

Pengaruh Komposisi Media Pendingin Larutan CaCO_3 20% Terhadap Kekerasan Dan Struktur Kristal (*X-Ray Diffraction*) Pada Paduan Aluminium Silikon Yang Telah Mengalami *Quenching* Dan *Artificial Aging*

**Muhammad Fadhil Azhary ; Masyrukan S.T M.T
Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik
Universityas Muhammadiyah Surakarta**

Abstrak

Paduan aluminium-silikon (Al-Si) banyak digunakan dalam industri manufaktur karena memiliki massa jenis rendah, kemampuan cor yang baik, dan ketahanan aus yang tinggi. Namun, sifat mekaniknya masih dapat ditingkatkan melalui perlakuan panas. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh media pendingin air dan larutan kalsium karbonat (CaCO_3) 20% terhadap struktur kristal dan kekerasan paduan Al-Si setelah proses *Quenching* dan *Artificial Aging*. Penelitian dilakukan menggunakan spesimen paduan Al-Si yang terlebih dahulu diuji komposisinya menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF). Spesimen kemudian diberi perlakuan *Solution Treatment* pada suhu 580°C , dilanjutkan proses *Quenching* menggunakan media air dan larutan CaCO_3 20%. Sebagian spesimen selanjutnya diberi perlakuan *Artificial Aging* pada suhu 200°C . Karakterisasi struktur kristal dilakukan menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD), sedangkan pengujian sifat mekanik dilakukan menggunakan metode *Micro Vickers* dengan beban 100 kgf. Hasil pengujian XRD menunjukkan bahwa seluruh spesimen didominasi oleh dua fasa utama, yaitu Aluminium (Al) dan Silikon (Si). Perlakuan *Quenching* dan *Artificial Aging* tidak menghasilkan fasa baru, namun memengaruhi intensitas puncak difraksi, nilai FWHM, dan ukuran kristalit. Hasil pengujian kekerasan menunjukkan bahwa *Raw Material* memiliki kekerasan sebesar 88,84 HV, meningkat menjadi 94,02 HV setelah *Quenching* air dan 89,72 HV setelah *Quenching* CaCO_3 20%. Nilai kekerasan tertinggi diperoleh pada spesimen *Quenching* CaCO_3 20% yang dilanjutkan *Artificial Aging*, yaitu sebesar 112,88 HV atau meningkat 27,05% dibandingkan *Raw Material*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi *Quenching* CaCO_3 20% dan *Artificial Aging* merupakan perlakuan yang paling efektif dalam meningkatkan kekerasan paduan Al-Si.

Kata Kunci: Aluminium-Silikon, *Quenching*, *Artificial Aging*, Kalsium Karbonat (CaCO_3), *X-Ray Diffraction*, Kekerasan *Vickers*.

Abstract

Aluminum-silicon (Al-Si) Alloys are widely used in the manufacturing industry due to their low density, good castability, and high wear resistance. However, their mechanical properties can still be improved through Heat Treatment processes. This study aims to analyze the effect of water and 20% calcium carbonate (CaCO_3) solution as Quenching media on the crystal structure and Hardness of Al-Si Alloys after Quenching and Artificial Aging treatments. The research was conducted using Al-Si Alloy specimens whose chemical composition was first characterized by X-Ray Fluorescence (XRF). The specimens were then subjected to Solution Treatment at 580°C , followed by Quenching in water and a 20% CaCO_3 solution. Some specimens were subsequently subjected to Artificial Aging at 200°C . Crystal structure characterization was performed using X-Ray Diffraction (XRD), while mechanical properties were evaluated using the Micro Vickers Hardness test with a load of 100 kgf. The XRD results showed that all specimens were dominated by two main phases, namely Aluminum (Al) and Silicon (Si). The Quenching and Artificial Aging treatments did not produce new phases; however, they affected the diffraction peak intensity, Full Width at Half Maximum (FWHM), and crystallite size. The Hardness test results indicated that the Raw Material had a Hardness value of 88.84 HV, which increased to 94.02 HV after water Quenching and to 89.72 HV after Quenching in

a 20% CaCO₃ solution. The highest Hardness value was obtained from the specimen subjected to Quenching in a 20% CaCO₃ solution followed by Artificial Aging, reaching 112.88 HV, representing an increase of 27.05% compared to the Raw Material. The results demonstrate that the combination of 20% CaCO₃ Quenching and Artificial Aging is the most effective treatment for improving the Hardness of Al–Si Alloys.

Keywords: *Aluminum–Silicon Alloy, Quenching, Artificial Aging, Calcium Carbonate (CaCO₃), X-Ray Diffraction, Vickers Hardness.*

1.PENDAHULUAN

Paduan aluminium-silikon (Al-Si) merupakan salah satu paduan cor yang banyak digunakan karena memiliki kemampuan cor yang baik, stabilitas dimensi, serta ketahanan aus yang tinggi. Struktur mikronya terdiri dari matriks aluminium (α -Al) dan fasa silikon yang keras dan getas, di mana morfologi serta distribusi silikon sangat mempengaruhi sifat mekanik material (Dash et al., 2023).

