yang dapat dilihat pada gambar berikut,



Gambar 4.5 Patahan Sampel dengan Reduksi Ketebalan 2%



Gambar 4.6 Patahan Sampel dengan Reduksi Ketebalan 4%

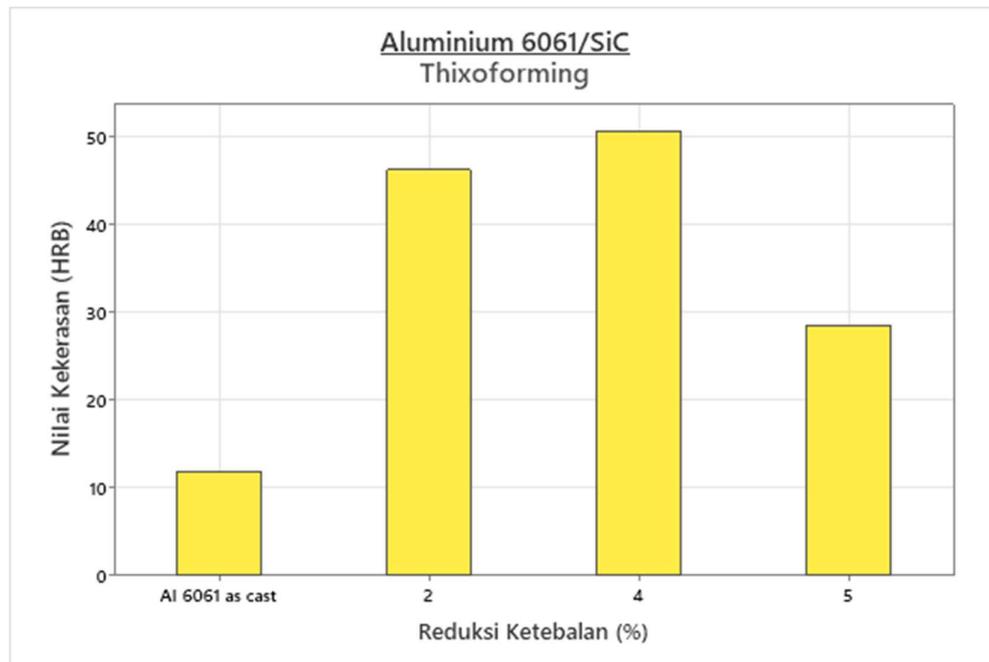
4.4 Hasil Pengujian Kekerasan

Dilakukan pengujian kekerasan pada material komposit untuk menganalisis tingkat kekerasan dari material komposit yang dihasilkan dari variasi reduksi ketebalan. Adapun hasil pengujian kekerasan ini memiliki satuan HRB (*hardness rockwell B*). Berikut nilai kekerasan setiap sampel dapat dilihat pada tabel berikut,

Tabel 4.4 Hasil Uji Kekerasan dengan Variabel Reduksi Ketebalan

Sampel Komposit	Titik 1 (HRB)	Titik 2 (HRB)	Titik 3 (HRB)	Rata-Rata (HRB)
Al 6061 <i>as cast</i>	12,7	9,3	13,3	11,8
Sampel reduksi 2%	49,6	45,7	43,3	46,2
Sampel reduksi 4%	50,3	51,6	50,0	50,6
Sampel reduksi 5%	26,3	29,3	30,0	28,5

Nilai-nilai yang telah diperoleh dari hasil pengujian, kemudian di sajikan dalam bentuk grafik yang dapat dilihat sebagai berikut,

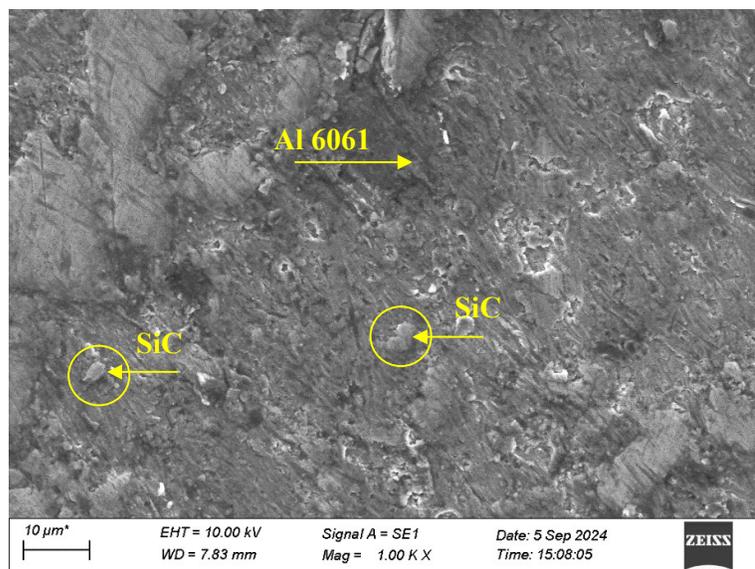


Gambar 4.7 Grafik Nilai Kekerasan Komposit dengan Variabel Reduksi Ketebalan

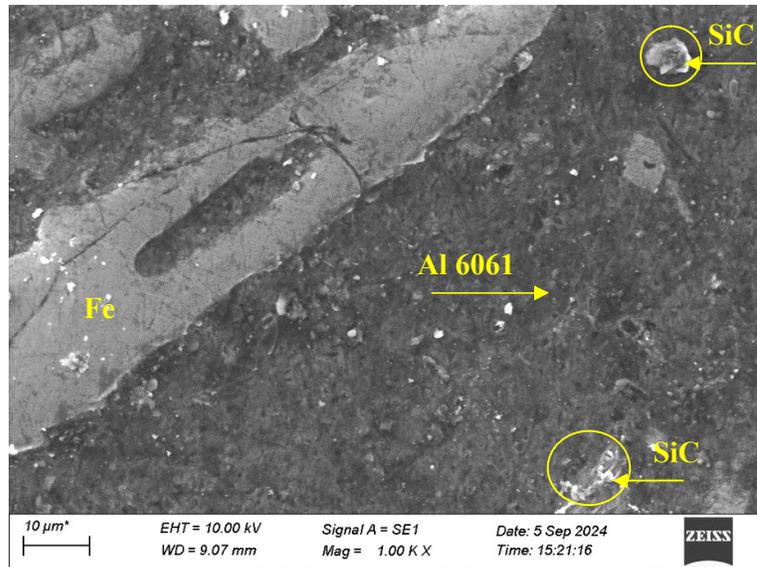
Berdasarkan grafik nilai hasil pengujian kekerasan yang dilakukan pada sampel komposit, dapat dilihat bahwa terjadi peningkatan kekerasan seiring dengan penambahan persen reduksi ketebalan. Proses *rolling* menghasilkan nilai kekuatan dan kekerasan yang lebih tinggi karena distribusi dislokasi yang tinggi dan heterogen yang diperlukan secara geometris di seluruh ketebalan material [34]. Meskipun tingkat kekerasan komposit cenderung meningkat seiring dengan peningkatan persen reduksi ketebalan, pada sampel dengan persen reduksi ketebalan 5%, nilai kekerasan menurun drastis. Hal ini masuk akal karena sebelumnya sampel reduksi ketebalan 5% mengalami kegagalan saat proses *rolling*, sehingga dapat dipastikan sampel komposit ini mengalami penurunan kekuatan.

