

**PENGARUH KOMPOSISI MEDIA PENDINGIN LARUTAN CaCO_3 25%
TERHADAP KEKERASAN DAN STRUKTUR KRISTAL *X-RAY*
DIFRACTION (XRD) PADUAN ALUMINIUM SILIKON YANG TELAH
MENGALAMI PROSES *SOLUTION TREATMENT* DAN *ARTIFICIAL AGING***

Luthfil Khakim*, Masyrukan, S.T., M.T.

**Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah
Surakarta**

Abstrak

Paduan Aluminium Silikon (Al-Si) merupakan material yang banyak digunakan pada industri karena memiliki massa jenis rendah, ketahanan korosi yang baik, serta sifat mekanik yang dapat ditingkatkan melalui proses *heat treatment*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh media pendingin air dan larutan CaCO_3 25% pada proses *solution treatment* dan *artificial aging* terhadap kekerasan dan struktur kristal paduan Aluminium Silikon (Al-Si). Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan material Al-Si yang mengandung 86,39% Al dan 10,10% Si. Spesimen diberi perlakuan *solution heat treatment* pada suhu 580°C , kemudian dilakukan *quenching* menggunakan media air dan larutan CaCO_3 25%, serta *artificial aging* pada suhu 200°C . Karakterisasi struktur kristal dilakukan menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD), sedangkan pengujian kekerasan menggunakan metode *Micro Vickers*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh spesimen memiliki dua fase utama, yaitu Aluminium (Al) dengan struktur kristal Face Centered Cubic (FCC) dan Silikon (Si) dengan struktur kristal Diamond Cubic. Perlakuan *quenching* dan *artificial aging* tidak menghasilkan fase baru, namun menyebabkan perubahan intensitas puncak difraksi yang mengindikasikan perubahan karakteristik struktur kristal. Nilai kekerasan tertinggi diperoleh pada spesimen *quenching* media air sebesar 94,02 HV, sedangkan *quenching* menggunakan larutan CaCO_3 25% menghasilkan kekerasan sebesar 89,32 HV dan meningkat menjadi 89,52 HV setelah *artificial aging*. Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa media pendingin air memberikan peningkatan kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan larutan CaCO_3 25%, sedangkan perlakuan panas tidak mengubah fase maupun struktur kristal utama paduan Aluminium Silikon.

Kata kunci: Aluminium Silikon (Al-Si), Quenching, Artificial Aging, CaCO_3 , XRD.

Abstract

Aluminum-Silicon (Al-Si) alloy is widely used in industrial applications due to its low density, excellent corrosion resistance, and mechanical properties that can be enhanced through heat treatment. This study aims to analyze the effect of water and 25 wt.% CaCO_3 solution as quenching media during the solution treatment and artificial aging processes on the hardness and crystal structure of Aluminum-Silicon (Al-Si) alloy. An experimental method was employed using Al-Si alloy specimens containing 86.39% Al and 10.10% Si. The specimens were subjected to solution heat treatment at 580°C , followed by quenching in water and a 25% CaCO_3 solution, and subsequently artificially aged at 200°C . Crystal structure characterization was performed using X-Ray Diffraction (XRD), while hardness testing was conducted using the Micro Vickers method. The results showed that all specimens consisted of two primary phases, namely Aluminum (Al) with a Face-Centered Cubic (FCC) crystal structure and Silicon (Si) with a Diamond Cubic crystal structure.

The quenching and artificial aging treatments did not produce any new phases; however, they caused changes in the diffraction peak intensities, indicating modifications in the crystal structure characteristics. The highest hardness value was obtained from the water-quenched specimen, reaching 94.02 HV, whereas the specimen quenched in the 25% CaCO_3 solution exhibited a hardness of 89.32 HV, which increased to 89.52 HV after artificial aging. In conclusion, water as the quenching medium provided a greater improvement in hardness than the 25% CaCO_3 solution. Furthermore, the applied heat treatment did not alter the primary phases or crystal structures of the Aluminum-Silicon alloy.