Penggunaan aluminium yang terus meningkat menempatkannya sebagai material kedua paling banyak digunakan setelah baja. Namun, dalam aplikasinya, sifat mekanik paduan aluminium sering kali belum memenuhi kebutuhan, sehingga diperlukan proses modifikasi seperti perlakuan panas untuk meningkatkan performa material (Saputro, 2008).

Pada kondisi *as-cast*, paduan Al-Si memiliki keterbatasan berupa kekerasan dan kekuatan yang relatif rendah akibat bentuk silikon yang tajam dan berpotensi menjadi titik konsentrasi tegangan. Oleh karena itu, dilakukan proses *heat treatment* yang meliputi *solution treatment*, *quenching*, dan *artificial aging* untuk menghasilkan presipitat penguat dan meningkatkan sifat mekanik (Liu et al., 2022).

Efektivitas proses *quenching* sangat dipengaruhi oleh media pendingin yang menentukan laju perpindahan panas dan pembentukan struktur mikro. Media dengan laju pendinginan yang tepat dapat menghasilkan struktur lebih halus dan homogen serta meningkatkan kekerasan material (Kang et al., 2021).

Larutan CaCO₃ berpotensi digunakan sebagai media *quenching* alternatif karena memberikan laju pendinginan menengah (*moderate cooling rate*), sehingga mampu mengurangi risiko retak termal dan distorsi dibandingkan air, namun tetap meningkatkan kekerasan lebih baik dibanding oli. Mekanisme pendinginan yang lebih stabil terjadi akibat partikel CaCO₃ yang memperlambat perpindahan panas secara bertahap (Sahul et al., 2020).

Dengan karakteristik tersebut, larutan CaCO₃ dipilih sebagai media pendingin karena berpotensi menghasilkan struktur mikro yang lebih halus, peningkatan kekerasan yang optimal, serta memiliki keunggulan praktis berupa biaya rendah dan ketersediaan yang melimpah, sehingga relevan untuk aplikasi industri.

2. METODE

2.1 Bahan

Material yang digunakan dalam penelitian ini meliputi spesimen paduan aluminium-silikon (Al-Si) berbentuk silinder dengan diameter 50 mm dan tinggi 20 mm. Selain itu, digunakan kalsium karbonat (CaCO_3) sebagai bahan campuran media pendingin pada proses *quenching*. Komposisi kimia paduan Al-Si terdiri dari Al sebesar 86,39% dan Si sebesar 10,10%, serta unsur lain seperti Fe, Cu, Mn, Mg, Cr, Ni, Zn, Ti, Pb, dan Sn dalam jumlah kecil. Media pendingin yang digunakan dalam penelitian ini adalah air dan larutan CaCO_3 dengan konsentrasi 20%.

Tabel 2.1. Hasil uji komposisi material

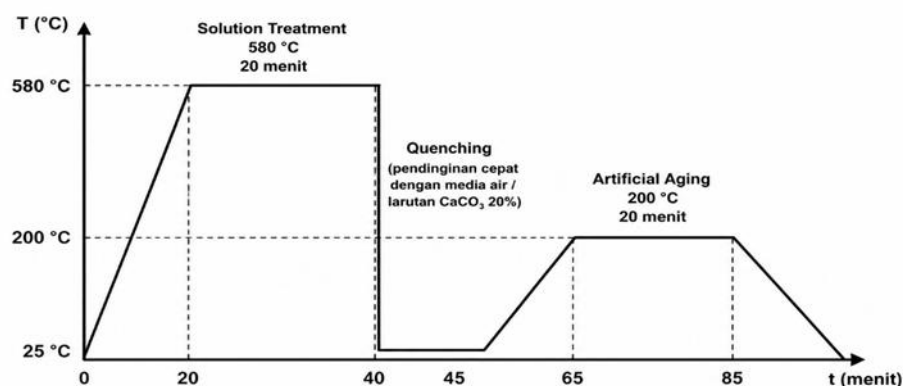
% Al	% Si	% Fe	% Cu	% Mn	% Mg	% Cr	% Ni	% Zn	% Ti	% Pb	% Sn
86.39	10.10	0.910	1.570	0.133	0.070	0.022	0.035	0.654	0.035	0.032	0.015

2.2 Persiapan sampel

Spesimen Al-Si dipotong sesuai dengan dimensi yang telah ditentukan, kemudian dibersihkan dan dipersiapkan sebelum menjalani proses perlakuan panas. Setelah dilakukan *heat treatment*, spesimen dipreparasi melalui proses pengamplasan bertahap dan pemolesan hingga diperoleh permukaan yang halus guna mendukung pengujian struktur mikro dan kekerasan. Selanjutnya, spesimen dikelompokkan menjadi lima variasi perlakuan, yaitu kondisi awal (*raw material*), *quenching* dengan media air, *quenching* media air yang dilanjutkan *artificial aging*, *quenching* menggunakan larutan CaCO_3 20%, serta *quenching* larutan CaCO_3 20% yang dilanjutkan *artificial aging*.

