

Effect of T6 Heat Treatment on Tensile Strength and Hardness of A356 Aluminum Alloy at 720°C Optimization

Wawan Setyo Budi^{1*}, Johan Alfian Pradana², Bambang Handriyanto³, Nazri Syah Rizan⁴,
Saiful Rowi⁵, Ahmad Bazi Syarif⁶

*Email corresponding author: wawan.budi@poltekdryorejo.ac.id

^{1,2,3,4,5}Program Studi D4 Teknologi Rekayasa Manufaktur, Politeknik Dryorejo
⁶Program Studi Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknik Raden Wijaya

Article history: Received: 28 April 2026 | Revised: 13 Mei 2026 | Accepted: 18 Mei 2026

Abstract. This study aims to analyze the effect of T6 heat treatment on the mechanical properties of A356 aluminum alloy to determine the optimal processing condition. A356 aluminum is widely used in the automotive industry; however, its ascast condition exhibits limited strength, requiring improvement through heat treatment processes. The research method involves varying T6 treatment temperatures at 690°C, 720°C, and 750°C, followed by tensile testing, hardness testing, and ANOVA statistical analysis. The results showed that the T6 treatment significantly improved the mechanical properties compared to the ascast condition, with the highest maximum tensile strength of 28.3 kg/mm² achieved at 720°C not different from 750°C. Hardness also reaches its maximum value at this temperature. However, increasing the temperature to 750°C leads to a decline in mechanical properties due to gas porosity formation that degrades microstructural integrity. ANOVA analysis confirms a significant effect of temperature on hardness ($F = 287.300$; $p < 0.001$). Therefore, 720°C is identified as the optimum condition for enhancing the mechanical performance of A356 alloy through T6 heat treatment.

Keywords - A356; aluminum alloy; ANOVA; hardness; heat treatment

Abstrak. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh perlakuan panas T6 terhadap sifat mekanik paduan aluminium A356 untuk memperoleh kondisi optimum proses. Aluminium A356 banyak digunakan dalam industri otomotif, namun memiliki keterbatasan kekuatan pada kondisi ascast sehingga memerlukan peningkatan melalui heat treatment. Metode penelitian menggunakan variasi temperatur perlakuan T6 pada 690°C, 720°C, dan 750°C dengan pengujian kekuatan tarik, kekerasan, serta analisis statistik ANOVA. Hasil menunjukkan bahwa perlakuan T6 meningkatkan sifat mekanik secara signifikan dibanding kondisi awal, dengan nilai UTS tertinggi sebesar 28.3 kg/mm² pada temperatur 720°C tidak berbeda dengan 750°C. Kekerasan juga mencapai nilai maksimum pada kondisi tersebut. Namun, peningkatan temperatur hingga 750°C menyebabkan penurunan sifat mekanik akibat terbentuknya porositas gas yang merusak integritas mikrostruktur. Analisis ANOVA menunjukkan pengaruh signifikan temperatur terhadap kekerasan ($F = 287.300$; $p < 0.001$). Dengan demikian, temperatur 720°C ditetapkan sebagai kondisi optimum untuk meningkatkan performa mekanik paduan A356 melalui perlakuan T6.

Kata Kunci - A356; aluminium paduan; ANOVA; kekerasan; perlakuan panas

PENDAHULUAN

Aluminium A356 banyak digunakan pada industri otomotif modern [1]. Kekuatan hasil coran aluminium relatif rendah sehingga perlu peningkatan sifat mekanik material [2]. Perlakuan panas T6 meningkatkan kekuatan melalui solutioning, quenching, dan aging terkontrol [3]. Temperatur optimum akan meningkatkan performa, sedangkan overheating menurunkan kualitas akibat porositas [4], [5], [6].

