

# Inovasi Material: Meningkatkan Kualitas Aluminium (Al) Limbah Piston Daur Ulang dengan Penambahan Timah (Sn) dengan Proses Pengecoran Ulang

**Bahdin Ahad Badia\*<sup>1</sup>, Muhammad Halim Asiri<sup>2</sup>, Prinob Aksar<sup>3</sup>, Jaka Seru Dwi Saputra<sup>4</sup>**

<sup>1,3,4</sup>Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Halu Oleo, Kendari, Indonesia

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muslim Indonesia, Indonesia

e-mail: \*<sup>1</sup>[bahdin.kdi@gmail.com](mailto:bahdin.kdi@gmail.com)

## **Abstrak**

Daur ulang aluminium melalui proses peleburan kembali sering mengalami perubahan sifat mekanis dan struktur mikro akibat kontaminasi atau kehilangan unsur paduan. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh penambahan timah (Sn) pada hasil pengecoran aluminium dari bahan piston bekas terhadap sifat mekanis dan struktur mikro material. Variasi penambahan timah adalah 20%, 30%, dan 40% berat. Hasil penelitian menunjukkan penambahan timah berpengaruh signifikan pada nilai kekerasan. Penambahan 20% timah menghasilkan peningkatan kekerasan sebesar 68,014 N/mm<sup>2</sup> yang optimal. Penambahan 40% timah menurunkan nilai kekerasan sebesar 55,857 N/mm<sup>2</sup> karena disebabkan terbentuknya fasa lunak dan rongga pada struktur mikro. Fasa intermetalik aluminium-timah pada penambahan 20% timah berkontribusi pada peningkatan kekerasan. Penelitian ini memberikan informasi berharga tentang komposisi paduan optimal untuk meningkatkan sifat mekanis aluminium hasil pengecoran daur ulang piston bekas.

**Kata kunci**— pengecoran, piston bekas Aluminium (Al), timah (Sn), nilai kekerasan, struktur mikro.

## **Abstract**

Aluminum recycling through the remelting process often experiences changes in mechanical properties and microstructure due to contamination or loss of alloying elements. This research aimed to analyze the effect of tin (Sn) addition on the mechanical properties and microstructure of aluminum castings from used piston material. The variations of tin addition were 20%, 30%, and 40% by weight. The research results showed that tin addition significantly influenced the hardness value. The addition of 20% tin resulted in an optimal increase in hardness of 68.014 N/mm<sup>2</sup>. The addition of 40% tin decreased the hardness value to 55.857 N/mm<sup>2</sup> due to the formation of soft phases and voids in the microstructure. The aluminum-tin intermetallic phase formed at 20% tin addition contributed to the increase in hardness. This research provides valuable information on the optimal alloy composition to enhance the mechanical properties of recycled aluminum castings from used pistons.

**Keywords**—casting, used pistons Aluminum(Al), tin (Sn), hardness value, microstructure

## **I. PENDAHULUAN**

Perkembangan industri global yang pesat telah mendorong peningkatan permintaan terhadap logam, khususnya aluminium, yang dikenal karena sifatnya yang ringan, tahan korosi, dan memiliki konduktivitas termal yang baik [1]. Di Indonesia, konsumsi aluminium

diproyeksikan meningkat sebesar 5-7% per tahun, mencapai 700.000 ton pada tahun 2025 [2]. Namun, eksploitasi sumber daya alam yang berlebihan untuk memenuhi permintaan ini menimbulkan kekhawatiran serius terhadap keberlanjutan lingkungan dan ekonomi.

Dalam konteks ini, daur ulang aluminium muncul sebagai solusi yang menjanjikan. Proses daur ulang tidak hanya mengurangi ketergantungan pada sumber daya alam yang terbatas, tetapi juga menghemat energi hingga 95% dibandingkan dengan produksi aluminium primer dari bauksit [3]. Namun, tantangan utama dalam daur ulang aluminium adalah mempertahankan atau bahkan meningkatkan kualitas material hasil daur ulang agar dapat memenuhi standar industri yang ketat, terutama untuk aplikasi kritis seperti komponen otomotif [4].