2.3 Proses perlakuan panas

Seluruh spesimen terlebih dahulu mengalami proses *solution treatment* menggunakan tungku pemanas hingga mencapai temperatur yang telah ditentukan. Setelah itu, spesimen didinginkan secara cepat melalui proses *quenching* dengan menggunakan dua jenis media pendingin, yaitu air dan larutan CaCO_3 20%. Selanjutnya, sebagian spesimen diberikan perlakuan *artificial aging* untuk membentuk



Gambar 2.1 Proses perlakuan panas

presipitat penguat yang berperan dalam meningkatkan sifat mekanik material. Alur proses penelitian secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 2.1.

2.4 Pengujian kekerasan

Pengujian kekerasan pada penelitian ini dilakukan menggunakan metode Micro Vickers untuk mengetahui perubahan sifat mekanik paduan aluminium-silikon (Al-Si) setelah proses perlakuan panas. Pengujian dilakukan dengan memberikan beban tertentu pada permukaan spesimen yang telah dipreparasi hingga halus, sehingga menghasilkan jejak indentasi yang kemudian diukur untuk menentukan nilai kekerasan dalam satuan Vickers Hardness (HV). Setiap spesimen diuji untuk membandingkan nilai kekerasan pada kondisi *raw material*, setelah proses *quenching* dengan media air dan larutan CaCO_3 20%, serta setelah perlakuan *artificial aging*. Hasil pengujian menunjukkan adanya peningkatan kekerasan akibat perlakuan panas, yang berkaitan dengan terbentuknya presipit penguat dan perubahan struktur mikro material.

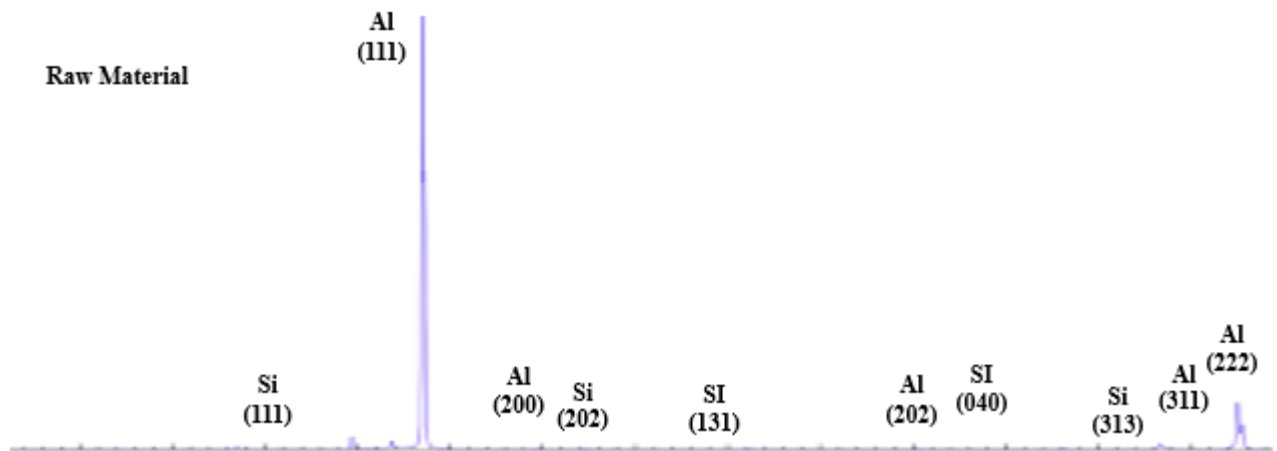
2.5 Analisis struktur kristal

Pengujian struktur kristal dalam penelitian ini dilakukan menggunakan metode *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengidentifikasi karakteristik kristal pada paduan aluminium-silikon (Al-Si). Metode XRD bekerja berdasarkan prinsip difraksi sinar-X yang ditembakkan ke permukaan spesimen, kemudian dipantulkan oleh bidang kristal dengan sudut tertentu sehingga menghasilkan pola difraksi berupa hubungan antara intensitas dan sudut difraksi (2θ). Pola difraksi yang dihasilkan selanjutnya direkam oleh detektor dan diolah menggunakan perangkat lunak analisis untuk dibandingkan dengan database standar, sehingga memungkinkan identifikasi fasa kristal, ukuran kristalit, serta parameter struktur lainnya. Pengujian ini memerlukan sistem instrumentasi yang terdiri dari sumber sinar-X, detektor, serta sistem kontrol untuk mengatur parameter pengujian seperti sudut pemindaian dan kecepatan scanning agar diperoleh data yang akurat dan representatif.