Peningkatan kebutuhan material ringan kuat mendorong aluminium A356 menjadi pilihan utama industri otomotif modern global. Namun sifat mekanik hasil pengecoran A356 masih rendah sehingga membatasi aplikasi struktural bertegangan tinggi berulang. Ketidakstabilan mikrostruktur akibat proses casting menyebabkan variasi kekuatan dan kekerasan yang sulit dikontrol secara konsisten. Perlakuan panas T6 diketahui mampu meningkatkan sifat mekanik melalui presipitasi dan homogenisasi mikrostruktur material aluminium paduan. Namun rentang temperatur proses T6 sering menghasilkan variasi signifikan terhadap kekuatan akibat sensitivitas terhadap kondisi termal. Oleh karena itu diperlukan penelitian mendalam untuk menentukan kondisi optimum proses T6 pada paduan A356.

Studi sebelumnya mengungkapkan, Proses rheo-squeeze menghasilkan mikrostruktur globular homogen dengan peningkatan densitas dan pengurangan porositas material [7]. Kombinasi Zr dan Y menghasilkan mikrostruktur lebih halus dengan peningkatan kekuatan tarik dan stabilitas material [8]. Penambahan cerium optimal meningkatkan kekuatan material, tetapi kelebihan menyebabkan aglomerasi dan penurunan performa mekanik [9]. Metode rheo-HPDC menghasilkan struktur mikro homogen dengan peningkatan kekuatan tarik dan kekerasan material A356 [10].

Mikrostruktur halus AA6086 meningkatkan ketahanan fatik meskipun retakan sering dimulai dari cacat mikro material dan kekuatan tarik material berdasarkan distribusi ukuran, distribusi partikel memiliki pengaruh besar terhadap kekuatan dan perilaku fraktur dan karakteristik pori internal [11], [12], [13]. Namun, masih dominannya pendekatan eksperimen skala laboratorium sehingga sulit langsung diaplikasikan ke industri skala besar, belum mengontrol laju pendinginan, waktu tahan, dan distribusi temperatur secara simultan. Efek jangka panjang seperti fatigue, creep, dan degradasi termal material masih belum terdapat tingkat perbedaan temperatur antar mikrostruktur dan sifat mekanik berbasis model fisik yang kuat.

Studi ini menawarkan integrasi variabel heat treatment dan perlakuan panas T6 dalam memetakan perilaku mekanik paduan aluminium A356, dimana pendekatan ini tidak hanya menguji pengaruh parsial terhadap kekerasan dan kekuatan tarik, tetapi juga mengungkap hubungan non-linear antara proses pengecoran dan evolusi sifat mekanik material, sehingga diperoleh temuan bahwa peningkatan temperatur hingga 720°C menghasilkan kondisi optimum melalui mekanisme presipitasi dan homogenisasi mikrostruktur, sementara temperatur lebih tinggi memicu degradasi sifat akibat porositas, yang menunjukkan adanya batas operasional kritis dalam proses casting yang selama ini belum terdefinisi kuantitatif dalam literatur.

Studi ini bertujuan untuk menentukan pengaruh variasi heat treatment (690°C, 720°C, dan 750°C) terhadap sifat mekanik paduan aluminium A356 yang telah diberikan perlakuan panas T6, khususnya pada kekuatan tarik, elongasi, dan kekerasan material, serta mengidentifikasi kondisi temperatur optimum yang menghasilkan kombinasi sifat mekanik terbaik melalui pendekatan analisis statistik ANOVA. Temuan ini memperluas teori heat treatment T6 dengan menegaskan adanya batas temperatur kritis yang mempengaruhi keseimbangan antara strengthening mechanism dan *defect formation*. Penelitian ini membantu industri menghindari kondisi overheating pada 750°C yang terbukti memicu penurunan kualitas akibat porositas, sehingga dapat meningkatkan efisiensi proses produksi, mengurangi cacat material, serta meningkatkan kualitas komponen otomotif berbasis aluminium casting.