4.5 Hasil Pengamatan Metalografi

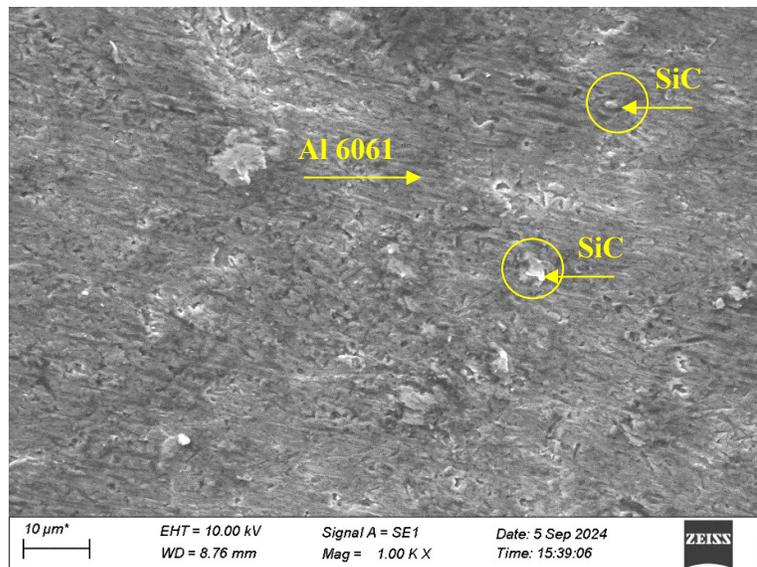
Selain dilakukan pengujian *destructive* pada beberapa sampel komposit dengan variasi reduksi ketebalannya masing-masing, dilakukan juga pengamatan metalografi dengan menggunakan SEM (*scanning electron microscopy*). Pengamatan dilakukan pada bagian permukaan sampel komposit. Hasil yang didapatkan dari pengamatan ini di antaranya: gambar struktur mikro komposit, dan komposisi dari setiap atom penyusun komposit. Berikut adalah gambar struktur mikro dari setiap variasi reduksi ketebalan komposit dengan perbesaran 1000x,



Gambar 4.8 Sampel Komposit dengan Reduksi Ketebalan 2%



Gambar 4.9 Sampel Komposit dengan Reduksi Ketebalan 4%

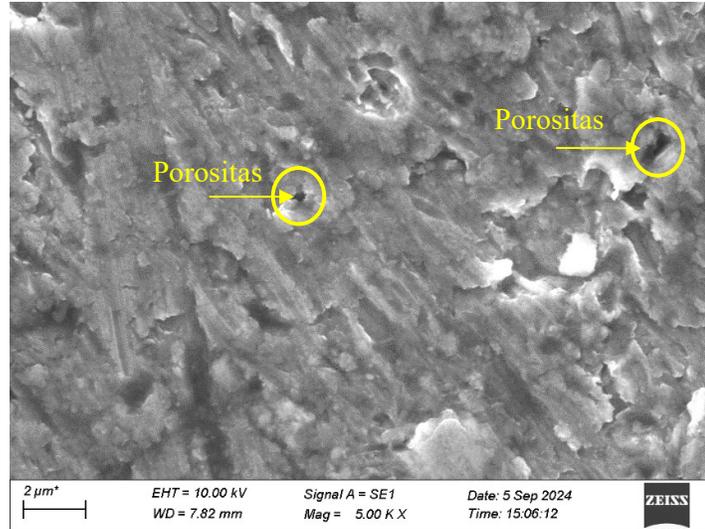


Gambar 4.10 Sampel Komposit dengan Reduksi Ketebalan 5%

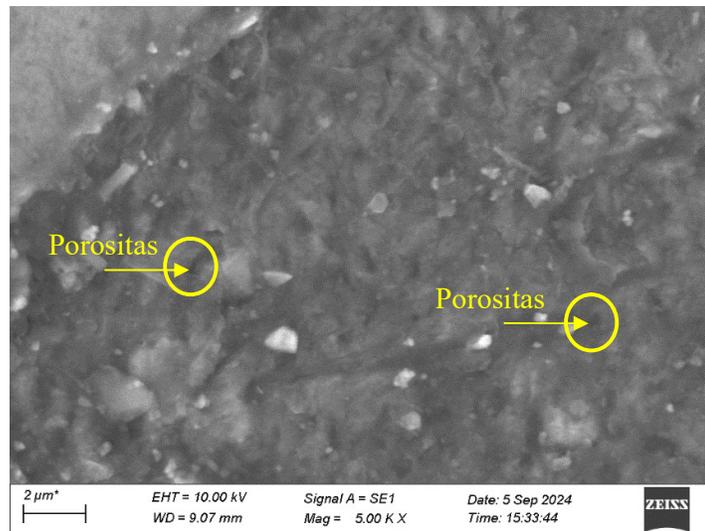
Pada gambar struktur mikro setiap sampel komposit di atas, diasumsikan SiC telah membentuk presipitat dengan Mg, sehingga menjadi Mg_2Si (*Magnesium Silicide*) yang telah tersebar di seluruh permukaan komposit. Hal tersebut berdasarkan penelitian sebelumnya yang membuktikan bahwa Pendinginan dan pemanasan ulang secara terus menerus pada paduan

aluminium 6061 menyebabkan terbentuknya endapan Mg_2Si , yang memengaruhi kekuatan dan rekristalisasi selama pembentukan dan perlakuan panas yang diberikan [35]. Presipitat ini dapat dilihat pada area yang dilingkari dengan ciri-ciri: bentuk yang tidak beraturan, tampak lebih menonjol dibandingkan permukaan sekitarnya, dan berwarna lebih cerah. Presipitat ini berperan sangat penting dalam komposit, karena akan meningkatkan kekuatan material. Presipitat akan meningkatkan modulus elastisitas komposit dan menghambat pergerakan dislokasi. Sesuai dengan literatur yang ada, presipitat ini dihasilkan dari proses pembentukan sebelumnya yaitu: *stir casting* dan *thixoforming*, serta *heat treatment* berupa *artificial aging*.

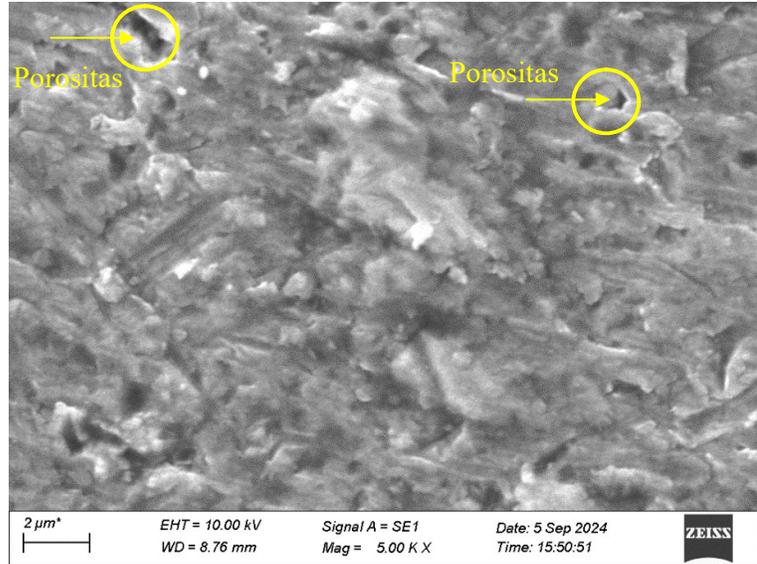
Dari ketiga gambar struktur mikro hasil SEM, dapat dilihat bahwa semakin besar persentase reduksi ketebalan yang diberikan pada komposit, maka akan semakin luas area penyebaran dari presipitat yang ada. Pada sampel dengan reduksi ketebalan 2%, presipitat masih tergolong berukuran besar dan berada pada jarak yang saling berdekatan. Kemudian pada sampel reduksi 4%, presipitat mulai tersebar ke seluruh permukaan. Pada akhirnya di sampel reduksi 5%, penampakan presipitat sudah memiliki ukuran yang jauh lebih kecil dari sebelumnya, dan tersebar di seluruh permukaan sampel. Pengerolan dingin pada paduan Al-Mg-Si memperpanjang distribusi butiran dan meningkatkan dislokasi [36]. Proses *rolling* juga memiliki kerugian, yaitu dapat memicu pembentukan porositas baru pada material, karena adanya konsentrasi tegangan yang melebihi kekuatan ikatan antar atom. Pembentukan porositas dalam material dapat ditingkatkan melalui *debonding* partikel akibat gaya tekan selama deformasi kondisi padat [37]. Penelitian ini menemukan bahwa meningkatnya keberadaan porositas disebabkan karena peningkatan persen reduksi ketebalan yang dilakukan pada komposit. Porositas sendiri dicirikan secara visual, memiliki bentuk mulai dari: bulat, memanjang, hingga tak beraturan. Porositas juga memiliki warna yang lebih gelap dibandingkan dengan permukaan yang lainnya. Berikut contoh porositas yang dapat dilihat pada gambar berikut,