3.HASIL DAN PEMBAHASAN

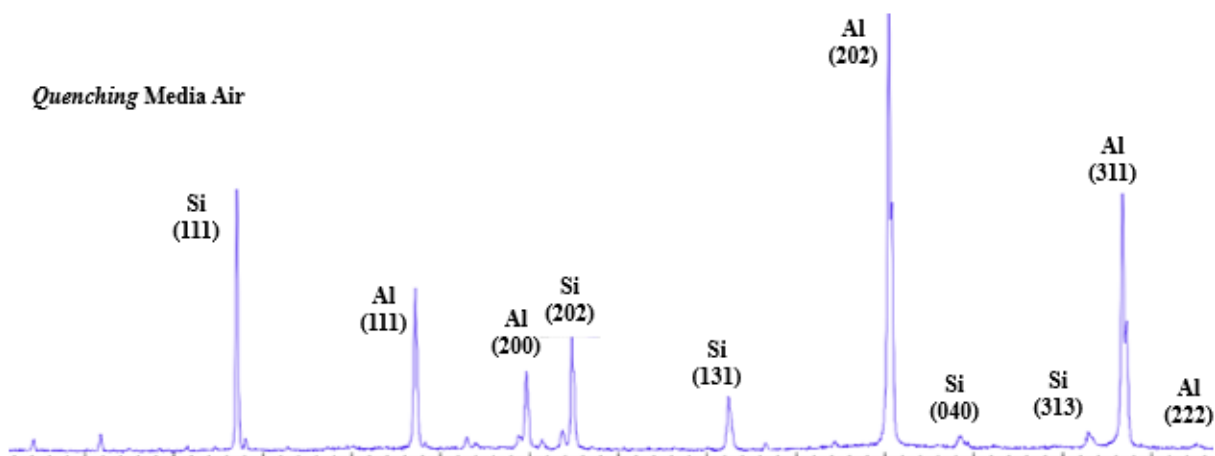
3.1 Analisis Struktur Kristal

Pengujian struktur kristal pada spesimen *raw material* paduan aluminium-silikon (Al-Si) dilakukan menggunakan metode X-Ray Diffraction (XRD) untuk mengidentifikasi fasa yang terbentuk serta karakteristik kristalnya. Hasil pengujian ditampilkan dalam bentuk pola difraksi yang menunjukkan hubungan antara intensitas dan sudut difraksi (2θ). Pola ini digunakan untuk mengetahui jenis fasa yang dominan serta distribusi puncak difraksi yang terbentuk pada material sebelum diberikan perlakuan panas. Hasil pola difraksi XRD spesimen *raw material* ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Grafik *X-Ray Diffraction Raw Meterial*

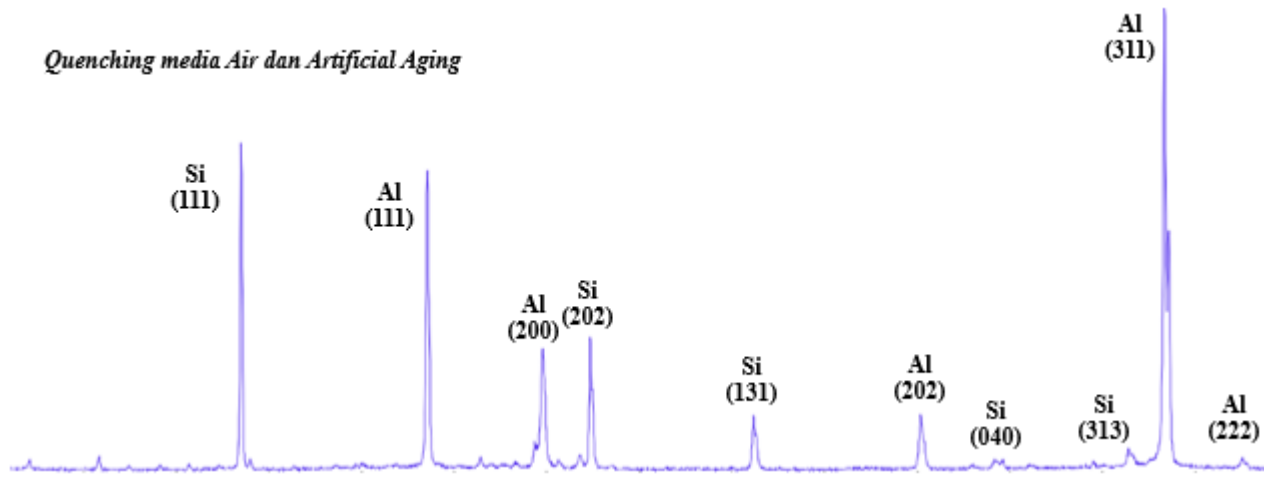
Berdasarkan pola difraksi pada Gambar 2, terlihat bahwa puncak tertinggi berada pada sudut 2θ sekitar 38° yang diidentifikasi sebagai bidang (111) dari fasa aluminium (Al), menunjukkan bahwa aluminium merupakan fasa dominan dalam material. Selain itu, terdapat beberapa puncak dengan intensitas lebih rendah yang mengindikasikan keberadaan fasa silikon (Si) sebagai fasa sekunder. Puncak-puncak difraksi yang terbentuk menunjukkan karakteristik struktur kristal aluminium dengan struktur FCC yang ditandai oleh bidang (111), (200), (220), dan (311). Tidak ditemukan puncak baru selain fasa Al dan Si, sehingga dapat disimpulkan bahwa material dalam kondisi awal hanya terdiri dari dua fasa utama tanpa adanya pembentukan senyawa baru.



