

**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

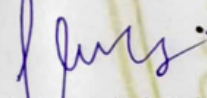
Dipersiapkan dan disusun Oleh :

Tristan Verrill Adam  
3331200006

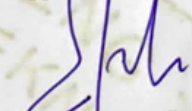
telah dipertahankan di depan Dewan Penguji  
pada tanggal, 25 September 2024

Pembimbing Utama

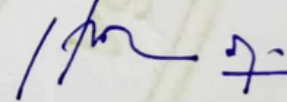
  
Prof. Dr. Eng. A. Ali Alhamidi, ST., MT.  
NIP.197312131999031001

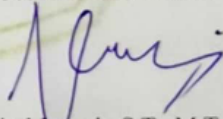
  
Miftahul Jannah, S.T., M.T.  
NIP. 199103052020122000

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

	<b>Halaman</b>
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	ii
<b>PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR</b> .....	iii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	iv
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	vi
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	viii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	ix
<b>ABSTRAK</b> .....	xi
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	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
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	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
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>		<b>22</b>
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
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>		<b>37</b>
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
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>		<b>59</b>
5.1	Kesimpulan.....	59
5.2	Saran .....	60
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>61</b>
<b>LAMPIRAN</b>		

## 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 penguatan 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/mm<sup>2</sup>, 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/mm<sup>2</sup>, 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.

## 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. Ardhyananta, “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/TiB<sub>2</sub>/12<sub>p</sub>," *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 Mg<sub>2</sub>Si 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-5TiB<sub>2</sub> 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 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>," 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.