

Pengaruh Penambahan Unsur Tembaga Pada Pengecoran Aluminium Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro

Devi Wulandari^{1*}, Tumpal Ojahan Rajagukguk², Anang Ansyori³ dan Kusno Isnugroho⁴

^{1*, 2, 3} Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Malahayati, Kemiling Bandar Lampung; email: deviwan9@gmail.com, tumpalojahanmalahayati2@gmail.com

⁴ Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Tanjung Bintang, Lampung Selatan.

Penulis : Devi Wulandari

Abstract: *This study aims to analyze the effect of copper (Cu) addition on the mechanical properties and microstructure of cast aluminum. Aluminum has the advantages of low density, good corrosion resistance, and easy to form, but its hardness and strength are still limited so that the addition of alloying elements is necessary. In this study, 1000 grams of aluminum was mixed with 200 grams of copper through a casting process using an induction furnace. The casting was carried out twice and one of the casting results had surface defects. The cast specimens were then prepared for Vickers hardness testing and microstructural observation. The hardness test results showed values at three test points of 118 HV, 119 HV, and 135 HV, with an average value of 124 HV. The difference in hardness values indicates that the distribution of Cu in the aluminum matrix is not completely even. The results of microstructural observations at 20x and 40x magnification showed the presence of light and dark areas that were not uniformly distributed. The light area is suspected to be the α -Al phase, while the dark area is suspected to be the Cu-rich phase or Al₂Cu phase formed during the solidification process. Based on these results, copper addition can increase the hardness of cast aluminum. However, the mixing process, temperature control, and casting control still need to be improved to achieve a more uniform microstructure and mechanical properties.*

Keywords: *Aluminium; copper; casting; Vickers hardness; microstructure.*

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan unsur tembaga (Cu) terhadap sifat mekanik dan struktur mikro aluminium hasil pengecoran. Aluminium memiliki keunggulan berupa massa jenis rendah, ketahanan korosi yang baik, serta mudah dibentuk, namun kekerasan dan kekuatannya masih terbatas sehingga diperlukan penambahan unsur paduan. Pada penelitian ini, aluminium sebanyak 1000 gram dicampur dengan tembaga sebanyak 200 gram melalui proses pengecoran menggunakan tungku induksi. The casting was carried out twice and one of the casting results had surface defects. Spesimen hasil coran kemudian dipreparasi untuk dilakukan pengujian kekerasan Vickers dan pengamatan struktur mikro. Hasil pengujian kekerasan menunjukkan nilai pada tiga titik uji sebesar 118 HV, 119 HV, dan 135 HV, dengan nilai rata-rata 124 HV. Perbedaan nilai kekerasan tersebut menunjukkan bahwa distribusi Cu dalam matriks aluminium belum sepenuhnya merata. Hasil pengamatan struktur mikro pada pembesaran 20x dan 40x menunjukkan adanya daerah terang dan gelap yang tersebar tidak seragam. Daerah terang diduga sebagai fasa α -Al, sedangkan daerah gelap diduga sebagai fasa kaya Cu atau fasa Al₂Cu yang terbentuk selama proses pembekuan. Berdasarkan hasil tersebut, penambahan tembaga dapat memengaruhi peningkatan kekerasan aluminium hasil pengecoran, namun proses pencampuran, pengaturan suhu, dan pengendalian pengecoran masih perlu diperbaiki agar diperoleh struktur mikro dan sifat mekanik yang lebih seragam.

Kata kunci: Aluminium; tembaga; pengecoran; kekerasan Vickers; struktur mikro.

1. Pendahuluan

Aluminium merupakan logam non-ferro yang banyak digunakan dalam bidang teknik karena ringan, tahan korosi, mudah dibentuk, dan mudah diproses melalui pengecoran. Material ini banyak dipakai pada industri otomotif, konstruksi, komponen mesin, dan sebagainya. Namun, Aluminium murni memiliki kekuatan dan kekerasan yang masih rendah, sehingga perlu ditambahkan unsur paduan untuk meningkatkan sifat mekaniknya [1]. Salah satu unsur yang sering digunakan adalah tembaga, karena dapat membantu

Diterima: May 18, 2026
Direvisi: May 26, 2026
Diterima: May 29, 2026
Diterbitkan: July 2, 2026
Versi sekarang: July 12, 2026



Hak cipta: © 2026 oleh penulis.
Diserahkan untuk kemungkinan publikasi akses terbuka berdasarkan syarat dan ketentuan lisensi Creative Commons Attribution (CC BY SA) (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

meningkatkan kekerasan dan kekuatan Aluminium melalui pembentukan fasa penguat pada struktur mikro [2].