Keywords: *Aluminum-Silicon (Al-Si), Quenching, Artificial Aging, CaCO_3 , XRD*

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi dan industri modern mendorong kebutuhan akan material yang ringan, kuat, dan memiliki ketahanan korosi yang baik. Salah satu material yang banyak digunakan untuk memenuhi kebutuhan tersebut adalah aluminium karena memiliki massa jenis rendah, sekitar sepertiga dari baja, konduktivitas termal dan listrik yang baik, mudah dibentuk, serta tahan terhadap korosi. Namun, aluminium murni memiliki kekuatan mekanik yang relatif rendah sehingga diperlukan upaya untuk meningkatkan sifatnya, salah satunya melalui pembentukan paduan dengan unsur lain seperti silikon (Si). Penambahan silikon pada aluminium menghasilkan paduan Aluminium Silikon (Al-Si) yang memiliki sifat mampu cor yang baik, ketahanan aus yang lebih tinggi, serta sifat mekanik yang dapat ditingkatkan melalui proses perlakuan panas (*heat treatment*). (Sultan and Hamzah 2019)

Salah satu metode yang banyak digunakan untuk meningkatkan sifat mekanik paduan Aluminium Silikon (Al-Si) adalah perlakuan panas (*heat treatment*). Perlakuan panas merupakan proses pemanasan dan pendinginan material pada temperatur serta waktu tertentu dengan tujuan memperoleh sifat mekanik yang diinginkan, seperti peningkatan kekerasan, kekuatan, dan perbaikan struktur mikro. Pada paduan Al-Si, perlakuan panas umumnya dilakukan melalui tahapan *solution treatment*, *quenching*, dan *artificial aging*. Proses *solution treatment* bertujuan melarutkan unsur paduan ke dalam matriks aluminium sehingga terbentuk larutan padat homogen, kemudian dilanjutkan dengan *quenching* untuk mempertahankan kondisi larutan padat jenuh (*supersaturated solid solution*). Selanjutnya, proses *artificial aging* dilakukan untuk menghasilkan presipitat halus yang mampu menghambat pergerakan dislokasi sehingga nilai kekerasan dan kekuatan material dapat meningkat. (Tsamroh and Riza Fauzy 2022)

Keberhasilan proses *quenching* sangat dipengaruhi oleh media pendingin yang digunakan karena setiap media memiliki laju pendinginan (*cooling rate*) yang berbeda. Media

pendingin yang umum digunakan adalah air, oli, dan larutan garam. Perbedaan *cooling rate* tersebut berpengaruh terhadap perubahan struktur mikro dan sifat mekanik material setelah perlakuan panas. Penelitian yang dilakukan oleh (Aziza 2020) mengenai pengaruh kadar garam (NaCl) dalam media pendingin terhadap kekerasan baja ST-60 menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi NaCl menyebabkan laju pendinginan semakin tinggi sehingga nilai kekerasan material meningkat secara signifikan. Nilai kekerasan tercatat sebesar 264,5 HV pada media pendingin NaCl 20% dan meningkat menjadi 311 HV pada konsentrasi NaCl 30%. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa variasi komposisi media pendingin berpengaruh langsung terhadap *cooling rate*, transformasi struktur mikro, dan sifat mekanik material setelah proses *quenching*.