Gambar 4.11 Cacat pada Sampel dengan Reduksi 2%



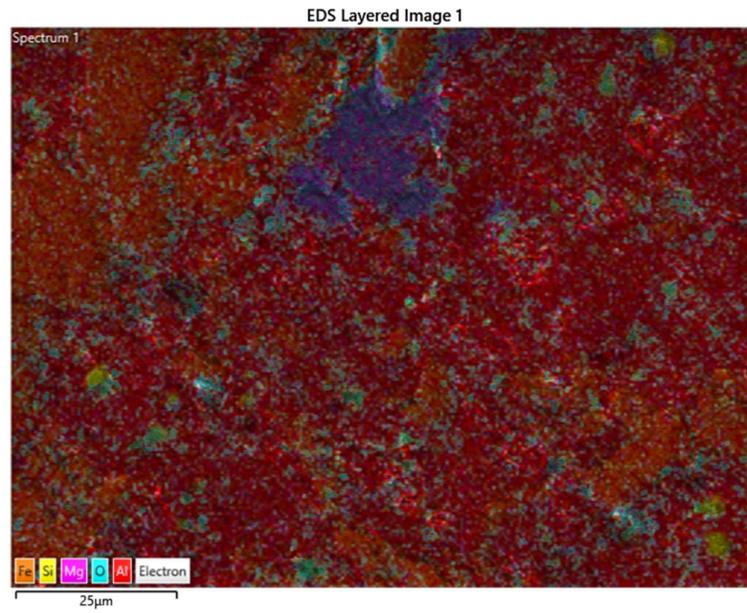
Gambar 4.12 Cacat pada Sampel dengan Reduksi 4%



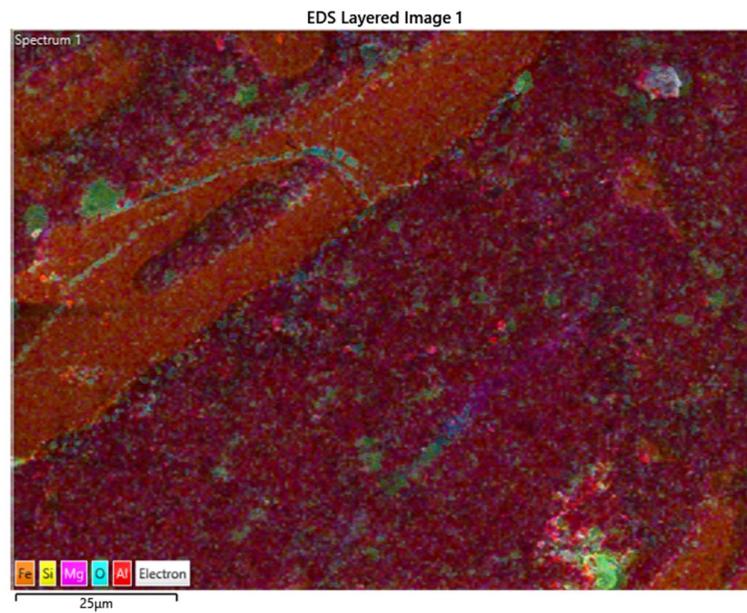
Gambar 4.13 Cacat pada Sampel dengan Reduksi 5%

Pada hasil SEM ketiga sampel dengan perbesaran 5000x, dapat terlihat perkembangan kemunculan porositas sebagai akibat dari hasil reduksi ketebalan dengan proses *rolling*. Porositas pada sampel dengan 2% reduksi ketebalan sudah mulai muncul, ditandai dengan area hitam pada gambar namun masih tergolong kecil dan sedikit. Kemudian pada sampel dengan 4% reduksi ketebalan, meskipun porositas terlihat lebih samar, jumlah dari porositas ini sendiri semakin banyak. Pada akhirnya, di sampel dengan 5% reduksi ketebalan, porositas terlihat menjadi semakin banyak dan memanjang. Porositas inilah yang menjadi pemicu utama dari kegagalan material komposit, dibuktikan dengan rusaknya sampel dengan 5% reduksi ketebalan.

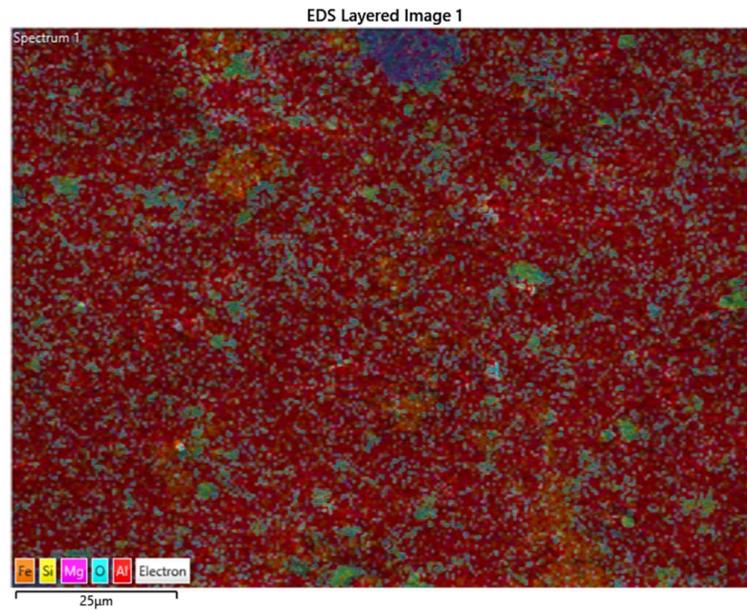
Presipitat yang ada pada sampel komposit merupakan hasil pembentukan fasa baru dari partikel SiC dan Mg sehingga menghasilkan Mg_2Si . Selain kedua partikel tersebut, terdapat juga beberapa jenis partikel lain yang ada dalam komposit. Berikut adalah gambar gabungan mapping EDS (*Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*) dari setiap komposisi partikel penyusun komposit,