Paduan Aluminium-tembaga atau Al-Cu memiliki sifat mekanik yang lebih baik dibandingkan Aluminium murni. Penambahan Cu dapat membentuk fasa intermetalik seperti Al_2Cu , yang berperan menghambat perubahan bentuk pada material sehingga Aluminium menjadi lebih keras dan kuat [3]. Namun, hasil peningkatan tersebut sangat bergantung pada merata atau tidaknya penyebaran Cu di dalam Aluminium.

Beberapa metode dapat digunakan untuk meningkatkan sifat Aluminium, seperti perlakuan panas, proses termomekanik, manufaktur aditif, dan pengecoran. Perlakuan panas dan proses termomekanik dapat memperbaiki struktur mikro, tetapi prosesnya lebih rumit dan membutuhkan kontrol yang ketat [4]. Manufaktur aditif dapat menghasilkan bentuk yang lebih fleksibel, tetapi parameternya harus dikendalikan dengan baik agar hasilnya stabil [2]. Dibandingkan metode tersebut, pengecoran lebih sederhana dan umum digunakan. Dalam proses pengecoran, kualitas material sangat dipengaruhi oleh suhu peleburan, pencampuran, penuangan, dan pendinginan [5].

Masalah utama dalam penelitian ini adalah kemungkinan penyebaran Cu yang belum merata pada Aluminium hasil pengecoran. Jika Cu tidak tercampur dengan baik, struktur mikro menjadi tidak seragam dan nilai kekerasan dapat berbeda pada setiap bagian spesimen. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan Cu terhadap kekerasan Vickers dan struktur mikro Aluminium hasil pengecoran menggunakan tungku induksi.

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen. Aluminium dan tembaga dilebur menggunakan tungku induksi, kemudian hasil coran diuji melalui uji kekerasan Vickers dan pengamatan struktur mikro. Uji Vickers digunakan untuk mengetahui ketahanan material terhadap perubahan bentuk lokal, sedangkan pengamatan struktur mikro digunakan untuk melihat sebaran matriks Aluminium dan kemungkinan fasa penguat akibat penambahan Cu [6].

Kontribusi penelitian ini adalah memberikan gambaran tentang pengaruh Cu terhadap kekerasan dan struktur mikro Aluminium hasil pengecoran. Hasil pengujian menunjukkan nilai kekerasan sebesar 118 HV, 119 HV, dan 135 HV, dengan rata-rata 124 HV. Perbedaan nilai tersebut menunjukkan bahwa kekerasan spesimen belum merata. Hasil struktur mikro juga menunjukkan adanya daerah terang dan gelap yang tersebar tidak seragam, yang diduga sebagai matriks Aluminium dan fasa penguat akibat penambahan Cu. Temuan ini dapat menjadi dasar untuk penelitian selanjutnya, terutama dalam pengaturan komposisi Cu, kontrol suhu pengecoran, dan peningkatan proses pencampuran.

2. Tinjauan Literatur

Dalam aplikasi teknik, Aluminium tidak hanya dipilih karena ringan, tetapi juga karena mampu dikembangkan menjadi material dengan performa yang lebih tinggi melalui pengaturan komposisi dan proses pembuatannya. Sifat akhir Aluminium sangat dipengaruhi oleh unsur paduan, perlakuan proses, serta struktur mikro yang terbentuk. Oleh karena itu, kajian mengenai Aluminium paduan penting dilakukan untuk mengetahui hubungan antara komposisi, proses pengecoran, struktur mikro, dan sifat mekanik yang dihasilkan [7].