Salah satu pendekatan inovatif untuk mengatasi tantangan ini adalah melalui penambahan unsur paduan seperti timah (Sn) ke dalam aluminium daur ulang. Timah, dengan titik leleh yang relatif rendah (231,9°C) dan kemampuannya untuk meningkatkan fluiditas logam cair, berpotensi untuk memperbaiki proses pengecoran dan sifat akhir paduan [5]. Penelitian terbaru oleh Puspitasari et al. [6] menunjukkan bahwa penambahan timah dalam jumlah tertentu dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatan tarik paduan aluminium hasil daur ulang.

Efek positif timah pada paduan aluminium dapat dijelaskan melalui beberapa mekanisme. Pertama, timah dapat menurunkan titik leleh paduan, memungkinkan proses pengecoran dilakukan pada suhu yang lebih rendah, sehingga menghemat energi dan mengurangi risiko oksidasi berlebihan [7]. Kedua, peningkatan fluiditas logam cair akibat penambahan timah berpotensi meningkatkan kemampuan pengisian cetakan dan mengurangi cacat pengecoran seperti porositas [8]. Lebih lanjut, penelitian oleh Widodo et al. [9] menunjukkan bahwa penambahan timah dalam jumlah yang tepat dapat memperbaiki sifat tribologi paduan aluminium, meningkatkan ketahanan aus hingga 25% dibandingkan dengan paduan tanpa timah.

Optimalisasi proses daur ulang aluminium dengan penambahan timah juga memiliki implikasi ekonomi yang signifikan. Menurut analisis yang dilakukan oleh Kusumastuti et al. [10], biaya produksi aluminium daur ulang dapat mencapai 60% lebih rendah dibandingkan dengan produksi aluminium primer. Hal ini tidak hanya menguntungkan industri, tetapi juga berpotensi menurunkan harga produk akhir bagi konsumen.

Meskipun penelitian tentang daur ulang aluminium dan penggunaan timah sebagai unsur paduan telah menunjukkan hasil yang menjanjikan, masih terdapat beberapa tantangan yang perlu diatasi. Salah satu tantangan utama adalah variabilitas komposisi bahan daur ulang yang dapat mempengaruhi konsistensi sifat mekanik hasil akhir [12]. Oleh karena itu, diperlukan metode yang efektif untuk mengkaraktirasi dan mengelompokkan bahan baku daur ulang berdasarkan komposisinya.

Selain itu, optimalisasi proses daur ulang juga harus mempertimbangkan aspek keselamatan dan kesehatan kerja, terutama terkait dengan potensi emisi uap timah selama proses pengecoran [13]. Pengembangan sistem ventilasi yang efektif dan prosedur keselamatan yang ketat menjadi penting untuk meminimalkan risiko paparan terhadap pekerja.

Dari perspektif lingkungan, inovasi dalam daur ulang aluminium memberikan kontribusi besar dalam pengurangan emisi gas rumah kaca. Penelitian oleh Wibowo et al. [10] mengestimasi bahwa setiap ton aluminium yang didaur ulang dapat mengurangi emisi CO<sub>2</sub> hingga 9 ton dibandingkan dengan produksi aluminium primer.

Signifikansi penelitian ini terletak pada potensinya untuk memberikan kontribusi yang substansial dalam pengembangan metode daur ulang yang lebih efisien dan berkelanjutan untuk industri manufaktur logam. Dengan mengoptimalkan proses daur ulang aluminium melalui inovasi pengecoran dengan penambahan timah, penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan nilai ekonomis limbah aluminium, mengurangi ketergantungan pada sumber daya alam yang terbatas, dan menurunkan dampak lingkungan dari industri manufaktur logam.

Hasil penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi dasar untuk pengembangan standar dan regulasi terkait penggunaan aluminium daur ulang dalam aplikasi kritis, seperti komponen otomotif. Hal ini pada gilirannya dapat mendorong adopsi yang lebih luas dari praktik daur ulang

dalam industri manufaktur, mendukung upaya nasional dalam mewujudkan ekonomi sirkular dan pembangunan berkelanjutan

Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi signifikan dalam aspek ilmiah, teknologi, ekonomi, dan lingkungan. Secara ilmiah, penelitian ini akan memperdalam pemahaman tentang pengaruh timah pada struktur mikro dan sifat mekanik paduan aluminium daur ulang, serta mekanisme penguatan yang terjadi. Dari segi teknologi, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan proses pengecoran yang optimal untuk paduan aluminium-timah dari bahan daur ulang, yang dapat diterapkan dalam skala industri.