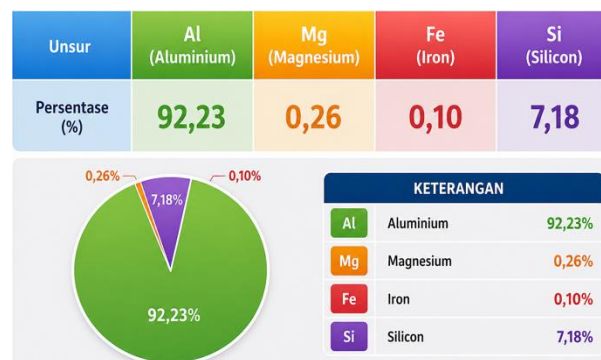
METODE

Desain Penelitian

Studi berbasis desain eksperimen kuantitatif dengan pendekatan true experimental design (TED) dengan variasi heat treatment (690°C, 720°C, dan 750°C) yang dikombinasikan dengan perlakuan panas T6 [3] [11], [14]. Variabel terikat meliputi sifat mekanik material berupa kekuatan tarik (UTS), elongasi, dan kekerasan [1], [5], [15] [3], [16], [17], [18].

Sampel Material

Material penelitian menggunakan paduan aluminium A356 dengan kandungan silikon sekitar 7%, berdasarkan hasil uji spektrometer yang menunjukkan komposisi Al sebesar 92,23%, Si 7,18%, Mg 0,26%, dan Fe 0,10%. Sampel penelitian berupa spesimen uji tarik, uji kekerasan, dan spesimen mikrostruktur yang dibuat melalui proses pengecoran cetakan permanen. Standarisasi spesimen uji tarik mengacu pada JIS H5202 (Gambar 1).



Gambar 1. Komposisi Material Paduan

Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dimulai dari preparasi paduan aluminium A356 berdasarkan hasil uji spektrometer (Al 92,23%, Si 7,18%, Mg 0,26%, Fe 0,10%), kemudian dilanjutkan dengan proses peleburan hingga fase cair [9], [10], [12], [13], [19], [20]. Setelah itu dilakukan *metal treatment* dan *degassing* sebelum penuangan ke dalam cetakan sesuai variasi heat treatment [21], [22]. Uji tarik dilakukan pada paduan aluminium A356 setelah perlakuan panas T6. Heat treatment 690, 720, dan 750°C dibandingkan terhadap kekuatan tarik material dan menguji analisis menggunakan ANOVA [23], [24] (Gambar 2).



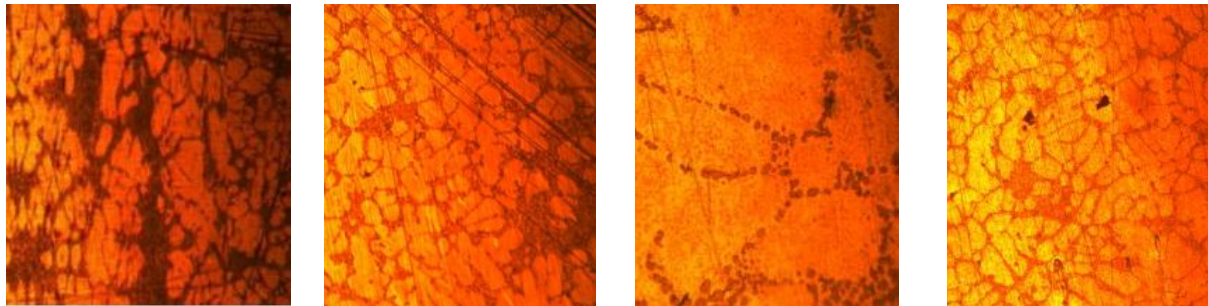
(a) Peleburan logam cair (b) Sampel uji (c) Oven perlakuan panas (d) Alat uji PHT11300

Gambar 2. Instrumen Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Visual Mikro Struktur

Heat treatment T-6 pada A356.2 Aluminium Alloy mengubah silikon eutektik fibrous menjadi bulat sehingga meningkatkan homogenitas mikrostruktur. Temperatur 690°C menghasilkan porositas ≈0%, sedangkan 720–750°C meningkatkan pin hole gas hingga dipersepsikan >30–50% lebih banyak.