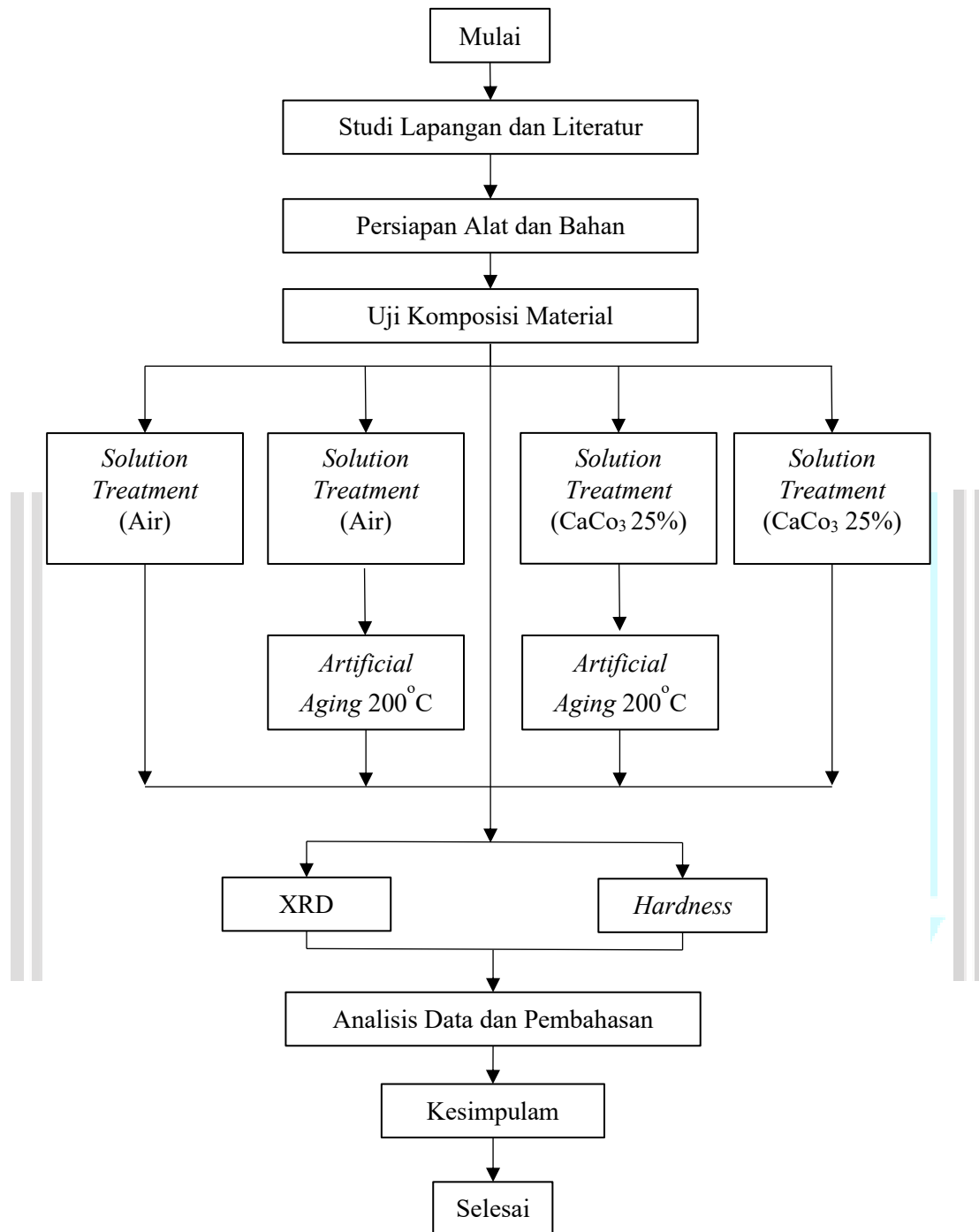
Meskipun berbagai penelitian telah mengkaji pengaruh media pendingin konvensional seperti air, oli, dan larutan garam terhadap sifat mekanik material, penelitian mengenai penggunaan larutan CaCO_3 sebagai media pendingin pada paduan Aluminium Silikon (Al-Si) masih relatif terbatas. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui pengaruh larutan CaCO_3 25% terhadap struktur kristal dan kekerasan paduan Al-Si setelah proses *quenching* dan *artificial aging*.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan media pendingin air dan larutan CaCO_3 25% pada proses *quenching* dan *artificial aging* terhadap struktur kristal dan nilai kekerasan paduan Aluminium Silikon (Al-Si). Pengujian struktur kristal dilakukan menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD), sedangkan pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode *Micro Vickers*.