Gambar 2.2 Grafik *X-Ray Diffraction* dengan *Quenching* media Air

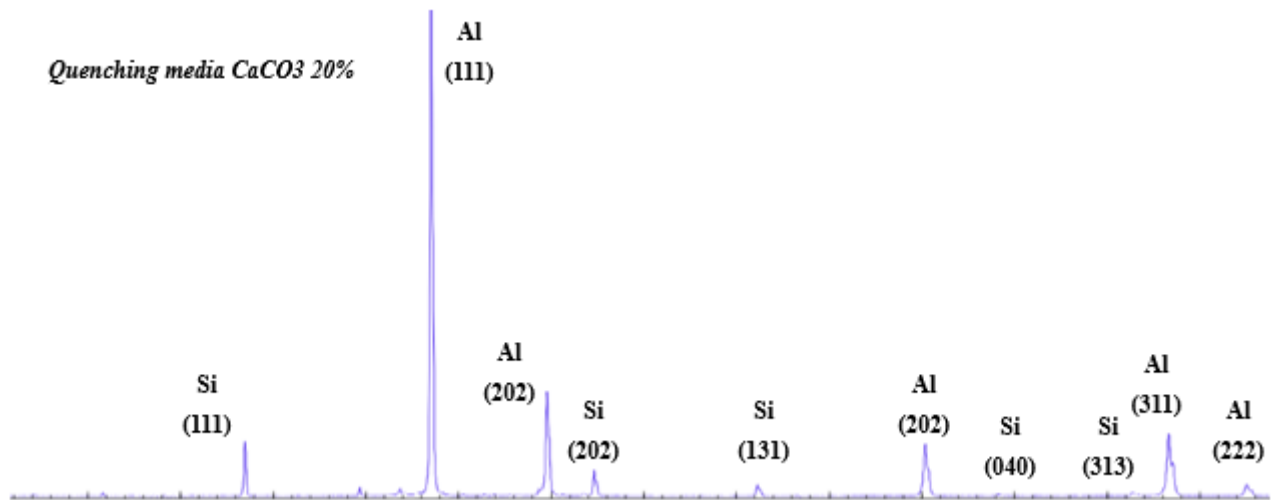
Berdasarkan pola difraksi XRD pada gambar 3.2, terlihat bahwa puncak difraksi tertinggi masih berada pada sudut 2θ sekitar 38° yang diidentifikasi sebagai bidang (111) dari fasa aluminium (Al), sehingga menunjukkan bahwa aluminium tetap menjadi fasa dominan dalam material. Selain itu, muncul beberapa puncak difraksi lain dengan intensitas yang cukup signifikan yang berkaitan dengan bidang kristal aluminium seperti (200), (220), dan (311), serta puncak-puncak dari fasa silikon (Si) sebagai fasa sekunder. Namun demikian, dibandingkan dengan kondisi *raw material*, pola difraksi

menunjukkan peningkatan jumlah puncak dan perubahan intensitas yang lebih kompleks, yang mengindikasikan adanya pengaruh proses pendinginan cepat terhadap struktur kristal. Hal ini disebabkan karena proses *quenching* mampu mengunci struktur larutan padat sehingga menimbulkan tegangan sisa dan perubahan ukuran kristalit yang tercermin dari variasi intensitas serta kemungkinan perubahan nilai FWHM pada puncak difraksi. Dengan demikian, meskipun tidak terbentuk fasa baru, proses *quenching* memberikan pengaruh nyata terhadap karakteristik struktur kristal paduan aluminium-silikon.



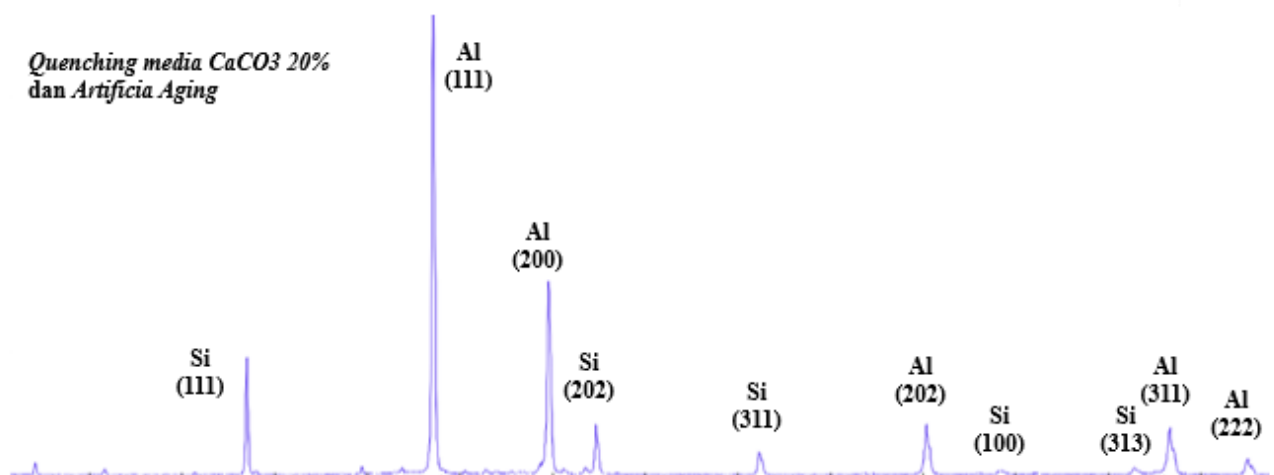
Gambar 3.3 Grafik X-Ray Difraction dengan Quenching media Air dan Artificial Aging