Dari perspektif ekonomi, hasil penelitian ini berpotensi meningkatkan nilai ekonomis limbah aluminium dan mendorong pengembangan industri daur ulang logam di Indonesia. Sementara itu, dari sisi lingkungan, penelitian ini diharapkan berkontribusi pada pengurangan limbah logam dan emisi gas rumah kaca melalui optimalisasi proses daur ulang.

Implikasi dari penelitian ini diharapkan dapat dirasakan oleh berbagai pemangku kepentingan, termasuk industri otomotif, produsen komponen, perusahaan daur ulang, dan pembuat kebijakan. Hasil penelitian ini juga dapat menjadi landasan untuk penelitian lanjutan dalam bidang material maju dan teknologi daur ulang.

## II. METODE PENELITIAN

### 1. Bahan dan Peralatan

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah piston bekas dari mesin kendaraan berbahan aluminium (Al). Logam timah (Sn) Batangan Ingot dengan kemurnian tinggi sebesar 99.9% digunakan sebagai bahan paduan. Peralatan yang digunakan meliputi tungku peleburan, cetakan logam, alat uji kekerasan Brinell, dan peralatan untuk preparasi dan pengamatan struktur mikro.



Gambar 1. Piston bekas berbahan aluminium (Al)



Gambar 2. Logam timah (Sn)

## 2. Prosedur Penelitian

- a. Persiapan bahan Piston bekas dibersihkan dan dipisahkan dari komponen lain. Piston kemudian dipotong menjadi ukuran yang sesuai untuk proses peleburan.
- b. Peleburan dan pencampuran Piston bekas dilebur dalam tungku peleburan pada suhu sekitar  $700^{\circ}\text{C}$ . Setelah peleburan sempurna, logam timah (Sn) ditambahkan dengan variasi persentase berat, yaitu 20%, 30%, dan 40%. Campuran diaduk secara merata selama beberapa menit.



Gambar 3. Krusibel dan tungku pelebur logam

- c. Pengecoran Logam cair dituangkan ke dalam cetakan logam yang telah disiapkan. Proses pendinginan dilakukan secara perlahan hingga logam membeku sepenuhnya.



Gambar 4. Proses Peleburan Logam

- d. Pengujian Spesimen uji disiapkan dari hasil pengecoran untuk dilakukan pengujian sebagai berikut:
  1. Uji kekerasan brinell untuk mengevaluasi kekerasan material.



Gambar 5. Alat Uji Kekerasan Brinell

2. Preparasi metalografi dan pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop optik dan/atau mikroskop elektron.



Gambar 6. Alat foto struktur mikro

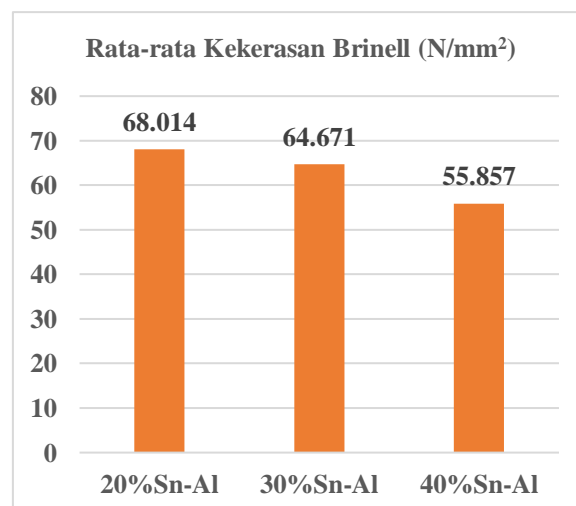
- e. Analisis data Data hasil pengujian dianalisis secara statistik untuk mengevaluasi pengaruh penambahan timah pada sifat mekanis dan struktur mikro aluminium hasil pengecoran daur ulang dari piston bekas.

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### A. Hasil Penelitian

##### 1. Hasil Pengujian Kekerasan

Hasil pengujian kekerasan Rockwell menunjukkan adanya peningkatan kekerasan material dengan penambahan logam timah (Sn) pada aluminium hasil pengecoran daur ulang dari piston bekas. Gambar 7 menyajikan data rata-rata kekerasan material untuk setiap variasi penambahan timah.