2. METODE

2.1 Rancangan Penelitian

Penelitian ini dilakukan sesuai dengan alur penelitian yang telah ditentukan. Berikut ini adalah diagram alirnya.



Gambar 1 Diagram Alir

2.2 Bahan dan Alat

2.2.1 Bahan Penelitian

Barang – barang yang digunakan untuk tujuan penelitian ini yaitu diantaranya

1. Spesimen uji paduan Alumunium Silikon (Al-Si) dengan diameter 20 mm tebal 20 mm .Dengan komposisi paduan sebagai berikut :

Tabel 1 Komposisi Paduan Si

NSUR	KANDUNGAN (%)
Al	86,39
Si	10,10
Fe	0,910
Cu	1,570
Mn	0,133
Mg	0,070
Cr	0,022
Ni	0,035
Zn	0,654
Ti	0,035
Pb	0,032
Sn	0,015
*V	0,0086
*Sr	<0,0020
*Li	<0,300

2. Kapur Gamping atau Kalsium Karbonat (CaCO_3)

2.2.2 Alat Penelitian.

Alat – alat yang digunakan untuk menyiapkan dan menguji specimen dalam penelitian ini yaitu diantaranya :

1. Tungku Pemanas (*Furnace*)

Tungku (*Furnace*) merupakan alat yang digunakan untuk melakukan proses perlakuan panas (*heat treatment*) pada spesimen dengan suhu yang dapat diatur dan dikontrol. Pada penelitian ini, tungku pemanas digunakan untuk

memanaskan paduan Aluminium Silikon (Al-Si) pada proses *solution heat treatment* sebelum dilakukan proses quenching dan *artificial aging*.



Gambar 2 Tungku Pemanas

2. Ember

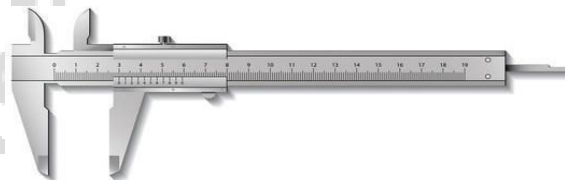
Ember merupakan alat yang digunakan sebagai wadah media pendingin pada proses *quenching*. Pada penelitian ini, ember digunakan untuk menampung media pendingin berupa air dan larutan CaCO_3 25% yang digunakan untuk mendinginkan spesimen paduan Aluminium Silikon (Al-Si) setelah proses *solution heat treatment*.



Gambar 3 Ember

3. Jangka Sorong

Jangka sorong adalah alat ukur presisi yang digunakan untuk mengukur panjang, diameter luar, diameter dalam, dan kedalaman suatu benda dengan ketelitian tinggi, umumnya hingga 0,1 mm, 0,05 mm, atau 0,02 mm tergantung jenisnya.



Gambar 4 Jangka sorong

4. Wadah Sampel

Wadah sampel merupakan alat yang digunakan untuk menyimpan dan mengelompokkan spesimen selama proses penelitian. Pada penelitian ini, wadah sampel digunakan untuk menempatkan spesimen paduan Aluminium Silikon (Al-Si) sebelum dan sesudah proses perlakuan panas agar tetap terorganisir serta menghindari terjadinya pencampuran antar sampel.



Gambar 5 Wadah sampel

5. Amplas

Amplas merupakan alat yang digunakan untuk menghaluskan dan meratakan permukaan spesimen sebelum dilakukan pengujian. Pada penelitian ini, amplas digunakan pada proses preparasi sampel paduan Aluminium Silikon (Al-Si) untuk menghilangkan goresan, kerak, dan ketidakrataan permukaan sehingga diperoleh permukaan yang lebih halus dan siap untuk pengujian kekerasan maupun karakterisasi struktur kristal.