Berdasarkan pola difraksi XRD pada Gambar 3.3, terlihat bahwa puncak tertinggi masih berada pada sudut 2θ sekitar 38° yang diidentifikasi sebagai bidang (111) dari fasa aluminium (Al), sehingga menunjukkan bahwa aluminium tetap menjadi fasa dominan dalam material. Selain itu, terdapat beberapa puncak lain dengan intensitas yang cukup tinggi yang berkaitan dengan bidang kristal aluminium seperti (200), (220), dan (311), serta puncak-puncak dari fasa silikon (Si) sebagai fasa sekunder. Namun demikian, dibandingkan dengan spesimen yang hanya mengalami *quenching*, pola difraksi pada spesimen yang dilanjutkan *artificial aging* menunjukkan distribusi puncak yang lebih teratur dan beberapa perubahan intensitas yang mengindikasikan terjadinya proses presipitasi. Hal ini disebabkan karena proses *aging* memungkinkan difusi atom dan pembentukan presipitat penguat sehingga mempengaruhi keteraturan struktur kristal dan ukuran kristalit. Dengan demikian, meskipun tidak terbentuk fasa baru, kombinasi *quenching* dan *artificial aging* memberikan pengaruh yang lebih signifikan terhadap karakteristik struktur kristal dibandingkan perlakuan *quenching* saja.



Gambar 3.4 Grafik *X-Ray Diffraction* dengan *Quenching* Media CaCo3 20%

Berdasarkan pola difraksi XRD pada Gambar 3.4, terlihat bahwa puncak tertinggi tetap berada pada sudut 2θ sekitar 38° yang diidentifikasi sebagai bidang (111) dari fasa aluminium (Al), sehingga menunjukkan bahwa aluminium masih menjadi fasa dominan dalam material. Selain itu, terdapat beberapa puncak difraksi lain dengan intensitas yang lebih rendah yang berkaitan dengan fasa silikon (Si) sebagai fasa sekunder, serta bidang kristal aluminium seperti (200), (220), dan (311). Namun demikian, dibandingkan dengan spesimen yang mengalami *quenching* menggunakan air, pola difraksi pada media CaCO₃ 20% menunjukkan distribusi puncak yang lebih rendah intensitasnya dan tidak terlalu kompleks, yang mengindikasikan bahwa laju pendinginan yang terjadi lebih lambat (*moderate cooling rate*). Hal ini disebabkan karena keberadaan partikel CaCO₃ dalam media pendingin mampu memperlambat proses perpindahan panas sehingga pendinginan berlangsung lebih stabil dan bertahap. Dengan demikian, meskipun tidak terbentuk fasa baru selain aluminium dan silikon, penggunaan media CaCO₃ 20% memberikan pengaruh terhadap karakteristik struktur kristal dengan menghasilkan perubahan intensitas puncak yang lebih terkendali dibandingkan media air.



Gambar 3.5 Grafik *X-Ray Diffraction* dengan *Quenching* media CaCo3 20% dan *Artificial Aging*

Berdasarkan pola difraksi XRD pada Gambar 3.5, terlihat bahwa puncak tertinggi tetap berada pada sudut 2θ sekitar 38° yang diidentifikasi sebagai bidang (111) dari fasa aluminium (Al), sehingga menunjukkan bahwa aluminium masih menjadi fasa dominan dalam material. Selain itu, terdapat beberapa puncak difraksi lain dengan intensitas yang cukup jelas yang berkaitan dengan bidang kristal aluminium seperti (200), (220), dan (311), serta puncak-puncak dari fasa silikon (Si) sebagai fasa sekunder. Namun demikian, dibandingkan dengan spesimen yang hanya mengalami *quenching* menggunakan larutan CaCO_3 20%, pola difraksi pada spesimen yang dilanjutkan *artificial aging* menunjukkan peningkatan intensitas pada beberapa puncak serta distribusi yang lebih teratur, yang mengindikasikan terjadinya proses presipitasi yang lebih optimal. Hal ini disebabkan karena proses *aging* memungkinkan difusi atom dan pembentukan presipitat penguat sehingga struktur kristal menjadi lebih stabil dan homogen. Dengan demikian, meskipun tidak terbentuk fasa baru selain aluminium dan silikon, kombinasi *quenching* CaCO_3 20% dan *artificial aging* memberikan pengaruh yang lebih signifikan terhadap karakteristik struktur kristal dibandingkan perlakuan tanpa *aging*.