Gambar 4.14 EDS *Mapping* Sampel Komposit Hasil Reduksi 2%

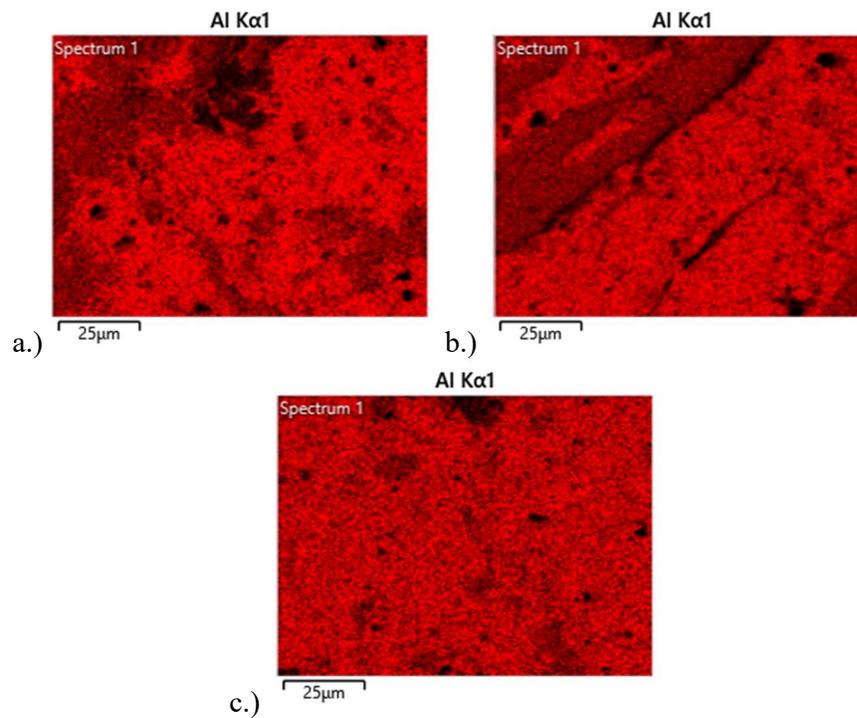


Gambar 4.15 EDS *Mapping* Sampel Komposit Hasil Reduksi 4%

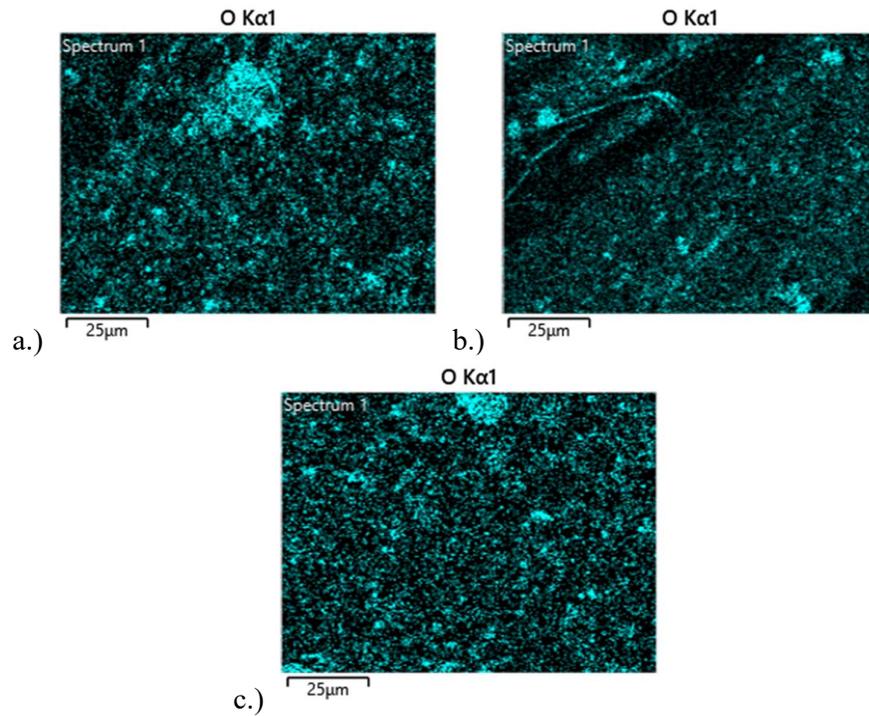


Gambar 4.16 EDS *Mapping* Sampel Komposit Hasil Reduksi 5%

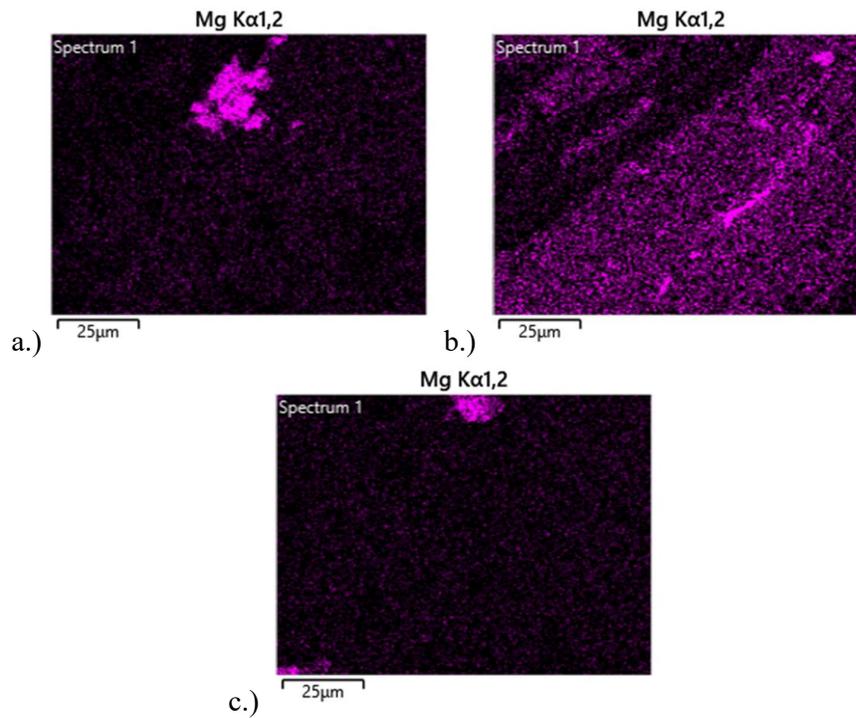
EDS mapping dari setiap partikel penyusun komposit, dapat dilihat pada gambar-gambar berikut,



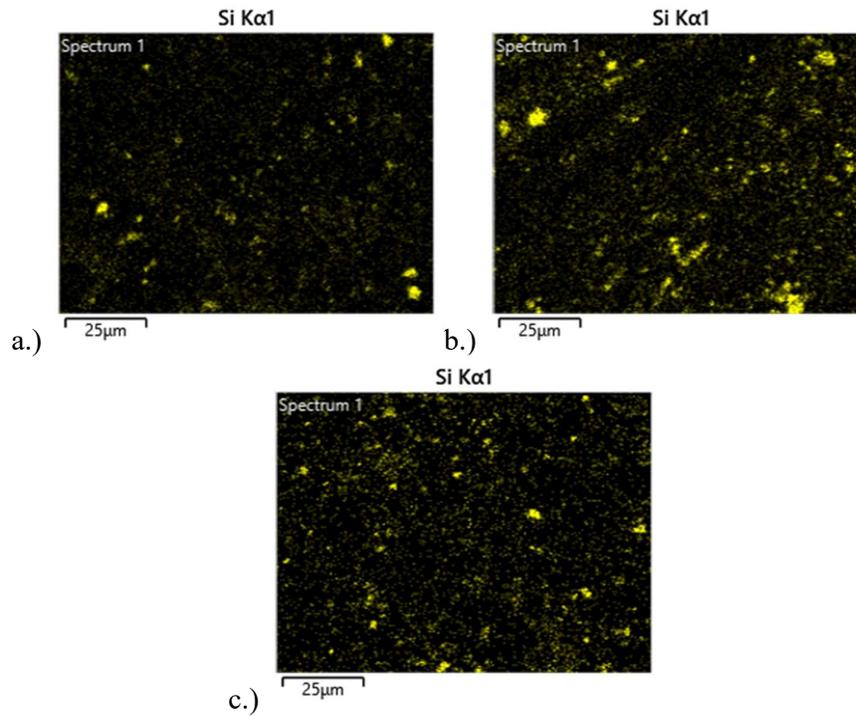
Gambar 4.17 Unsur Al pada Komposit (a. Reduksi 2%; b. Reduksi 4%; c. Reduksi 5%)



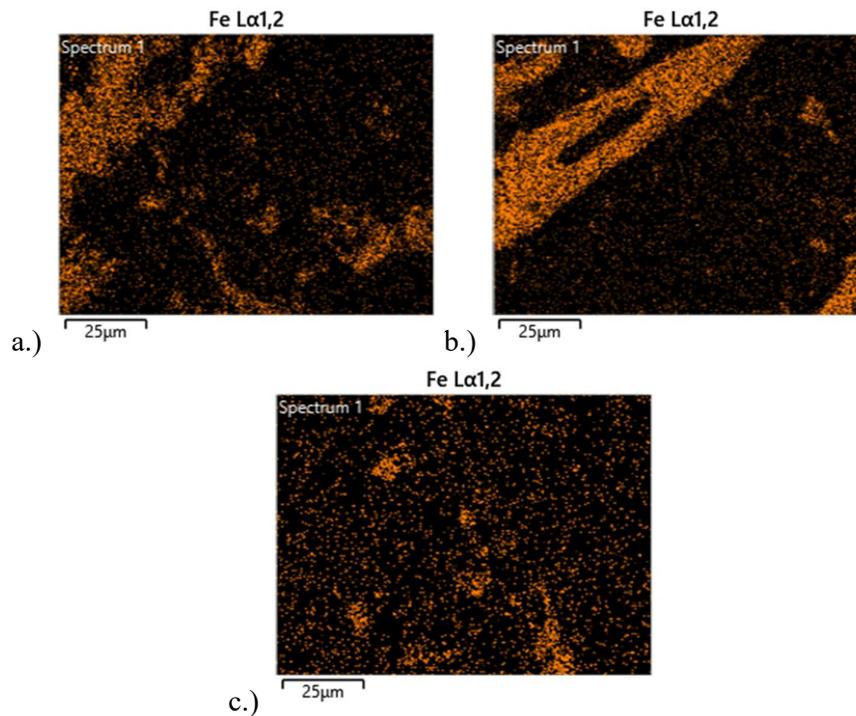
Gambar 4.18 Unsur O pada Komposit (a. Reduksi 2%; b. Reduksi 4%; c. Reduksi 5%)