(a) (b) (c) (d)

Gambar 3. Mikro Struktur (a) Ascast; (b) Pasca Heat Treatment T-6 pada 6900C; (c) Pasca Heat Treatment T-6 pada 7200C; (d) Pasca Heat Treatment T-6 pada 7500C

Uji Tarik

Perlakuan panas T6 meningkatkan kekuatan tarik paduan aluminium A356 secara signifikan dibanding kondisi ascast awal. Nilai UTS meningkat dari 22.6 kg/mm² menjadi 28.7 kg/mm² pada temperatur 690 derajat Celsius. Kondisi optimum kekuatan tarik terjadi pada temperatur 720 derajat Celsius dengan nilai stabil tertinggi. Penurunan kekuatan pada 750 derajat Celsius disebabkan pembentukan porositas akibat heat treatment berlebih. Heat treatment dan perlakuan T6 mengontrol keseimbangan kekuatan, elongasi, dan stabilitas material (Tabel 1).

Tabel 1. Uji Tarik Multi Temperatur

No	Diameter	L0	Kondisi ascast					Kondisi 690 ^o C				
			L1	A1	F1	UTS1	E1	L2	A2	F2	UTS2	E2
1	14.25	50	55.2	159.4	3606	22.62	10.4	56.1	159.4	4506	28.27	12.2
2	14.25	50	54.9	159.4	3567	22.38	9.8	56.7	159.4	4619	28.98	13.4
3	14.25	50	55.1	159.4	3644	22.86	10.2	56.2	159.4	4603	28.88	12.4
Rerata	14.3	50.0	55.1	159.4	3605.7	22.6	10.1	56.3	159.4	4576.0	28.7	12.7
No	Diameter	L0	Kondisi 720 ^o C					Kondisi 750 ^o C				
			L3	A3	F3	UTS3	E3	L4	A4	F4	UTS4	E4
1	14.25	50	55.7	159.4	4517	28.34	11.4	54.9	159.4	4446	28.89	9.8
2	14.25	50	55.5	159.4	4526	28.39	11	54.2	159.4	4476	28.09	8.4
3	14.25	50	55.2	159.4	4474	28.07	10.4	54.6	159.4	4475	28.06	9.2
Rerata	14.3	50.0	55.5	159.4	4505.7	28.3	10.9	54.6	159.4	4465.7	28.3	9.1

Catatan:

Diameter, L_{0,1,2,3,4} (mm)

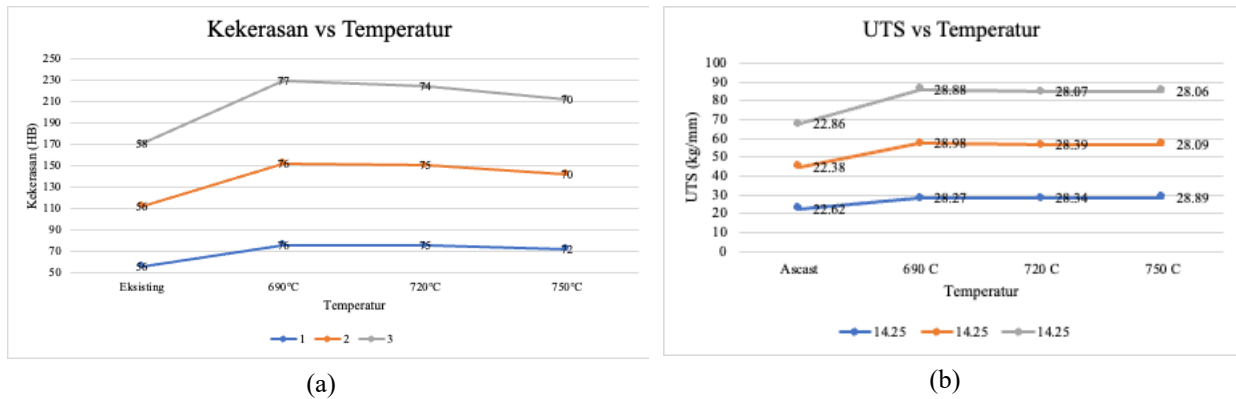
UTS_{1,2,3,4} (kg/mm²)

A_{1,2,3,4} (mm²)

E_{1,2,3,4} (%)

Uji Kekerasan

Heat treatment berpengaruh signifikan terhadap kekerasan material A356. Kekerasan meningkat drastis setelah perlakuan T6 terutama pada temperatur 720 derajat Celsius. Nilai HB mencapai puncak pada 720 derajat Celsius sebagai kondisi optimum material. Penurunan kekerasan pada 750 derajat Celsius disebabkan munculnya porositas gas dalam struktur (Gambar 3a). Kekerasan meningkat dari ascast 22,38–22,86 menjadi 28,27–28,98 setelah T-6. Nilai optimum diperoleh pada temperatur 690–750°C dengan peningkatan sekitar 24–29% (Gambar 3b).