2.1 Tembaga sebagai Unsur Paduan pada Aluminium

Tembaga merupakan salah satu unsur paduan yang sering ditambahkan ke dalam Aluminium untuk meningkatkan sifat mekaniknya. Aluminium murni memang memiliki keunggulan dari segi berat yang ringan dan ketahanan korosi, tetapi kekuatannya masih terbatas. Penambahan Cu dapat membantu meningkatkan kekuatan Aluminium karena unsur ini dapat larut di dalam matriks Aluminium dan ikut memengaruhi susunan struktur mikronya. Dalam paduan Aluminium, Cu juga dikenal sebagai unsur utama pada kelompok paduan seri 2xxx, yaitu kelompok paduan Aluminium yang banyak digunakan karena memiliki kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan Aluminium murni [8]. Pengaruh Cu terhadap Aluminium tidak hanya terlihat dari peningkatan kekuatan, tetapi juga dari perubahan struktur mikro yang terbentuk. Ketika Cu ditambahkan ke dalam Aluminium, unsur ini dapat membentuk fasa intermetalik, salah satunya fasa Al_2Cu . Fasa ini berperan sebagai fasa penguat karena dapat menghambat pergerakan dislokasi di dalam material. Dislokasi sendiri berhubungan dengan perubahan bentuk pada logam; jika pergerakannya terhambat, maka material akan menjadi lebih keras dan lebih kuat. Oleh karena

itu, keberadaan fasa Al_2Cu menjadi salah satu alasan utama mengapa paduan Al-Cu memiliki sifat mekanik yang lebih baik dibandingkan Aluminium tanpa penambahan Cu [9].

2.2 Sifat Mekanik Aluminium

Sifat mekanik Aluminium menunjukkan kemampuan material saat menerima beban, tekanan, atau gaya dari luar. Beberapa sifat yang biasa diperhatikan adalah kekerasan, kekuatan tarik, keuletan, dan ketahanan terhadap deformasi [10]. Kekerasan menjadi salah satu sifat mekanik yang penting pada Aluminium hasil pengecoran. Kekerasan menggambarkan kemampuan permukaan material dalam menahan penekanan atau perubahan bentuk lokal. Pada Aluminium paduan, nilai kekerasan dapat dipengaruhi oleh komposisi unsur paduan, fasa yang terbentuk, dan kondisi struktur mikro. Penelitian pada sistem paduan Al-Cu menunjukkan bahwa peningkatan kandungan Cu dapat memengaruhi nilai kekerasan, terutama karena adanya penguatan larutan padat dan pembentukan fasa $\text{CuAl}_2/\text{Al}_2\text{Cu}$ di dalam struktur material [11].

2.3 Hubungan Antara Al-Cu

Pada paduan Aluminium yang mengandung tembaga, fasa yang paling berperan dalam peningkatan kekerasan adalah fasa Al_2Cu . Fasa ini dapat terbentuk akibat adanya Cu di dalam Aluminium dan berfungsi sebagai penghambat pergerakan dislokasi. Dislokasi adalah pergeseran kecil di dalam susunan logam yang menyebabkan material mudah berubah bentuk. Ketika pergerakan dislokasi terhambat, material menjadi lebih sulit mengalami deformasi, sehingga kekerasannya meningkat. Penelitian Rashed et al. menunjukkan bahwa peningkatan kandungan Cu dapat meningkatkan jumlah fasa intermetalik, terutama Al_2Cu , dan kenaikan fasa tersebut berhubungan dengan peningkatan nilai kekerasan pada paduan Aluminium [12].