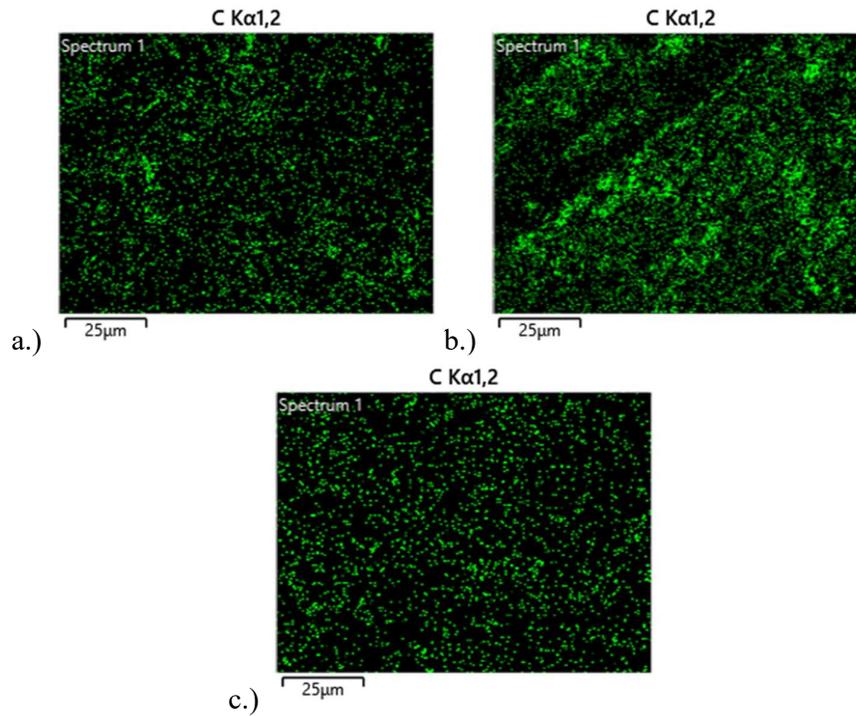
Gambar 4.19 Unsur Mg pada Komposit (a. Reduksi 2%; b. Reduksi 4%; c. Reduksi 5%)



Gambar 4.20 Unsur Si pada Komposit (a. Reduksi 2%; b. Reduksi 4%; c. Reduksi 5%)

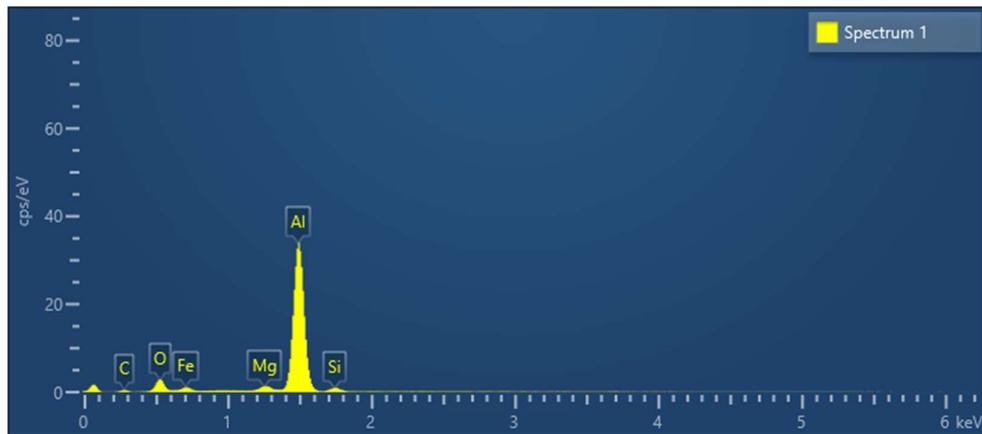


Gambar 4.21 Unsur Fe pada Komposit (a. Reduksi 2%; b. Reduksi 4%; c. Reduksi 5%)



Gambar 4.22 Unsur C pada Komposit (a. Reduksi 2%; b. Reduksi 4%; c. Reduksi 5%)

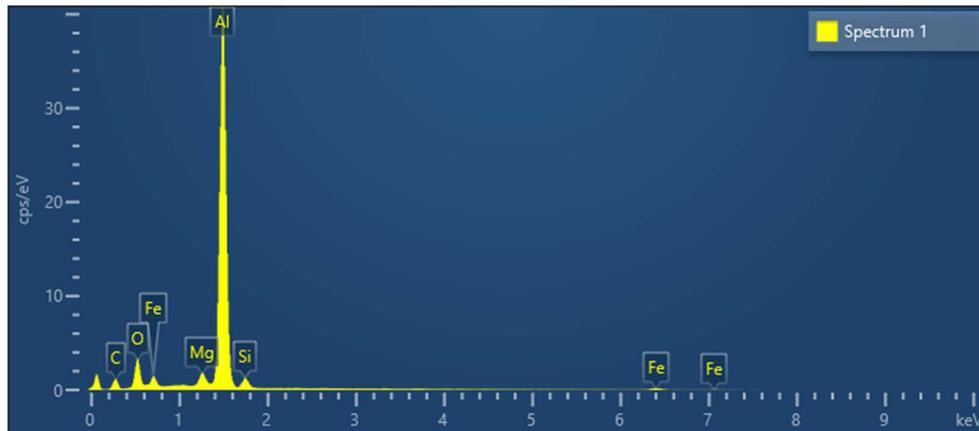
Spektrum dan komposisi dari setiap partikel penyusun sampel komposit dapat dilihat pada gambar-gambar berikut,



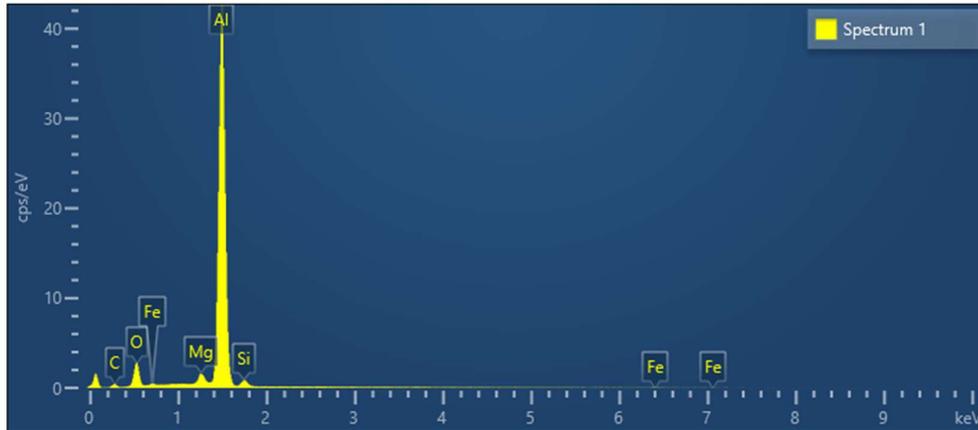
Gambar 4.23 Spektrum EDS Sampel dengan Reduksi 2%

Tabel 4.5 Komposisi Unsur Sampel Komposit dengan Reduksi 2% Hasil EDS

Spectrum 1				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
C	K series	8.56	0.37	17.22
O	K series	9.39	0.14	14.19
Mg	K series	1.73	0.06	1.72
Al	K series	67.04	0.42	60.05
Si	K series	2.50	0.08	2.15
Fe	L Series	10.78	0.39	4.66
Total		100.00		100.00

**Gambar 4.24** Spektrum EDS Sampel dengan Reduksi 4%**Tabel 4.6** Komposisi Unsur Sampel Komposit dengan Reduksi 4% Hasil EDS

Spectrum 1				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
C	K series	14.69	0.36	27.80
O	K series	8.48	0.12	12.05
Mg	K series	1.78	0.05	1.66
Al	K series	61.97	0.37	52.22
Si	K series	2.34	0.07	1.90
Fe	L Series	10.75	0.34	4.38
Total		100.00		100.00



Gambar 4.25 Spektrum EDS Sampel dengan Reduksi 5%

Tabel 4.7 Komposisi Unsur Sampel Komposit dengan Reduksi 5% Hasil EDS

Spectrum 1				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
C	K series	7.80	0.37	15.27
O	K series	8.85	0.14	13.00
Mg	K series	1.78	0.06	1.72
Al	K series	77.45	0.42	67.45
Si	K series	2.00	0.07	1.67
Fe	L Series	2.12	0.34	0.89
Total		100.00		100.00

Berdasarkan hasil EDS yang telah dilakukan pada sampel komposit, diperoleh hasil bahwa kandungan unsur SiC yang berperan sebagai penguat dan membentuk presipitat Mg_2Si menjadi lebih tersebar dan memiliki butir yang lebih kecil dikarenakan meningkatnya persentase reduksi ketebalan pada sampel. Ukuran butir dan penyebaran presipitat yang luas ini penting untuk menghambat terjadinya pergerakan dislokasi di dalam material komposit, sehingga akan meningkatkan kekuatan dan kekerasan material. Pada hasil EDS sampel komposit, dapat dilihat pula keberadaan unsur oksigen (O) yang cukup banyak. Penyebab munculnya unsur oksigen karena adanya oksidasi yang terjadi selama proses pembentukan dan perlakuan sampel. peristiwa oksidasi dipicu akibat proses-proses yang dilakukan pada udara terbuka, seperti: *stir casting*, *thixoforming*, bahkan *rolling*. Permukaan material akan kontak langsung dengan oksigen dari udara terbuka sehingga akan

menciptakan lapisan oksidasi. Munculnya oksidasi dapat memberikan kerugian yaitu menyebabkan material menjadi rapuh karena adanya porositas yang memicu *crack*. Namun, oksidasi juga dapat meningkatkan nilai kekerasan dari material. Hal itu terbukti dengan hasil pengujian kekerasan yang menghasilkan nilai cukup tinggi.