Gambar 6 Amplas

6. Mesin Pemotong

Mesin pemotong merupakan alat yang digunakan untuk memotong spesimen sesuai dengan ukuran yang telah ditentukan. Pada penelitian ini, mesin pemotong digunakan untuk memotong paduan Aluminium Silikon (Al-Si) sehingga diperoleh dimensi sampel yang seragam dan sesuai untuk proses perlakuan panas serta pengujian selanjutnya.



Gambar 7 Mesin pemotong

7. Manual Metallographic dan Polishing Machine

Manual metallographic dan polishing machine merupakan alat yang digunakan dalam proses preparasi spesimen sebelum pengujian. Alat ini berfungsi untuk melakukan pengamplasan dan pemolesan permukaan spesimen sehingga diperoleh permukaan yang rata, halus, dan bebas dari kotoran maupun goresan. Preparasi yang baik diperlukan untuk meningkatkan kualitas permukaan spesimen dan mendukung akurasi hasil pengujian kekerasan Micro Vickers serta karakterisasi struktur kristal menggunakan X-Ray Diffraction (XRD).



Gambar 8 Manual *Metallographic & Polishing Machine*

8. Kain Bludru

Kain bludru merupakan media pemoles yang dipasang pada polishing machine dan digunakan bersama dengan cairan atau pasta polishing. Kain ini memiliki permukaan yang lembut sehingga mampu menghasilkan tingkat kehalusan permukaan yang tinggi tanpa menimbulkan goresan baru pada spesimen. Penggunaan kain bludru bertujuan memperoleh permukaan spesimen yang halus dan homogen sehingga mendukung keakuratan hasil pengujian material.



Gambar 9 Kain Bludru

9. Alat Uji Komposisi Kimia

Alat uji komposisi kimia merupakan alat yang digunakan untuk mengetahui kandungan unsur-unsur penyusun material. Pada penelitian ini, alat uji komposisi kimia digunakan untuk menganalisis kandungan unsur pada paduan Aluminium Silikon (Al-Si) sebagai data awal sebelum dilakukan proses perlakuan panas dan pengujian lainnya.



Gambar 10 Alat Uji Komposisi Kimia

10. Thermogun

Thermogun merupakan alat ukur suhu yang bekerja tanpa kontak langsung dengan objek menggunakan sensor inframerah. Pada penelitian ini, thermogun digunakan untuk mengukur dan memantau suhu spesimen maupun media pendingin selama proses perlakuan panas agar sesuai dengan kondisi yang telah ditentukan.



Gambar 11 Thermogun

11. X-Ray Diffraction (XRD)

adalah instrumen analisis material yang digunakan untuk mengidentifikasi struktur kristal, fasa, dan parameter kisi suatu bahan dengan memanfaatkan pola difraksi sinar-X yang dihasilkan ketika sinar-X diarahkan ke material kristalin. Sinar-X yang mengenai bidang atom dalam material akan terdifraksi pada sudut

tertentu sesuai dengan Hukum Bragg, sehingga menghasilkan pola khas yang merepresentasikan susunan atom di dalam material.



Gambar 12 Alat X-Ray Diffraction

12. Alat Uji Kekerasan

Alat Uji Kekerasan adalah perangkat yang digunakan untuk mengukur tingkat kekerasan suatu material dengan cara memberikan beban tertentu melalui indenter ke permukaan material, kemudian menilai besar atau entuk jejak yang dihasilkan.



Gambar 13 Alat Uji Kekerasan

2.3 Instalasi Pengujian

Adapun beberapa proses pengujian yang terdapat dalam penelitian ini, yaitu sebagai berikut.

Instalasi Proses Solution Heat Treatment

1. Tungku Pemanas (*Furnace*)

Tungku pemanas digunakan untuk memanaskan spesimen hingga mencapai suhu perlakuan panas sebesar 580°C. Tungku mampu mempertahankan suhu secara

stabil selama proses pemanasan dan waktu penahanan (*holding time*) berlangsung.