3.2 Analisis Kekerasan

Pengujian kekerasan menunjukkan bahwa spesimen *raw material* memiliki nilai kekerasan sebesar 88,84 HV, yang mencerminkan kondisi awal material tanpa perlakuan panas. Pada kondisi ini, struktur mikro masih dalam keadaan awal sehingga distribusi fasa belum optimal dan belum terbentuk presipitat penguat yang dapat meningkatkan kekerasan material.

Setelah dilakukan proses *quenching* menggunakan media air, nilai kekerasan meningkat menjadi 94,02 HV. Peningkatan ini menunjukkan bahwa pendinginan cepat mampu mengunci struktur larutan padat sehingga memberikan kontribusi terhadap peningkatan kekerasan. Namun demikian, peningkatan tersebut masih belum maksimal karena belum adanya proses *aging* yang berfungsi membentuk presipitat penguat secara optimal.

Pada spesimen yang mengalami *quenching* menggunakan media air dan dilanjutkan dengan *artificial aging*, kekerasan material mengalami peningkatan lebih lanjut dibandingkan hanya *quenching*. Hal ini disebabkan oleh proses *aging* yang memungkinkan terbentuknya presipitat penguat di dalam matriks aluminium, sehingga meningkatkan hambatan terhadap pergerakan dislokasi dan berdampak pada peningkatan kekerasan material.

Berbeda dengan media air, spesimen yang didinginkan menggunakan larutan CaCO_3 20% menunjukkan nilai kekerasan sebesar 89,72 HV, yang relatif lebih rendah dibandingkan *quenching* air. Hal ini menunjukkan bahwa laju pendinginan yang lebih lambat (*moderate cooling rate*) pada media CaCO_3 menyebabkan proses penguncian struktur tidak berlangsung secepat air, sehingga peningkatan kekerasan yang dihasilkan tidak sebesar pada media air.

Namun demikian, pada spesimen yang mengalami *quenching* menggunakan larutan CaCO_3 20% dan dilanjutkan dengan *artificial aging*, diperoleh nilai kekerasan tertinggi yaitu 112,88 HV, atau meningkat sekitar 27,05% dibandingkan raw material. Peningkatan yang signifikan ini menunjukkan bahwa kombinasi pendinginan dengan laju moderat dan proses *aging* mampu menghasilkan presipitat yang lebih optimal serta distribusi mikrostruktur yang lebih homogen, sehingga memberikan peningkatan sifat mekanik yang paling efektif.

4.PENUTUP

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa variasi media pendingin dan perlakuan *artificial aging* memberikan pengaruh terhadap sifat mekanik dan struktur kristal paduan aluminium-silikon (Al-Si). Hasil pengujian XRD menunjukkan bahwa seluruh spesimen didominasi oleh dua fasa utama, yaitu aluminium (Al) dan silikon (Si), tanpa terbentuknya fasa baru akibat perlakuan panas. Namun demikian, terjadi perubahan pada intensitas puncak difraksi, nilai FWHM, serta ukuran kristalit yang mengindikasikan adanya perubahan karakteristik struktur mikro material.

Hasil pengujian kekerasan menunjukkan bahwa perlakuan panas mampu meningkatkan nilai kekerasan dibandingkan kondisi *raw material*. Proses *quenching* menggunakan media air menghasilkan peningkatan kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan media CaCO_3 20%, yang disebabkan oleh laju pendinginan yang lebih cepat. Akan tetapi, kombinasi *quenching* menggunakan larutan CaCO_3 20% yang dilanjutkan dengan *artificial aging* menghasilkan nilai kekerasan tertinggi, yaitu sebesar 112,88 HV atau meningkat sekitar 27,05% dibandingkan kondisi awal. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi pendinginan dengan laju moderat dan proses *aging* mampu menghasilkan presipitat penguat yang lebih optimal serta distribusi struktur mikro yang lebih homogen.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penggunaan media pendingin larutan CaCO_3 20% yang dikombinasikan dengan proses *artificial aging* merupakan metode yang paling efektif dalam meningkatkan sifat mekanik paduan aluminium-silikon.

5.PERSANTUNAN

Penulis mengucapkan puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik. Penulis juga menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, bantuan, serta bimbingan selama proses penyusunan penelitian ini, khususnya kepada dosen pembimbing Bapak Masyrukan, S.T., M.T. yang telah memberikan arahan dan masukan, pihak laboratorium yang telah menyediakan fasilitas selama pengujian, serta seluruh dosen dan staf yang telah memberikan ilmu selama masa perkuliahan. Selain itu, penulis juga mengucapkan terima kasih kepada keluarga dan

teman-teman yang senantiasa memberikan doa, motivasi, dan semangat. Penulis menyadari bahwa penelitian ini masih memiliki keterbatasan, sehingga kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan untuk perbaikan di masa mendatang.