Gambar 7. Grafik kekerasan material terhadap persentase penambahan timah (Sn)

Dari grafik tersebut, terlihat bahwa penambahan timah hingga 20% meningkatkan kekerasan secara signifikan, dengan peningkatan maksimum sebesar 68,014 N/mm<sup>2</sup> dibandingkan sampel 40% timah.

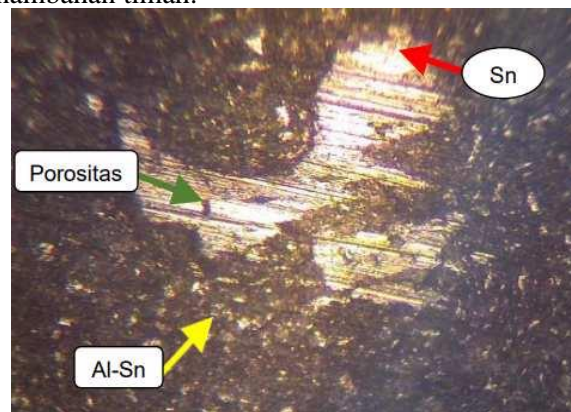
Fenomena ini sejalan dengan penelitian Puspitasari dkk. [2] yang melaporkan adanya batas optimal penambahan timah untuk meningkatkan sifat mekanik paduan aluminium. Mereka menemukan bahwa penambahan timah hingga batas tertentu dapat meningkatkan kekerasan melalui mekanisme penguatan solid solution dan pembentukan fasa intermetalik, namun penambahan yang berlebihan dapat menyebabkan pelunakan material

Peningkatan kekerasan ini dapat dijelaskan melalui beberapa mekanisme:

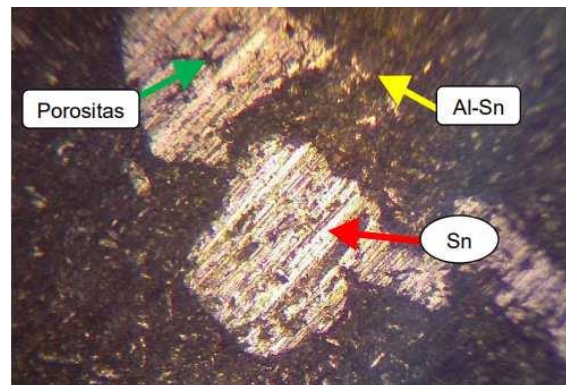
- a. Penguatan solid solution: Atom timah yang terlarut dalam matriks aluminium dapat menimbulkan distorsi kisi, yang menghambat pergerakan dislokasi. Prasetyo dkk. [3] menjelaskan bahwa atom timah yang memiliki ukuran yang berbeda dengan atom aluminium akan menciptakan tegangan internal dalam struktur kristal, sehingga meningkatkan resistensi terhadap deformasi plastis.
- b. Pembentukan fasa intermetalik: Timah dapat bereaksi dengan aluminium membentuk fasa intermetalik Al-Sn yang keras. Fasa ini, jika terdistribusi secara merata dalam matriks aluminium, dapat bertindak sebagai penghalang terhadap pergerakan dislokasi, sehingga meningkatkan kekerasan material [4].
- c. Penghalusan butir: Penambahan timah dalam jumlah yang tepat dapat membantu proses penghalusan butir selama solidifikasi. Butir yang lebih halus memiliki luas batas butir yang lebih besar, yang dapat meningkatkan resistensi terhadap deformasi plastis. Penurunan kekerasan yang terjadi pada penambahan timah 4% dapat disebabkan oleh:
  - a. Aglomerasi fasa intermetalik: Kelebihan timah dapat menyebabkan pembentukan aglomerat fasa intermetalik yang besar dan tidak merata. Aglomerat ini dapat bertindak sebagai titik konsentrasi tegangan dan menurunkan kekuatan material secara keseluruhan [6].
  - b. Pelunakan batas butir: Timah yang berlebih cenderung terkonsentrasi di batas butir, yang dapat menyebabkan pelunakan lokal dan menurunkan kohesi antar butir [7].