2. Spesimen Paduan Aluminium-Silikon

Spesimen yang digunakan merupakan paduan aluminium-silikon yang telah dipotong sesuai ukuran pengujian. Spesimen ditempatkan di dalam tungku untuk menjalani proses *heat treatment*.

3. Pengatur Suhu (*Temperature Controller*)

Pengatur suhu digunakan untuk mengontrol dan memantau temperatur tungku selama proses pemanasan. Pada penelitian ini, temperatur pemanasan diatur pada 580°C dengan waktu penahanan (*holding time*) selama 20 menit

4. Peralatan Penjepit dan Keselamatan

Penjepit tahan panas digunakan untuk mengambil spesimen dari dalam tungku setelah proses *heat treatment* selesai. Selain itu, peralatan keselamatan seperti sarung tangan tahan panas

2.4 Instalasi Proses Quenching

Instalasi proses *quenching* pada penelitian ini terdiri atas beberapa peralatan yang digunakan untuk proses pendinginan cepat spesimen setelah dilakukan *solution heat treatment*. Adapun instalasi yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Wadah Media Pendingin Air

Wadah media pendingin air digunakan untuk proses *quenching* dengan media air. Wadah terbuat dari bahan yang tahan terhadap perubahan temperatur dan memiliki ukuran yang cukup untuk merendam seluruh bagian spesimen.

2. Wadah Media Pendingin Larutan CaCO₃ 25%

Wadah media pendingin diisi dengan larutan CaCO₃ 25% yang telah dicampur secara homogen. Wadah ditempatkan di dekat tungku untuk meminimalkan penurunan temperatur spesimen selama proses pemindahan dari tungku menuju media pendingin.

3. Penjepit Tahan Panas

Penjepit tahan panas digunakan untuk mengambil spesimen dari dalam tungku setelah proses *solution heat treatment* selesai dan memindahkannya ke media pendingin. Penggunaan penjepit bertujuan untuk mempermudah proses pemindahan sekaligus menjaga keselamatan operator

4. Spesimen Paduan Aluminium-Silikon

Spesimen yang telah mengalami proses *heat treatment* pada suhu 580°C dengan waktu penahanan (*holding time*) selama 20 menit segera dicelupkan ke dalam media pendingin untuk memperoleh laju pendinginan yang tinggi.

2.5 Instalasi Proses Artificial Aging

Instalasi proses *artificial aging* pada penelitian ini terdiri atas beberapa peralatan yang digunakan untuk melakukan perlakuan panas lanjutan setelah proses *quenching*. Proses ini bertujuan untuk mengoptimalkan pembentukan presipitat sehingga dapat meningkatkan sifat mekanik, khususnya kekerasan material. Adapun instalasi yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Tungku Pemanas (*Furnace*)

Tungku pemanas digunakan untuk memanaskan spesimen yang telah mengalami proses *quenching* hingga mencapai suhu *artificial aging* sebesar 200°C. Suhu pemanasan dipertahankan secara konstan selama waktu penahanan (*holding time*) 20 menit.

2. Spesimen Paduan Aluminium-Silikon

Spesimen yang digunakan merupakan paduan aluminium-silikon yang telah melalui proses *heat treatment* dan *quenching*. Spesimen ditempatkan di dalam tungku untuk menjalani proses *artificial aging* sesuai parameter penelitian.

3. Pengatur Suhu (*Temperature Controller*)

Pengatur suhu digunakan untuk mengatur dan memantau temperatur tungku selama proses *artificial aging*. Alat ini memastikan suhu tetap stabil pada 200°C selama waktu penahanan berlangsung.

4. Penjepit Tahan Panas

Penjepit tahan panas digunakan untuk memasukkan dan mengeluarkan spesimen dari dalam tungku. Penggunaan penjepit bertujuan untuk memudahkan penanganan spesimen sekaligus menjaga keselamatan operator.