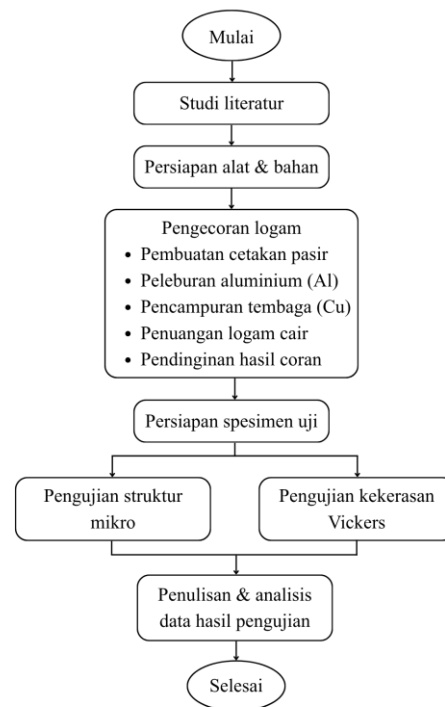
Ukuran dan bentuk struktur mikro juga berpengaruh terhadap kekerasan. Struktur yang lebih halus umumnya membuat material lebih kuat karena batas butir dan fasa penguat dapat menahan pergerakan dislokasi dengan lebih baik. Sebaliknya, struktur yang kasar atau tidak merata dapat membuat sifat mekanik material menjadi kurang stabil. Pada material hasil pengecoran, perubahan suhu peleburan, laju pendinginan, dan proses pencampuran dapat menyebabkan ukuran butir serta sebaran fasa berbeda pada tiap bagian. Kajian tentang desain komposisi paduan Aluminium cor menjelaskan bahwa pengaturan komposisi kimia dan distribusi unsur paduan digunakan untuk memperbaiki mikrostruktur dan sifat mekanik material hasil pengecoran [13].

3. Metode

3.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimen yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan unsur tembaga terhadap sifat mekanik dan struktur mikro Aluminium hasil pengecoran. Penelitian dilakukan dengan memberikan variasi kadar Cu pada Aluminium. Pengamatan struktur mikro untuk melihat perubahan bentuk butir, distribusi fasa, serta kemungkinan terbentuknya senyawa intermetalik akibat penambahan Cu.

3.2 Diagram Alir Penelitian



Gambar 1. Diagram alir penelitian

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini dilakukan dengan beberapa tahap yaitu mengumpulkan teori dan referensi yang berkaitan dengan Aluminium, tembaga, proses pengecoran, pengujian kekerasan, dan struktur mikro. Pada tahap ini disiapkan bahan berupa Aluminium dan tembaga, dengan menggunakan alat seperti tungku peleburan, cetakan pasir, alat pemotong, alat poles. Proses pengecoran diawali dengan pembuatan cetakan pasir. Selanjutnya Aluminium dilebur hingga mencair, kemudian tembaga ditambahkan. Komposisi aluminium yang digunakan dalam penelitian ini adalah 1000 gram sedangkan tembaga sebagai campuran digunakan sebanyak 200 gram. Campuran logam cair diaduk agar merata, lalu dituangkan ke dalam cetakan. Setelah itu, hasil coran didinginkan hingga membeku. Spesimen terlebih dahulu dilakukan preparasi, kemudian dilakukan pengujian kekerasan Vickers dan pengamatan struktur mikro.

4. Hasil dan Pembahasan



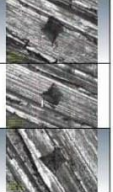
Gambar 2. Hasil cor Al-Cu (a) sebelum dilakukan pembersihan; (b) setelah dilakukan pembersihan.

Pengecoran pada penelitian ini dilakukan dua kali, sehingga menghasilkan bentuk permukaan yang berbeda. Pada pengecoran yang pertama coran yang di hasilkan cukup baik, hal tersebut disebabkan oleh cetakan pasir silika yang cukup baik. Sedangkan pada pengecoran

kedua terdapat cacat ekor tikus dan permukaan kasar, hal tersebut disebabkan oleh permukaan cetakan yang kasar dan kemungkinan terjadinya cetakan mengembang akibat panas lalu logam masuk ke celah tersebut.

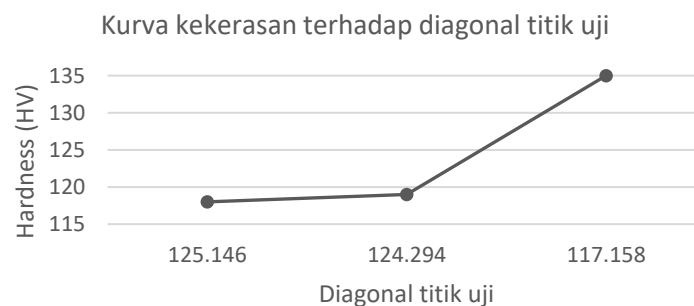
4.1 Hasil Pengujian Kekerasan Vickers

Data hasil pengujian kekerasan Vickers pada penelitian ini dituliskan dalam Tabel 1 Sebagai berikut:

EMCO-TEST		Test Report		www.emcotest.com	
Specimen	Point No	Hardness	Method	Diagonal	Diagonal
AT Malahayati B	1	118	HV 1	125,146	
	2	119	HV 1	124,924	
	3	135	HV 1	117,158	

Gambar 3. Data hasil pengujian

Berdasarkan data di atas, terbentuk kurva kekerasan vicker padaa setiap titik terhadap diagonal pengujian, digambarkan sebagai berikut:



Gambar 3. Kurva kekerasan terhadap diagonal titik uji

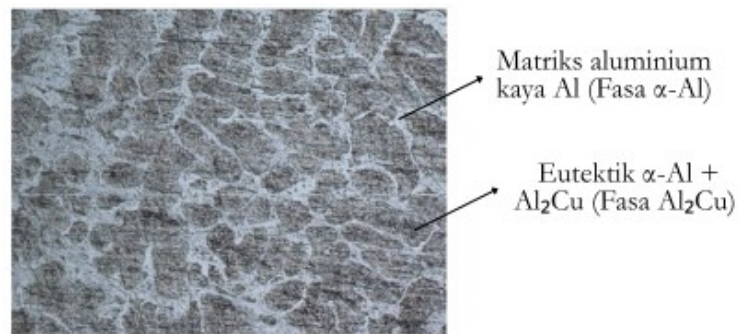
Berdasarkan hasil pengujian kekerasan Vickers, diperoleh nilai kekerasan pada tiga titik uji sebesar 118 HV, 119 HV, dan 135 HV, dengan nilai rata-rata 124 HV. Nilai kekerasan tertinggi terdapat pada titik uji ketiga, yaitu 135 HV, sedangkan nilai terendah terdapat pada titik uji pertama, yaitu 118 HV. Selisih antara nilai tertinggi dan terendah adalah 17 HV.

Perbedaan nilai kekerasan tersebut menunjukkan bahwa tingkat kekerasan pada permukaan spesimen belum sepenuhnya seragam. Titik uji pertama dan kedua memiliki nilai yang hampir sama, yaitu 118 HV dan 119 HV, sehingga dapat dikatakan bahwa kedua titik tersebut memiliki kekerasan yang relatif stabil. Namun, titik uji ketiga menunjukkan nilai yang lebih tinggi, yaitu 135 HV, sehingga terdapat peningkatan kekerasan pada bagian tersebut.

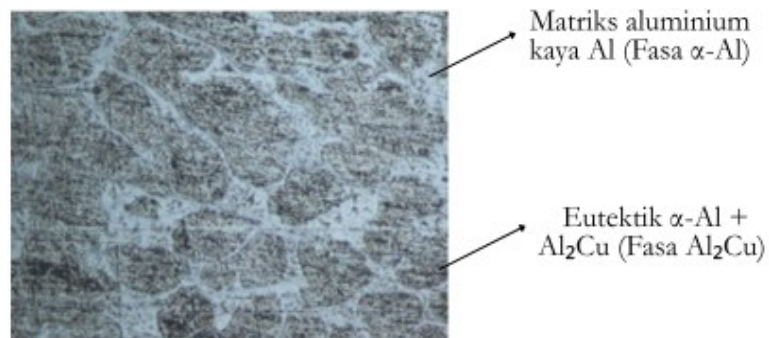
Nilai rata-rata kekerasan sebesar 124 HV menunjukkan bahwa spesimen hasil pengecoran memiliki tingkat kekerasan yang cukup baik setelah penambahan unsur tembaga. Akan tetapi, adanya perbedaan nilai pada setiap titik uji menunjukkan bahwa hasil kekerasan masih bervariasi. Dengan demikian, hasil uji Vickers menunjukkan bahwa spesimen memiliki nilai kekerasan rata-rata 124 HV, tetapi distribusi kekerasannya belum sepenuhnya merata pada seluruh titik pengujian.

4.2 Hasil Pengujian Struktur Mikro

Pada paduan aluminium dan tembaga yang telah dilakukan pengecoran, dilakukan uji struktur mikro pada spesimen coran seperti gambar berikut:



Gambar 4. Hasil pengujian struktur mikro 20x



Gambar 5. Hasil pengujian struktur mikro 40x

Perbedaan bagian pada hasil coran tersebut terjadi karena proses pembekuan paduan Al–Cu tidak berlangsung seragam. Saat aluminium cair dicampur dengan tembaga lalu membeku, unsur Al dan Cu tidak membentuk satu fasa yang benar-benar homogen, sehingga muncul bagian terang dan gelap pada struktur mikro.