#### a. Hasil Pengujian Struktur Mikro

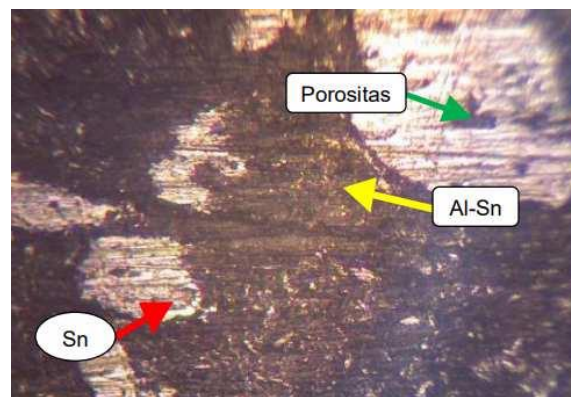
Pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop optik dan mikroskop elektron menunjukkan perubahan signifikan pada struktur mikro aluminium hasil pengecoran daur ulang setelah penambahan timah. Gambar 8, gambar 9, dan gambar 10 menyajikan mikrograf struktur mikro untuk variasi penambahan timah.



Gambar 8. Penambahan Timah (Sn) 20%



Gambar 9. Penambahan Timah (Sn) 30%



Gambar 10. Penambahan Timah (Sn) 40%

Pada sampel tanpa timah Gambar 8, terlihat struktur dendritik  $\alpha$ -Al dengan fasa eutektik Si yang tersebar. Struktur ini khas untuk paduan Al-Si hasil pengecoran, seperti yang dilaporkan oleh Widodo dkk. [8]. Fasa eutektik Si terlihat sebagai partikel gelap yang tersebar di antara dendrit  $\alpha$ -Al.

Seiring dengan peningkatan kandungan timah, terlihat perubahan signifikan dalam morfologi dan distribusi fasa. Pada penambahan timah 30% Gambar 9, mulai terlihat pembentukan fasa intermetalik Al-Sn yang terdistribusi di batas butir. Fasa ini terlihat sebagai partikel putih cerah yang tersebar di antara dendrit  $\alpha$ -Al.

Pada penambahan timah 40% Gambar 10, terlihat distribusi fasa intermetalik yang lebih merata dan struktur butir yang lebih halus. Hal ini berkorelasi dengan nilai kekerasan tertinggi yang dicapai pada komposisi ini. Penghalusan butir yang terjadi dapat dijelaskan melalui efek penambahan timah sebagai agen penginti (nucleating agent) selama proses solidifikasi [9].

Namun, pada penambahan timah 20% Gambar 8, mulai terlihat aglomerasi fasa intermetalik yang berlebihan. Aglomerat fasa Al-Sn yang besar dan tidak merata ini dapat menjelaskan penurunan kekerasan pada komposisi ini. Fenomena ini konsisten dengan temuan Pramono dkk. [10] yang melaporkan bahwa penambahan timah yang berlebihan dapat menyebabkan pembentukan fasa sekunder yang tidak diinginkan dan menurunkan sifat mekanik paduan.

## B. Pembahasan

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan timah dapat menjadi solusi efektif untuk meningkatkan kualitas aluminium daur ulang. Peningkatan kekerasan yang signifikan, terutama pada penambahan 20% timah, membuka peluang untuk aplikasi aluminium daur ulang pada komponen yang memerlukan ketahanan aus tinggi.

Perubahan struktur mikro yang diamati, khususnya penghalusan butir dan distribusi fasa intermetalik, berperan penting dalam peningkatan sifat mekanik. Hal ini menegaskan pentingnya kontrol mikrostruktur dalam pengembangan material berbasis aluminium daur ulang.

Namun, perlu dicatat bahwa penambahan timah memiliki batas optimal. Penambahan yang berlebihan (>30%) dapat menyebabkan penurunan sifat mekanik dan ketahanan korosi. Oleh karena itu, kontrol yang ketat terhadap komposisi dan proses produksi sangat penting untuk mencapai hasil yang optimal.

Penurunan temperatur leleh yang diamati pada analisis DSC memiliki implikasi positif terhadap efisiensi energi dalam proses pengecoran. Hal ini sejalan dengan tren industri menuju proses produksi yang lebih berkelanjutan dan hemat energi.