4.6 Diskusi Hasil

Setelah diperoleh beberapa data hasil pengujian terhadap sampel komposit dengan masing-masing variasi persen reduksi ketebalan yang diberikan, dapat dilihat bahwa kenaikan persen reduksi ketebalan yang diberikan kepada komposit, akan meningkatkan sifat mekanik dari komposit, seperti ketangguhan dan kekerasan. Berdasarkan hasil uji impak yang dilakukan pada beberapa variasi sampel aluminium, menunjukkan peningkatan hasil dari setiap pemberian persentase reduksi ketebalan. Nilai tertinggi dihasilkan oleh sampel komposit dengan persen reduksi 4%, yaitu sebesar 0,034 Joule/mm². Namun, sebelum memperoleh nilai tertinggi tersebut, sampel komposit dengan reduksi ketebalan sebesar 2% memiliki nilai ketangguhan yang lebih kecil daripada sampel Al 6061 murni hasil casting, yaitu 0,024 Joule/mm² untuk Al 6061 as cast, dan 0,021 Joule/mm² untuk sampel komposit dengan reduksi ketebalan sebesar 2%. Hal ini diasumsikan terjadi karena interaksi antara matriks dan penguat hasil dari proses reduksi ketebalan sebanyak 2%, masih belum optimal. Kemudian karena distribusi partikel penguat SiC yang belum merata pada sampel komposit, baik hasil dari proses *stir casting* maupun *thixoforming*, yang menyebabkan adanya agregasi partikel yang menjadi titik konsentrasi tegangan, sehingga menurunkan nilai ketangguhan. Hal ini disebabkan agregasi pengisi dapat meningkatkan konduktivitas termal tetapi dapat merusak sifat mekanik seperti kekuatan dan ketangguhan[38].

Selanjutnya, pada sampel komposit dengan reduksi ketebalan 4% memiliki nilai ketangguhan yang lebih tinggi dibandingkan dengan sampel uji lainnya. Hal ini diasumsikan karena butir yang terdapat pada komposit sudah berubah menjadi lebih halus, sehingga dapat mengisi porositas lebih baik dan

menghambat pergerakan dislokasi. Selain itu, asumsi lainnya adalah, distribusi partikel SiC menjadi lebih merata karena peningkatan reduksi ketebalan yang dilakukan pada sampel komposit. Ukuran butiran yang lebih halus dari penguat mempengaruhi ketangguhan retak, karena defleksi meningkatkan ketangguhan retak pada komposit dengan butiran matriks halus[39]. Tidak dilakukan pengujian impak pada sampel dengan reduksi 5% karena sampel mengalami kegagalan berupa pecah saat proses *rolling*. Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, kegagalan ini disebabkan karena pemberian reduksi ketebalan yang terlalu besar, dan adanya porositas yang mendorong kemunculan *crack*. Selain hal tersebut, kegagalan ini diasumsikan juga karena adanya cacat permukaan sampel akibat dari preparasi yang kurang sempurna sebelum dilakukannya proses *rolling*. Retak permukaan selama permesinan dapat mengakibatkan kegagalan fatik selama dilakukannya *rolling*[40].

Pengujian kekerasan pada sampel komposit Al 6061-SiC dengan variasi persen reduksi memberikan hasil yang menunjukkan adanya peningkatan nilai kekerasan seiring dengan peningkatan persen reduksi pada sampel komposit. Peningkatan ini disebabkan karena adanya *work hardening* selama pemberian reduksi ketebalan, sehingga meningkatkan densitas dislokasi dan tingkat kekerasan komposit. Selain itu, peningkatan kekerasan juga diperkirakan akibat pengecilan ukuran butir penguat, serta distribusi yang semakin merata dari penguat seiring dengan peningkatan reduksi, sehingga membantu menghambat pergerakan dislokasi dan ikut membantu mengisi porositas yang ada pada komposit. Hal ini berdasarkan penelitian pada material nanokristalin, dimana pelunakan ukuran butir pada material nanokristalin menyebabkan peningkatan kekerasan dengan penurunan ukuran butir[41]. Nilai kekerasan sampel komposit dengan reduksi ketebalan sebesar 5%, menunjukkan penurunan nilai yang drastis dari sampel yang lainnya. Hal ini diasumsikan karena terjadinya deformasi yang berlebihan pada komposit, sehingga menurunkan densitas dislokasi dan kekerasan dari material. Selain itu, persen reduksi ketebalan yang berlebihan ini, juga dapat menyebabkan *crack* pada komposit. hal itu juga menjadi penyebab menurunnya nilai

kekerasan. Pengerasan regangan yang berlebihan meningkatkan beban penghancuran rata-rata hingga 100% dan dapat menyebabkan perubahan mode deformasi dan hilangnya stabilitas[42].

Setelah dilakukan pengamatan metalografi pada komposit Al 6061-SiC, ditemukan cukup banyak unsur penyusun dari komposit tersebut, di antaranya adalah: karbon (C), Magnesium (Mg), Aluminium (Al), Oksigen (O), Silikon (Si), dan Besi (Fe). Variasi komposisi yang ada pada sampel komposit diasumsikan karena proses pembentukan yang kurang sempurna. Ada kemungkinan sampel terkontaminasi dengan bahan lain yang menyebabkan kemunculan unsur yang berlebih, seperti contohnya Fe. Penampakan Fe yang cukup besar ini kemungkinan disebabkan karena adanya kontaminasi dari cetakan terhadap sampel komposit ataupun ikut meleburnya pengaduk stir casting saat dilakukannya proses pengecoran komposit. Selain itu, kontaminasi juga disebabkan oleh oksigen, yang akan menyebabkan terjadinya oksidasi pada komposit. Kontaminasi oksigen ini terjadi mulai dari proses pembentukan, hingga *heat treatment*, dikarenakan setiap proses dilakukan pada ruang dengan udara terbuka.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Setelah dilakukan pengujian serta penelitian terhadap komposit Al 6061 berpenguat SiC, dapat diambil beberapa kesimpulan untuk menjawab tujuan dari penelitian ini. Adapun kesimpulan tersebut di antaranya,

1. Karakteristik dari komposit Al 6061 berpenguat SiC hasil *thixoforming* dan *artificial aging* adalah: memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi daripada Al 6061 murni hasil *casting*. Nilai kekerasan tertinggi diperoleh dari sampel komposit Al 6061-SiC reduksi ketebalan 4% dengan nilai rata-rata sebesar 50,6 HRB, sedangkan nilai kekerasan Al 6061 murni hasil *casting* hanya bernilai rata-rata 11,8 HRB. Sama halnya dengan tingkat ketangguhan, komposit Al 6061-SiC lebih unggul dibandingkan Al 6061 murni hasil *casting*. Komposit Al 6061-SiC reduksi ketebalan 4% memiliki nilai rata-rata ketangguhan sebesar 0,034 Joule/mm². Sedangkan Al 6061 murni hasil *casting* hanya memiliki nilai rata-rata 0,024 Joule/mm². Meskipun pada awal perbandingan ketangguhan, Al 6061 murni hasil *casting* memiliki nilai rata-rata yang lebih tinggi daripada komposit Al 6061-SiC reduksi ketebalan 2% dengan nilai rata-rata 0,021 Joule/mm². Komposit Al 6061-SiC bersifat cenderung getas, dikarenakan adanya penambahan penguat berbahan keramik yaitu SiC.
2. Pemberian reduksi ketebalan pada komposit Al 6061 berpenguat SiC cukup memberikan perubahan yang signifikan pada sifat mekaniknya. Perubahan tersebut di antaranya adalah peningkatan nilai ketangguhan dan kekerasan. Hal ini disebabkan karena proses *rolling* menghasilkan distribusi dislokasi yang tinggi dan heterogen yang diperlukan secara geometris di seluruh ketebalan material. Proses ini menimbulkan pengerasan regangan (*work hardening*) yang meningkatkan densitas dislokasi material, sehingga material akan lebih tahan terhadap deformasi yang diberikan.