Pada awal pembekuan, bagian yang pertama terbentuk adalah fasa α -Al, yaitu aluminium yang masih kaya unsur Al. Fasa ini menjadi matriks utama dan tampak sebagai bagian yang lebih terang. Hal ini terjadi karena aluminium merupakan unsur paling banyak dalam campuran.

Ketika α -Al mulai membeku, unsur Cu tidak seluruhnya masuk ke dalam fasa aluminium. Cu cenderung terdorong ke sisa cairan logam di antara daerah α -Al. Akibatnya, sisa cairan tersebut menjadi semakin kaya Cu. Pada tahap akhir pembekuan, daerah kaya Cu ini membentuk fasa Al_2Cu atau campuran eutektik α -Al + Al_2Cu , yang tampak sebagai bagian gelap.

6. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, penambahan unsur tembaga pada Aluminium hasil pengecoran berpengaruh terhadap sifat mekanik dan struktur mikro material. Hasil uji kekerasan Vickers menunjukkan nilai sebesar 118 HV, 119 HV, dan 135 HV, dengan nilai rata-rata 124 HV. Perbedaan nilai kekerasan pada tiap titik menunjukkan bahwa distribusi Cu pada spesimen belum sepenuhnya merata. Hasil pengamatan struktur mikro juga menunjukkan adanya daerah terang dan gelap yang tersebar tidak seragam pada permukaan spesimen. Dengan demikian, penambahan Cu dapat memengaruhi peningkatan kekerasan Aluminium cor, tetapi proses pencampuran dan pengecoran masih perlu dikontrol dengan lebih baik agar diperoleh struktur mikro dan sifat mekanik yang lebih seragam.

Kontribusi Penulis: Penulis 1 berkontribusi dalam perumusan ide penelitian, pelaksanaan proses pengecoran, pengujian spesimen, serta penyusunan naskah awal. Penulis 2 berkontribusi dalam memberikan arahan penelitian, validasi metode, serta telaah terhadap hasil dan pembahasan. Penulis 3 berkontribusi dalam pengumpulan data, analisis hasil pengujian kekerasan Vickers dan struktur mikro, penyusunan artikel, serta penyuntingan naskah akhir. Seluruh penulis telah membaca dan menyetujui isi artikel sebelum diajukan untuk publikasi.

Pendanaan: Penelitian ini tidak menerima pendanaan khusus dari lembaga pemerintah, swasta, maupun organisasi tertentu. Seluruh proses penelitian dilakukan secara mandiri oleh penulis, mulai dari persiapan bahan, proses pengecoran, pengujian, hingga penyusunan artikel.

Pernyataan Ketersediaan Data: Data yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari hasil pengujian kekerasan Vickers dan pengamatan struktur mikro yang dilakukan di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Data yang dihasilkan meliputi nilai kekerasan pada setiap titik uji serta dokumentasi hasil pengamatan struktur mikro pada beberapa pembesaran. Data pendukung penelitian ini tidak disimpan pada repositori publik. Namun, data dapat tersedia dari penulis korespondensi atas permintaan yang wajar, selama tidak melanggar ketentuan etika, privasi, dan kebijakan penggunaan fasilitas laboratorium di BRIN.

Ucapan Terima Kasih: Penulis mengucapkan terima kasih kepada Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) atas dukungan fasilitas laboratorium yang telah diberikan selama pelaksanaan penelitian ini. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada Program Studi Teknik Mesin Universitas Malahayati atas dukungan, arahan, dan kesempatan yang diberikan dalam penyusunan serta pelaksanaan penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada seluruh pihak yang telah membantu dalam proses pengecoran, pengujian kekerasan Vickers, pengamatan struktur mikro, dan penyusunan artikel ini.