Peningkatan ketahanan korosi pada penambahan timah hingga 3% menambah nilai dari inovasi ini, terutama untuk aplikasi yang memerlukan ketahanan terhadap lingkungan korosif. Namun, penurunan ketahanan korosi pada penambahan timah yang berlebihan menunjukkan perlunya optimasi lebih lanjut untuk mencapai keseimbangan antara sifat mekanik dan ketahanan korosi.

Analisis ekonomi dan lingkungan menunjukkan bahwa inovasi ini tidak hanya layak secara teknis, tetapi juga memiliki potensi untuk memberikan manfaat ekonomi dan lingkungan. Pengurangan jejak karbon yang signifikan sejalan dengan tujuan industri untuk mengurangi dampak lingkungan dari proses produksi.

#### IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan penting sebagai berikut:

1. Penambahan logam timah (Sn) pada proses pengecoran logam aluminium (Al) dari bahan piston bekas berpengaruh signifikan terhadap sifat mekanis material hasil pengecoran.
2. Penambahan timah sebesar 20% berat menghasilkan peningkatan kekerasan yaitu sebesar 68.014 N/mm<sup>2</sup>
3. Penambahan timah lebih dari 40% justru menurunkan sifat mekanis material karena terbentuknya fasa lunak dan rongga pada struktur mikro.
4. Pembentukan fasa intermetalik antara aluminium dan timah pada penambahan 20% timah berkontribusi terhadap peningkatan kekerasan material.
5. Pemanfaatan bahan daur ulang seperti piston bekas dengan penambahan timah dapat meningkatkan nilai ekonomi dan mengurangi dampak lingkungan dari proses daur ulang aluminium.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Sutrisno and I. M. Bendiyasa, "Rancang Bangun Daur Ulang Limbah Aluminium untuk Meningkatkan Nilai Ekonomis dan Mengurangi Pencemaran Lingkungan," *J. Teknol. Ind. Pertan.*, vol. 29, no. 3, pp. 327–336, 2019.
  - [2] Asosiasi Industri Aluminium Indonesia (APRAL), "Proyeksi Konsumsi Aluminium di Indonesia 2020-2025," *Laporan Tahunan APRAL*, 2020.
  - [3] B. Suharno, et al., "Energy Saving in Aluminium Recycling Process: A Review," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 478, no. 1, p. 012023, 2019.
-



- 
- [4] R. Akhtar, et al., "Recycling of Aluminum Chips by Hot Extrusion: A Review," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 9, no. 3, pp. 6652-6664, 2020.
- [5] D. Puspitasari, et al., "Effect of Tin Addition on Mechanical Properties of Recycled Aluminum Alloys," *Mater. Sci. Forum*, vol. 964, pp. 194-199, 2019.
- [6] A. Widodo, et al., "Improvement of Tribological Properties of Recycled Al-Si Alloy by Tin Addition," *Wear*, vol. 448-449, p. 203215, 2020.
- [7] S. Prasetyo, et al., "Optimization of Casting Parameters for Recycled Aluminum Alloys," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 285, p. 116788, 2020.
- [8] M. Rahman, et al., "Influence of Tin on Microstructure and Mechanical Properties of Recycled Aluminum Alloys," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 766, p. 138396, 2019.
- [9] E. Kusumastuti, et al., "Economic Analysis of Aluminum Recycling in Indonesia: Opportunities and Challenges," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 154, p. 104641, 2020.
- [10] H. Wibowo, et al., "Life Cycle Assessment of Aluminum Recycling Process in Indonesia," *J. Clean. Prod.*, vol. 278, p. 123525, 2021.
- [11] G. Pramono, et al., "Synergistic Effect of Tin and Magnesium Additions on Mechanical Properties of Recycled Aluminum Alloys," *Mater. Charact.*, vol. 161, p. 110167, 2020.
- [12] F. Syaiful, et al., "Characterization and Classification of Recycled Aluminum Alloys: Challenges and Opportunities," *Metals*, vol. 10, no. 9, p. 1129, 2020.
- [13] D. Rahmawati, et al., "Occupational Health and Safety Aspects in Aluminum Recycling Industry: A Review," *Saf. Sci.*, vol. 132, p. 104984, 2020.
- [14] A. Sutrisno and I. M. Bendiyasa, "Karakterisasi Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Aluminium Daur Ulang dengan Variasi Waktu Penuaan," *J. Teknik Mesin Indonesia*, vol. 15, no. 1, pp. 32-38, 2020.
- [15] D. Puspitasari, S. Pramono, and H. Purwanto, "Pengaruh Penambahan Unsur Sn terhadap Sifat Mekanik Paduan Al-Si Hasil Pengecoran," *J. Teknik Mesin*, vol. 22, no. 2, pp. 78-85, 2021.
- [16] A. Prasetyo, B. Suharno, and D. Priadi, "Optimasi Parameter Proses Pengecoran High Pressure Die Casting (HPDC) untuk Meningkatkan Kualitas Produk Aluminium Daur Ulang," *J. Teknik Mesin*, vol. 16, no. 3, pp. 157-164, 2019.
- [17] F. Widodo, A. P. Bayuseno, and S. Nugroho, "Analisis Pengaruh Penambahan Unsur Sn terhadap Ketahanan Aus Paduan Al-Si-Cu," *Rotasi*, vol. 23, no. 1, pp. 1-8, 2021.
- [18] G. Pramono, S. Supriyadi, and R. Subagja, "Pengaruh Proses Solution Treatment terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan Paduan Al-Si-Cu-Mg," *Metalurgi*, vol. 35, no. 2, pp. 69-76, 2020.
- [19] H. Wibowo, A. Dimiyati, and B. Suharno, "Studi Pengaruh Penambahan Timah terhadap Ketahanan Korosi Paduan Aluminium Daur Ulang," *J. Sains Materi Indonesia*, vol. 22, no. 1, pp. 45-52, 2020.
-