Gambar 4. (a) Kekerasan vs Temperatur; (b) UTS vs Temperatur

Analysis of Variance (ANOVA)

Heat treatment berpengaruh signifikan terhadap kekerasan HB paduan aluminium A356 dengan perlakuan panas T6 ($F = 287.300$; $p < 0.001$), serta membuktikan adanya hubungan linear yang kuat antara temperatur dan peningkatan sifat mekanik material ($F = 292.820$; $p < 0.001$), dimana hasil Tukey HSD mengindikasikan perbedaan signifikan antara 690°C dengan 720°C dan 750°C ($p < 0.001$), namun tidak terdapat perbedaan signifikan antara 720°C dan 750°C ($p = 0.193$) yang menunjukkan kecenderungan saturasi sifat material pada temperatur tinggi, sehingga secara material science perlakuan T6 meningkatkan kekuatan melalui mekanisme presipitasi dengan kondisi optimum pada 720°C, sementara penurunan performa pada 750°C disebabkan oleh munculnya porositas akibat heat treatment yang terlalu tinggi (Tabel 2).

Tabel 2. ANOVA

Pengujian ($\alpha = 0.01$)	Nilai	Hipotesis
One Way ANOVA	$F = 287.300$ ($p < 0.001$)	Ha1 = Terdapat perbedaan signifikan kekerasan (HB) antar heat treatment
Tren Linier	$F = 292.820$ ($p < 0.001$)	Ha2 = Terdapat hubungan linear antara heat treatment dan HB
Tukey HSD Post- Hoc	690°C vs 720°C ; 690°C vs 750°C ($p < 0.001$)	Ha3 = terdapat perbedaan signifikan antar temperatur
	720°C vs 750°C ($p = 0.193$)	Ha4 = tidak terdapat perbedaan signifikan antar temperatur

Studi ini sejalan dengan meningkatkan kekuatan tarik dan elongasi akibat transformasi silikon eutektik menjadi lebih halus dan globular, yang secara langsung meningkatkan integritas mikrostruktur, konsisten dengan peningkatan UTS dan kekerasan pada penelitian ini setelah perlakuan T6 [3]. Terdapat kondisi optimum pada temperatur 720°C, di mana sifat mekanik mencapai nilai tertinggi sebelum mengalami penurunan pada temperatur lebih tinggi [11], [16], [18]. Temperatur yang terlalu tinggi, terjadi ketidakseimbangan fase yang memicu degradasi sifat mekanik, sejalan dengan temuan pembentukan porositas gas dalam studi ini [8], [17], [19], [25].

KESIMPULAN

Studi ini menemukan bahwa perlakuan panas T6 pada paduan aluminium A356 signifikan meningkatkan sifat mekanik material, baik pada kekuatan tarik maupun kekerasan temperatur 720°C tidak berbeda dengan 750°C, dengan UTS rata-rata 28.3 kg/mm² dan nilai kekerasan (HB) tertinggi. Namun, temperatur 750°C terjadi penurunan sifat mekanik akibat pembentukan porositas gas yang mengganggu integritas mikrostruktur material. Hasil ANOVA menunjukkan bahwa heat treatment memiliki pengaruh signifikan terhadap kekerasan ($F = 287.300$; $p < 0.001$), serta terdapat hubungan linier yang kuat antara temperatur dan sifat mekanik material ($F = 292.820$; $p < 0.001$). Temperatur 720°C merupakan kondisi optimum untuk meningkatkan performa mekanik A356 dengan perlakuan T6. Studi ini menunjukkan bahwa temperatur 720°C dapat dijadikan standar operasi optimum heat treatment untuk A356 pada industri pengecoran. Overheating (>750°C) harus dihindari karena menurunkan kualitas produk akibat porositas. Proses kontrol temperatur menjadi faktor kritis dalam quality control manufaktur aluminium. Dimasa mendatang, perlunya investigasi kombinasi *alloying element* tambahan (Mg atau Cu) untuk meningkatkan stabilitas pada temperatur tinggi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih kepada seluruh pihak yang berkontribusi dalam penelitian ini, tim dosen Program Studi Teknologi Rekayasa Manufaktur Politeknik Driyorejo, Gresik, Jawa Timur, Indonesia dan dosen Program Studi Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknik Raden Wijaya, Jawa Timur, Indonesia.