3. Hubungan antara persen reduksi ketebalan dan sifat mekanik yang dihasilkan pada komposit Al 6061 berpenguat SiC adalah, semakin tinggi persen reduksi ketebalan, maka akan meningkatkan sifat mekanik komposit tersebut. Hal ini disebabkan karena, distribusi penguat yang ada pada komposit menjadi lebih merata, sehingga perpaduan antara matriks dan penguat menghasilkan peningkatan kekuatan yang signifikan.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan pada penelitian tentang komposit Al 6061 berpenguat SiC ini di antaranya adalah,

1. Menggunakan alat pengaduk otomatis pada saat proses *stir casting*, guna memperoleh kecepatan putar yang stabil dan penyebaran partikel yang lebih merata.
2. Menggunakan alat press yang lebih lengkap, seperti penambahan elemen pemanas dan indikator tekanan, sehingga pembentukan komposit akan menjadi lebih terukur.
3. Melakukan proses pembuatan sampel komposit dalam satu ruangan yang sama, sehingga mengurangi faktor kegagalan yang dapat merugikan hasil akhir dari sampel komposit.
4. Melakukan pengujian XRD pada setiap variabel sampel, guna mengetahui fasa yang hadir setelah *artificial aging*. Sehingga menghasilkan analisis yang lebih mendalam terhadap komposit Al 6061 berpenguat SiC.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. S. Wagola, "Manfaat Pemakaian Glass Fiber Reinforced Polimer (GFRP) pada Komponen Struktur Saluran Pracetak U-Ditch," Feb. 14, 2022. doi: 10.31219/osf.io/zdukv.
- [2] Lilin Hermawati, Sunu Arsy Pratomo, and Sugeng Hariyadi, "Penambahan Berat Sic Pada Komposit Matrik Aluminium Dalam Sifat Fisis Dan Mekanis Diperkuat Tib Sebagai Penghalus Butir," *J. Penelit. Rumpun Ilmu Tek.*, vol. 2, no. 2, pp. 200–211, Jun. 2023, doi: 10.55606/juprit.v2i2.1968.
- [3] K. R. Ahmad, S. B. Jamaluddin, L. B. Hussain, and Z. A. Ahmad, "The Influence of Alumina Particle Size on Sintered Density and Hardness of Discontinuous Reinforced Aluminum Metal Matrix Composite," *J. Teknol.*, Feb. 2012, doi: 10.11113/jt.v42.732.
- [4] N. H. Husain, A. H. Ahmad, and M. M. Rashidi, "An overview of thixoforming process," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 257, p. 012053, Oct. 2017, doi: 10.1088/1757-899X/257/1/012053.
- [5] N. Nayiroh, "Teknologi Material Komposit".
- [6] S. A. Rahmawaty, "Analisa Kekuatan Tarik dan Tekuk pada Komposit Fiberglass-Polyester Berpenguat Serat Gelas dengan Variasi Fraksi Volume Serat," *JTM-ITI J. Tek. Mesin ITI*, vol. 5, no. 3, p. 146, Dec. 2021, doi: 10.31543/jtm.v5i3.685.
- [7] R. F. Gibson, *Principles of Composite Material Mechanics*, 0 ed. CRC Press, 2007. doi: 10.1201/9781420014242.
- [8] M. E. Rahmasita, Moh. Farid, and H. Ardhyanta, "Analisa Morfologi Serat Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Bahan Penguat Komposit Absorpsi Suara," *J. Tek. ITS*, vol. 6, no. 2, pp. A787–A792, Oct. 2017, doi: 10.12962/j23373539.v6i2.24332.
- [9] A. Mortensen and J. Llorca, "Metal Matrix Composites," *Annu. Rev. Mater. Res.*, vol. 40, no. 1, pp. 243–270, Jun. 2010, doi: 10.1146/annurev-matsci-070909-104511.

- [10] I. W. Donald and P. W. McMillan, "Ceramic-matrix composites," *J. Mater. Sci.*, vol. 11, no. 5, pp. 949–972, May 1976, doi: 10.1007/BF00542312.
- [11] R.-M. Wang, S.-R. Zheng, and Y.-P. Zheng, *Polymer matrix composites and technology*. Woodhead Publishing Limited, 2011. doi: 10.1533/9780857092229.
- [12] P. Garg, A. Jamwal, D. Kumar, K. K. Sadasivuni, C. M. Hussain, and P. Gupta, "Advance research progresses in aluminium matrix composites: manufacturing & applications," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 8, no. 5, pp. 4924–4939, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.jmrt.2019.06.028.
- [13] K. Z. Hidayat, U. Budiarto, and K. Kiryanto, "Analisis Variasi Sudut Kampuh Single V-Butt Joint Las Mig pada Alumunium 6061 terhadap Kekuatan Tarik dan Kekerasan," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 9, no. 1, Art. no. 1, Oct. 2020.
- [14] 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/TiB₂/12_p," *J. Miner. Mater. Charact. Eng.*, vol. 09, no. 01, pp. 57–65, 2010, doi: 10.4236/jmmce.2010.91005.
- [15] S. A. Mohan Krishna, T. N. Shridha, and L. Krishnamurthy, "Experimental Investigations on Thermal Analysis and Thermal Characterization of Al 6061-Sic-Gr Hybrid Metal Matrix Composites," *Int. J. Mater. Sci.*, vol. 5, no. 2, pp. 54–66, 2015, doi: 10.12783/ijmsci.2015.0502.04.
- [16] T. Kimoto and J. A. Cooper, *Fundamentals of Silicon Carbide Technology: Growth, Characterization, Devices, and Applications*, 1st ed. Wiley, 2014. doi: 10.1002/9781118313534.
- [17] C. A. Zorman and R. J. Parro, "Micro- and nanomechanical structures for silicon carbide MEMS and NEMS," *Phys. Status Solidi B*, vol. 245, no. 7, pp. 1404–1424, Jul. 2008, doi: 10.1002/pssb.200844135.
- [18] B. C. Pai, G. Ramani, R. M. Pillai, and K. G. Satyanarayana, "Role of magnesium in cast aluminium alloy matrix composites," *J. Mater. Sci.*, vol. 30, no. 8, pp. 1903–1911, Apr. 1995, doi: 10.1007/BF00353012.