Konflik Kepentingan: Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan dalam pelaksanaan penelitian, pengumpulan data, analisis hasil, maupun penyusunan artikel ini. Penelitian dilakukan secara objektif dan tidak dipengaruhi oleh kepentingan pribadi, komersial, maupun pihak lain yang dapat memengaruhi hasil dan kesimpulan penelitian.

Referensi

- [1] O. P. Pfeiffer et al., "Aluminum alloy compositions and properties extracted from a corpus of scientific manuscripts and US patents," pp. 1–9, 2022, doi: 10.1038/s41597-022-01215-7.
- [2] S. Fan, X. Guo, Y. Tang, and X. Guo, "Microstructure and Mechanical Properties of Al-Cu-Mg Alloy Fabricated by Double-Wire CMT Arc Additive Manufacturing," *Metals (Basel)*, vol. 12, no. 416, 2024, doi: 10.3390/met12030416 Academic.
- [3] R. Santos-Güemes, B. Bellón, G. Esteban-Manzanares, J. Segurado, L. Capolungo, and J. LLorca, "Multiscale modelling of precipitation hardening in Al–Cu alloys: Dislocation dynamics simulations and experimental validation," *Acta Mater.*, vol. 188, pp. 475–485, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.02.019>.
- [4] S. Boczkal et al., "Effects of Copper Content and Thermo-Mechanical Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of AlMgSi (Cu) Alloys," 2024.
- [5] Y. Wang et al., "Microstructure and Mechanical Properties of Cu – Al Alloy Deposited by Additive Manufacturing Microstructure and Mechanical Properties of Cu – Al Alloy Deposited by Additive Manufacturing," vol. 2, no. January 2022, pp. 46–51, 2021.
- [6] S. Mojumder, M. S. H. Thakur, M. Islam, M. Mahboob, and M. Motalab, "Numerical Investigation of Mechanical Properties of Aluminum-Copper Alloys at Nanoscale Satyajit," *J. Nanoparticle Res.*, vol. 23, no. 1, 2021, doi: 10.1007/s11051-020-05137-6.
- [7] S. Ahmed, S. Anwar, and S. Islam, "Results in Materials Experimental study on the effects of three alloying elements on the mechanical , corrosion and microstructural properties of aluminum alloys," *Results Mater.*, vol. 20, no. October, p. 100485, 2023, doi: 10.1016/j.rinma.2023.100485.
- [8] B. Plonka, K. Żylka, K. Remsak, M. Rajda, J. Zdunek, and D. Moszczyńska, "Influence of copper content on the structure and properties of Aluminium alloys," *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 24, no. 1, pp. 1–11, 2024, doi: 10.1007/s43452-023-00811-7.
- [9] L. Ren et al., "The Effect of Cu Content on the Microstructure and Properties of the Wire Arc Additive Manufacturing Al-Cu Alloy," pp. 1–11, 2023.
- [10] F. Zupanić, M. Steinacher, S. Žist, and T. Bončina, "Microstructure and Properties of a Novel Al-Mg-Si Alloy AA 6086." 2021.
- [11] T. B. Reddy, P. Karthik, and M. G. Krishna, "Results in Engineering Mechanical behavior of Al – Cu binary alloy system / Cu particulates reinforced metal-metal composites," *Results Eng.*, vol. 4, no. September, p. 100046, 2019, doi: 10.1016/j.rineng.2019.100046.
- [12] H. M. M. A. Rashed, E. A. Ashra, and A. Hasan, "Modelling Effects of Copper on Microstructure and Properties of Al - Si - Cu Alloys," vol. 64, no. 1, pp. 177–183, 2023.
- [13] A. Datta and A. K. Rana, "Chemical composition design in cast aluminum alloys for enhanced microstructure and functionality," 2025.
- [14] ASM International, *ASM Handbook, Volume 15: Casting*. Materials Park, OH: ASM International, 2008.
- [15] J. Campbell, *Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design*, 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2015.
- [16] P. R. Beeley, *Foundry Technology*, 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.
- [17] G. E. Dieter, *Mechanical Metallurgy*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1986.
- [18] G. F. Vander Voort, *Metallography: Principles and Practice*. Materials Park, OH: ASM International, 1999.
- [19] W. D. Callister Jr. and D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 10th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2020.
- [20] R. E. Smallman and A. H. W. Ngan, *Modern Physical Metallurgy*, 8th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014.