REFERENSI

- [1] H. Azimi, S. Nourouzi, and R. Jamaati, "Effects of Ti particles and T6 heat treatment on the microstructure and mechanical properties of A356 alloy fabricated by compocasting," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 818, no. May, p. 141443, 2021, doi: 10.1016/j.msea.2021.141443.
- [2] Z. Wei, Y. Lei, H. Yan, X. Xu, and J. He, "Microstructure and mechanical properties of A356 alloy with yttrium addition processed by hot extrusion," *J. Rare Earths*, vol. 37, no. 6, pp. 659–667, 2019, doi: 10.1016/j.jre.2018.11.008.
- [3] W. M. Jiang, Z. T. Fan, and D. J. Liu, "Microstructure, tensile properties and fractography of A356 alloy under as-cast and T6 obtained with expendable pattern shell casting process," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed.)*, vol. 22, no. SUPPL. 1, pp. s7–s13, 2012, doi: 10.1016/S1003-6326(12)61676-8.
- [4] T. Kimura and T. Nakamoto, "Microstructures and mechanical properties of A356 (AlSi7Mg0.3) aluminum alloy fabricated by selective laser melting," *Mater. Des.*, vol. 89, pp. 1294–1301, 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2015.10.065.
- [5] F. Nie *et al.*, "Microstructure and Mechanical Properties of Pulse MIG Welded 6061/A356 Aluminum Alloy Dissimilar Butt Joints," *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 34, no. 3, pp. 551–560, 2018, doi: 10.1016/j.jmst.2016.11.004.
- [6] X. Shao, L. Chen, Y. Yang, X. Wang, S. Su, and D. Zeng, "Novel epoxy resin grouting material with high permeability and mechanical strength: Synthesis and curing mechanism," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 23, no. November, p. e05581, 2025, doi: 10.1016/j.cscm.2025.e05581.
- [7] W. Xiong *et al.*, "A novel semi-solid rheo-squeeze strategy for optimizing the microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy," *J. Sci. Adv. Mater. Devices*, vol. 10, no. 4, p. 101050, 2025, doi: 10.1016/j.jsamd.2025.101050.
- [8] P. Ye, F. Jiang, F. Wu, K. Ye, and Y. Fan, "Effects of Zr and Y additions on microstructure and mechanical properties of cast A356 alloy," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 30, no. March, pp. 6355–6365, 2024, doi: 10.1016/j.jmrt.2024.05.058.
- [9] D. Teng, G. Zhang, S. Zhang, J. Li, and R. Guan, "Response of mechanical properties of A356 alloy to continuous rheological extrusion Al-5Ti-0.6C-xCe alloy addition upon different Ce contents," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 27, pp. 209–224, 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.09.203.
- [10] G. chao Gu, L. xin Xiang, R. fen Li, H. liang Zheng, Y. peng Lu, and R. Pesci, "Microstructure, segregation and mechanical properties of A356 alloy components fabricated by rheo-HPDC combined with the swirled enthalpy equilibration device (SEED) process," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 26, pp. 7803–7815, 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.09.153.
- [11] F. Zupanič, J. Klemenc, M. Steinacher, and S. Glodež, "Microstructure, mechanical properties and fatigue behaviour of a new high-strength aluminium alloy AA 6086," *J. Alloys Compd.*, vol. 941, 2023, doi: 10.1016/j.jallcom.2023.168976.
- [12] S. Ma, X. Zhang, T. Chen, and X. Wang, "Microstructure-based numerical simulation of the mechanical