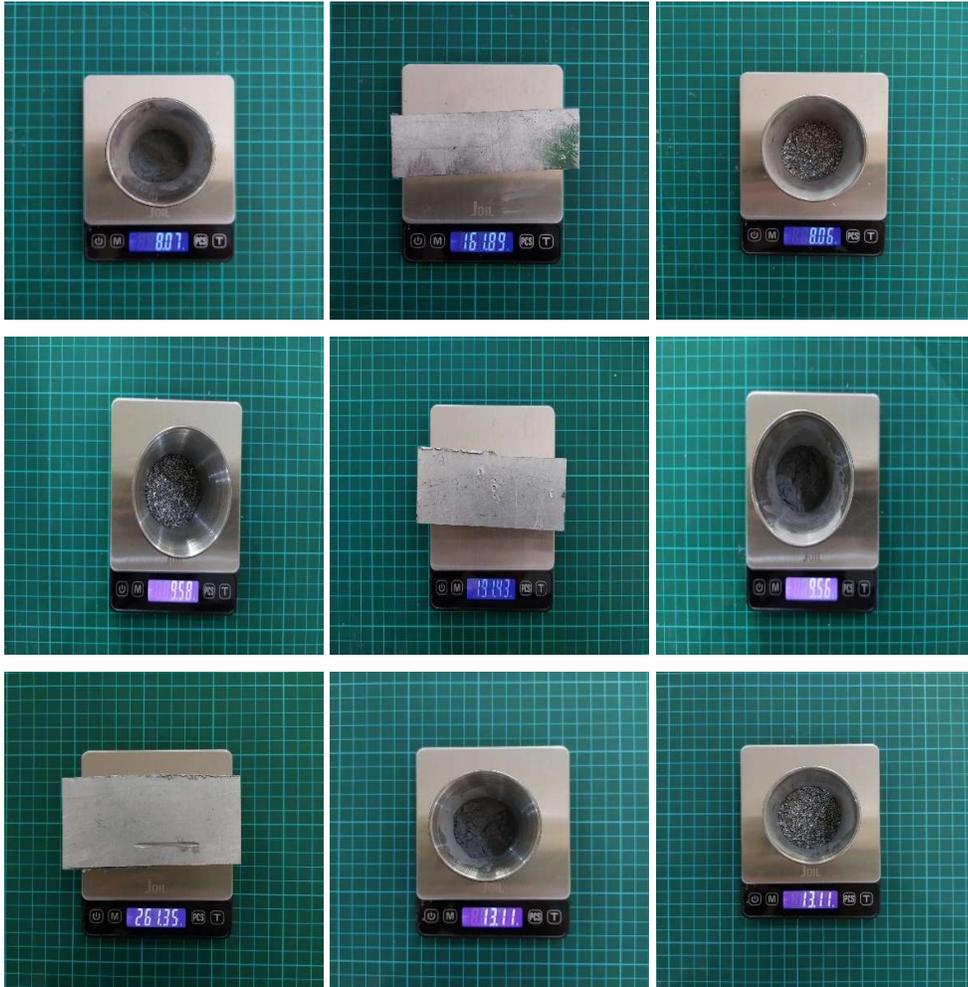
- [19] Y. Lu, M. Li, W. Huang, and H. Jiang, "Deformation behavior and microstructural evolution during the semi-solid compression of Al-4Cu-Mg alloy," *Mater. Charact.*, vol. 54, no. 4-5, pp. 423-430, May 2005, doi: 10.1016/j.matchar.2005.01.013.
- [20] M. Rosso, "Thixocasting and rheocasting technologies, improvements going on," *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.*, vol. 54, no. 1, 2012.
- [21] G. Hirt, R. Cremer, T. Witulski, and H.-C. Tinius, "Lightweight near net shape components produced by thixoforming," *Mater. Des.*, vol. 18, no. 4-6, pp. 315-321, Dec. 1997, doi: 10.1016/S0261-3069(97)00071-X.
- [22] O. Lashkari and R. Ghomashchi, "The implication of rheology in semi-solid metal processes: An overview," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 182, no. 1-3, pp. 229-240, Feb. 2007, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.08.003.
- [23] D. Prayitno and F. A. Apriandini, "Pengaruh Waktu Tahan pada Proses Artificial Aging Terhadap Kekerasan Paduan Al-Sn-Cu," *J. Penelit. DAN KARYA Ilm. Lemb. Penelit. Univ. TRISAKTI*, vol. 4, no. 1, pp. 1-5, Feb. 2019, doi: 10.25105/pdk.v4i1.4009.
- [24] A. R. Ridhowati, E. Febriyanti, and R. Riastuti, "Pengaruh Persentase Reduksi Warm Rolling Terhadap Sifat Mekanik Paduan Cu-Zn 70/30," vol. 16, 2016.
- [25] M. Kouzeli and A. Mortensen, "Size dependent strengthening in particle reinforced aluminium," *Acta Mater.*, vol. 50, no. 1, pp. 39-51, Jan. 2002, doi: 10.1016/S1359-6454(01)00327-5.
- [26] S. Anthreas, "Destructive Testing," in *Project Execution of Mega-Projects for the Oil and Gas Industries*, 1st ed., CRC Press, 2021, pp. 141-141. doi: 10.1201/9781003131656-45.
- [27] S. Sunarno and Z. Zainuddin, "Impact Test Analysis on Steel Metal Materials and Aluminum," *J. Soc. Res.*, vol. 2, no. 7, pp. 2378-2392, Jun. 2023, doi: 10.55324/josr.v2i7.1198.
- [28] J. Edwards, "Hardness Testing," in *Characterization of Materials*, 1st ed., E. N. Kaufmann, Ed., Wiley, 2012, pp. 1-9. doi: 10.1002/0471266965.com025.pub2.

- [29] W.-H. Wu, J.-C. Lee, and Y.-M. Wang, "A Study of Defect Detection Techniques for Metallographic Images," *Sensors*, vol. 20, no. 19, p. 5593, Sep. 2020, doi: 10.3390/s20195593.
- [30] D. N. Leonard, G. W. Chandler, and S. Seraphin, "Scanning Electron Microscopy," in *Characterization of Materials*, 1st ed., E. N. Kaufmann, Ed., Wiley, 2012, pp. 1–16. doi: 10.1002/0471266965.com081.pub2.
- [31] W. Püttgen, W. Bleck, G. Hirt, and H. Shimahara, "Thixoforming of Steels – A Status Report," *Adv. Eng. Mater.*, vol. 9, no. 4, pp. 231–245, Apr. 2007, doi: 10.1002/adem.200700006.
- [32] A. Lanzutti, J. Srnc Novak, F. De Bona, D. Bearzi, M. Magnan, and L. Fedrizzi, "Failure analysis of cemented carbide roller for cold rolling: Material characterisation, numerical analysis, and material modelling," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 116, p. 104755, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104755.
- [33] A. Anis, A. Y. Elnour, M. A. Alam, S. M. Al-Zahrani, F. AlFayez, and Z. Bashir, "Aluminum-Filled Amorphous-PET, a Composite Showing Simultaneous Increase in Modulus and Impact Resistance," *Polymers*, vol. 12, no. 9, p. 2038, Sep. 2020, doi: 10.3390/polym12092038.
- [34] J. A. Muñoz, M. Avalos, N. Schell, H. G. Brokmeier, and R. E. Bolmaro, "Comparison of a low carbon steel processed by Cold Rolling (CR) and Asymmetrical Rolling (ASR): Heterogeneity in strain path, texture, microstructure and mechanical properties," *J. Manuf. Process.*, vol. 64, pp. 557–575, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.jmapro.2021.02.017.
- [35] G. Falkinger, C. Reisecker, and S. Mitsche, "Analysis of the evolution of Mg₂Si precipitates during continuous cooling and subsequent re-heating of a 6061 aluminum alloy with differential scanning calorimetry and a simple model," *Int. J. Mater. Res.*, vol. 113, no. 4, pp. 316–326, Apr. 2022, doi: 10.1515/ijmr-2021-8443.
- [36] H. Farh, T. Ziar, H. Belghit, M. Khechba, A. E. Noua, and F. Serradj, "The Cold Rolling Effect on the Precipitation Sequence and Microstructural Changes of an Al-Mg-Si Alloy," *Defect Diffus. Forum*, vol. 397, pp. 51–58, Sep. 2019, doi: 10.4028/www.scientific.net/ddf.397.51.

- [37] S. Morankar, M. Mandal, N. Kourra, M. A. Williams, R. Mitra, and P. Srirangam, "X-Ray Tomography Study on Porosity and Particle Size Distribution in In Situ Al-4.5Cu-5TiB₂ Semisolid Rolled Composites," *JOM*, vol. 71, no. 11, pp. 4050–4058, Nov. 2019, doi: 10.1007/s11837-019-03385-z.
- [38] J. M. Kubiak, B. Li, M. Suazo, and R. J. Macfarlane, "Polymer Grafted Nanoparticle Composites with Enhanced Thermal and Mechanical Properties," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 14, no. 18, pp. 21535–21543, May 2022, doi: 10.1021/acsami.2c03797.
- [39] K. Ikeda and T. Kishi, "Matrix Grain Size Effect and Fracture Behavior on Bending Strength and Fracture Toughness in Multi-Toughened Al₂O₃," in *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, vol. 13, J. B. Wachtman, Ed., Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1994, pp. 164–171. doi: 10.1002/9780470313954.ch18.
- [40] Y. Wang and M. Hadfield, "Failure modes of ceramic rolling elements with surface crack defects," *Wear*, vol. 256, no. 1–2, pp. 208–219, Jan. 2004, doi: 10.1016/S0043-1648(03)00409-5.
- [41] H. Conrad and J. Narayan, "On the grain size softening in nanocrystalline materials," *Scr. Mater.*, vol. 42, no. 11, pp. 1025–1030, May 2000, doi: 10.1016/S1359-6462(00)00320-1.
- [42] T. Y. Reddy and E. Zhang, "Effect of Strain-Hardening on The Behaviour of Axially Crushed Cylindrical Tubes," in *Advances in Engineering Plasticity and its Applications*, Elsevier, 1993, pp. 755–762. doi: 10.1016/B978-0-444-89991-0.50101-3.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Dokumentasi *Stir Casting*



Lampiran 2. Dokumentasi *Thixoforming*



Lampiran 3. Dokumentasi Proses *Rolling*



Lampiran 4. Dokumentasi Hasil Uji Impak



Uji Impak Sampel Reduksi Ketebalan 2%



Uji Impak Sampel Reduksi Ketebalan 4%

Lampiran 5. Hasil Uji Kekerasan



Hasil Uji Kekerasan Sampel Reduksi Ketebalan 2%



Hasil Uji Kekerasan Sampel Reduksi 4%



Hasil Uji Kekerasan Sampel Reduksi 5%