6.DAFTAR PUSTAKA

- Arifin, M. (2020). Pengaruh media *Quenching* terhadap sifat impak paduan Al-Si hasil *remelting* dengan perlakuan *Artificial Aging*. *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, 12(2), 45–52.
- ASM International. (1990). *ASM handbook* (Vol. 2: Properties and selection: Nonferrous *Alloys* and special-purpose materials). ASM International.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2009). *Materials science and engineering: An introduction* (8th ed.). John Wiley & Sons.
- Chen, Y., & Liu, Z. (2022). Review on *Quenching* media effects in Al-Si *Alloys*: Emphasis on CaCO_3 solutions and XRD analysis. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 29(4), 678–689. <https://doi.org/10.1007/s12613-022-2456-8>
- Cullity, B. D., & Stock, S. R. (2001). *Elements of X-Ray Diffraction* (3rd ed.). Prentice Hall.
- Dash, S. S., & Chen, D. (2023). A review on processing–microstructure–property relationships. *Metals*, 13(3), 609. <https://doi.org/10.3390/met13030609>
- Davis, J. R. (Ed.). (1993). *Aluminum and aluminum Alloys* (ASM Specialty Handbook). ASM International.
- Deschamps, A., & Bréchet, Y. (1999). Influence of *Quenching* and deformation on precipitation in aluminium *Alloys*. *Journal of Materials Science*.
- Ferro, P., Meneghello, R., Savio, G., & Berto, F. (2020). A modified volumetric energy density–based approach for porosity assessment in additive manufacturing process design. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110(7–8), 1911–1921. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05949-9>
- Gupta, R., Kumar, A., & Jain, M. (2019). Comparative study of *Quenching* media on Al-Si *Alloy* properties: Focus on CaCO_3 solutions. *Journal of Alloys and Compounds*. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.07.178>
- Hatch, J. E. (Ed.). (1984). *Aluminum: Properties and physical metallurgy*. ASM International.
- Ikumapayi, O. M. (2022). *Efficacy of Heat Treatment on the material properties of aluminium Alloy matrix composite impregnated with silver nanoparticle/calcium carbonate*.
- Kang, H.-J., Park, J.-Y., Choi, Y.-S., & Cho, D.-H. (2021). Influence of the solution and *Artificial Aging* treatments on the microstructure and mechanical properties of die-cast Al–Si–Mg *Alloys*. *Metals*, 12(1), 71. <https://doi.org/10.3390/met12010071>
- Kennedy, A. J. (1990). *Mechanical testing of materials*. Elsevier.

- Kumar, A., et al. (2018). Effect of *Quenching* media on microstructure and mechanical properties of Al-Si Alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27(5), 2345–2352. <https://doi.org/10.1007/s11665-018-3321-5>
- Li, H., Zhang, L., & Wang, Q. (2021). Microstructural evolution in Al-Si Alloys quenched in CaCO₃ solutions: XRD and *Hardness* correlations. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 52(8), 3456–3465. <https://doi.org/10.1007/s11661-021-06345-7>
- Liu, F., Yu, F., & Zhao, D. (2022). Aging behavior and precipitates analysis of wrought aluminum Alloys. *Materials*, 15(22), 8194. <https://doi.org/10.3390/ma15228194>
- Mondolfo, L. F. (1976). *Aluminum Alloys: Structure and properties*. Butterworths.
- Polmear, I. J. (2006). *Light Alloys: From traditional Alloys to nanocrystals* (4th ed.). Elsevier.
- Prasetyo, D. (2022). Pengaruh media *Quenching* terhadap sifat mekanik paduan aluminium seri 6061 setelah *Artificial Aging*. *Jurnal Teknologi dan Manufaktur*, 10(4), 77–85.
- Pratama, F. (2023). *Studi eksperimental media alternatif Quenching berbasis suspensi padat*.
- Rahmadani, A. (2021). *Analisis pengaruh media pendingin terhadap proses Quenching dan perubahan sifat mekanik baja*.
- Sahul, R., Pradhan, S., & Dash, S. S. (2020). Effect of mineral-based liquid *Quenching* media on *Cooling Rate* and mechanical properties of heat-treated Alloys. *Journal of Materials Engineering Research*.
- Saputro, H. (2008). Pengaruh temperatur dan waktu penahanan *Artificial Aging* pada proses *age hardening* terhadap tingkat kekerasan logam paduan. *JIPTEK*, 1(1).
- Smith, W. F., & Hashemi, J. (2011). *Foundations of materials science and engineering* (5th ed.). McGraw-Hill.
- Suryanto, A. (2019). Karakterisasi presipitasi Al₂Cu pada paduan Al-Cu melalui perlakuan *Artificial Aging*. *Jurnal Material dan Proses*, 8(1), 33–40.
- Suyitno, A. (2020). Kajian karakteristik kalsium karbonat dalam aplikasi industri bahan teknik.
- Totten, G. E., & MacKenzie, D. S. (2003). *Handbook of aluminum: Alloy production and materials manufacturing*. CRC Press.
- Wijayanto, B. (2022). Pengaruh penambahan kalsium karbonat terhadap karakteristik fisik bahan material.
- Zhang, L., & Wang, Q. (2020). Influence of CaCO₃ solution composition on *Quenching* and *Aging* of Al-Si Alloys: Microstructure and *Hardness* analysis. *Materials Science and Engineering A*, 788, 139567. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139567>