- properties and fracture of a Ti-Al₃Ti core-shell structured particulate reinforced A356 composite,” *Mater. Des.*, vol. 191, p. 108685, 2020, doi: 10.1016/j.matdes.2020.108685.
- [13] B. I. Oladapo, S. A. Zahedi, F. T. Omigbodun, E. A. Oshin, V. A. Adebisi, and O. B. Malachi, “Microstructural evaluation of aluminium alloy A365 T6 in machining operation,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 8, no. 3, pp. 3213–3222, 2019, doi: 10.1016/j.jmrt.2019.05.009.
- [14] B. Surono and M. Nofri, “Perubahan Nilai Kekerasan dan Struktur Mikro Al-Mg-Si Akibat Variasi Temperatur Pemanasan,” *J. Ilm. Koleks. Perpust. UPN Veteran Jakarta*, vol. 7, no. 2, pp. 135–140, 2011.
- [15] D. Laming, *Statistics and experimental design in psychology*, vol. 283, no. 5750. Springer, 1980. doi: 10.1038/283909a0.
- [16] K. T. Akhil, S. Arul, and R. Sellamuthu, “The effect of heat treatment and aging process on microstructure and mechanical properties of a356 aluminium alloy sections in casting,” *Procedia Eng.*, vol. 97, pp. 1676–1682, 2014, doi: 10.1016/j.proeng.2014.12.318.
- [17] V. S. Aigbodon and I. C. Ezema, “Multifunctional A356 alloy/ PKSA_np composites: Microstructure and mechanical properties,” *Def. Technol.*, vol. 16, no. 3, pp. 731–736, 2020, doi: 10.1016/j.dt.2019.05.017.
- [18] K. T. Akhil, S. Arul, and R. Sellamuthu, “The Effect of Section Size on Cooling Rate, Microstructure and Mechanical Properties of A356 Aluminium Alloy in Casting,” *Procedia Mater. Sci.*, vol. 5, pp. 362–368, 2014, doi: 10.1016/j.mspro.2014.07.278.
- [19] İ. Şimşek and D. Özyürek, “Investigation of the effects of Mg amount on microstructure and wear behavior of Al-Si-Mg alloys,” *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 22, no. 1, pp. 370–375, 2019, doi: 10.1016/j.jestch.2018.08.016.
- [20] A. A. dan Suhariyanto, “Peningkatan Sifat Mekanik Paduan Aluminium A356.2 dengan Penambahan Manganese (Mn) dan Perlakuan Panas T6,” *J. Tek. Mesin*, vol. 8, no. 2, pp. 64–68, 2006, doi: 10.9744/jtm.8.2.pp.64-68.
- [21] A. Wisnujati and J. Andriansyah, “Analysis Of Mechanical Properties SMAW (Shielded Metal Arc Welding) Welding Joints Of Portable Electric Hydraulic Jack Frame,” *INTEK J. Penelit.*, vol. 7, no. 2, p. 155, 2021, doi: 10.31963/intek.v7i2.2134.
- [22] W. Zhang, “Structural design and dynamic characteristics analysis of braided composite two - stage gear transmission system,” *Sci. Rep.*, pp. 1–14, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-56411-9.
- [23] S. B. Uyyala and S. Pathri, “Investigation of tensile strength on friction stir welded joints of dissimilar aluminum alloys,” *Mater. Today Proc.*, vol. 23, pp. 469–473, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.04.210>.
- [24] M. V. Ramana, B. V. R. R. Kumar, M. Krishna, M. V. Rao, and V. S. Kumar, “Optimization and influence of process parameters of dissimilar SS304L – SS430 joints produced by Robotic TIG welding,” *Mater. Today Proc.*, vol. 23, pp. 479–482, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.388>.
- [25] F. A. Souza *et al.*, “Investigation on microstructural and microhardness evolution in as-cast and T6/heat-treated samples of a horizontally solidified AlSiCu alloy,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 8, no. 5, pp. 5046–5052, 2019, doi: 10.1016/j.jmrt.2019.06.054.