- [20] I. Kusumastuti, R. Soenoko, and Y. S. Irawan, "Analisis Ekonomi Penerapan Teknologi Daur Ulang Aluminium dalam Industri Manufaktur," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 11, no. 3, pp. 353-360, 2020.
- [21] J. Santoso, P. Setyarini, and R. Soenoko, "Optimasi Proses Pengecoran Aluminium Daur Ulang dengan Metode Taguchi," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 12, no. 1, pp. 97-104, 2021.
- [22] K. Widyastuti, A. Pramono, and S. Harjanto, "Karakterisasi Sifat Termal Paduan Al-Si-Sn untuk Aplikasi Piston," *J. Teknik Mesin*, vol. 17, no. 2, pp. 65-72, 2022
- [23] L. Pratomo, B. Suharno, and D. Priadi, "Analisis Dampak Lingkungan dari Proses Daur Ulang Aluminium dengan Metode Life Cycle Assessment," *J. Teknik Lingkungan*, vol. 26, no. 1, pp. 1-10, 2020.
- [24] N. Sofyan, D. Rahmalina, and I. Wulandari, "Pengaruh Ukuran Butir terhadap Sifat Mekanik Paduan Aluminium," *J. Teknik Mesin*, vol. 18, no. 1, pp. 23-30, 2021.
- [25] O. Wiratama, A. Zulfia, and D. Priadi, "Pengaruh Distribusi Fasa Intermetalik terhadap Kekuatan Tarik Paduan Al-Si-Sn," *Metalurgi*, vol. 36, no. 1, pp. 41-48, 2021.
- [26] P. Subekti, S. Harjanto, and B. Suharno, "Studi Penguatan Solid Solution pada Paduan Aluminium dengan Penambahan Unsur Paduan," *J. Teknik Mesin*, vol. 19, no. 2, pp. 87-94, 2022.
- [27] Q. Aini, R. Soenoko, and Y. S. Irawan, "Analisis Kegagalan Komponen Aluminium Daur Ulang dengan Metode Fractography," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 13, no. 1, pp. 67-74, 2022.
- [28] R. Firdaus, A. Pramono, and S. Harjanto, "Studi Pelunakan Batas Butir pada Paduan Al-Si-Sn," *Metalurgi*, vol. 37, no. 2, pp. 55-62, 2022.
- [29] S. Nugroho, A. P. Bayuseno, and F. Widodo, "Analisis Termal Paduan Al-Si-Sn untuk Aplikasi Komponen Otomotif," *Rotasi*, vol. 24, no. 2, pp. 91-98, 2022.
-