5. Peralatan Keselamatan Kerja

Peralatan keselamatan yang digunakan meliputi sarung tangan tahan panas, kacamata pelindung, dan apron. Peralatan tersebut digunakan untuk melindungi operator dari paparan panas selama proses *artificial aging* berlangsung.

2.6 Instalasi Proses Pengujian X-Ray Diffraction (XRD)

Untuk menganalisis perubahan struktur kristal akibat proses *quenching* dan *artificial aging*, digunakan instalasi X-Ray Diffraction (XRD) yang meliputi Mesin X-Ray Diffraction (XRD Unit Utama)

1. Sumber Sinar-X (X-Ray Tube) dan Sistem Optik Difraksi

Tabung sinar-X menghasilkan radiasi $\text{Cu-K}\alpha$ yang diarahkan ke sampel. Sistem optik (slit/monochromator) memastikan sinar yang stabil dan fokus.

2. Dudukan Sampel (Sample Holder)

Tempat meletakkan sampel agar posisinya stabil dan tepat pada jalur sinar-X selama proses pemindaian.

3. Detektor Difraksi

Menangkap sinar-X yang terdifraksi saat bergerak mengikuti sudut 2θ untuk menghasilkan data intensitas difraksi.

4. Perangkat Lunak Analisis

Mengolah hasil difraksi untuk identifikasi fase kristal, indeks miller, intensitas dan menganalisis puncak XRD.

2.7 Instalasi Proses Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan Hardness Tester tipe *Micro Vickers*, yang terdiri atas:

1. Mesin Uji Kekerasan *Micro Vickers*

Berfungsi memberikan beban penetrasi tertentu menggunakan indenter berbentuk piramida intan dengan sudut puncak 136° pada permukaan spesimen sesuai beban uji yang ditetapkan.

2. Meja Penyangga Spesimen

Berfungsi menopang dan menjaga kestabilan spesimen selama proses indentasi agar permukaan uji tetap sejajar dengan indenter.

3. Sistem Pengukuran dan Pembacaan Kekerasan

Digunakan untuk mengukur panjang diagonal bekas indentasi melalui mikroskop optik, yang selanjutnya digunakan untuk menghitung nilai kekerasan Vickers (HV).

2.8 Spesimen Penelitian

Sampel spesimen yang digunakan dalam penelitian ini yaitu :

1. Aluminium Silikon (Al-Si)

Aluminium Silikon yang digunakan sebagai specimen uji dalam proses penelitian ini. Ukuran specimen untuk penelitian ini adalah $\varnothing = 20 \text{ mm}$ dan $T = 20\text{mm}$. Spesimen aluminium silicon dapat dilihat pada gambar 3.12



Gambar 14 Sampel Al-Si

2. Kalsium Karbonat (CaCO_3)

Kalsium karbonat (CaCO_3) yang digunakan sebagai spesimen uji dalam proses penelitian ini merupakan senyawa anorganik berbentuk serbuk putih yang umum digunakan dalam berbagai aplikasi industri. Dalam penelitian ini CaCO_3 digunakan sebagai campuran media pendingin.

2.9 Lokasi Penelitian

Pada penelitian ini, pelaksanaan kegiatan dilakukan di lokasi yang telah ditentukan sesuai kebutuhan eksperimen diantaranya :

1. Laboratorium Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Surakarta yang berlokasi di Jl. A. Yani, Pabelan, Kartasura, Sukoharjo, Jawa Tengah 57169 Indonesia.
2. Di Politeknik Manufaktur Ceper Klaten.
3. Laboratorium Teknik Mesin Universitas Negeri Sebelas Maret.
4. Laboratorium Penelitian dan Pengujian Terpadu (LPPTD) Universitas Gadjah Mada.

2.10 Prosedur Penelitian

2.10.1 Persiapan Alat dan Bahan

Persiapan bahan dan alat dilakukan mulai dengan menyiapkan peralatan Quenching, spesimen, dan Kalsium Karbonat. Adapun yang dibutuhkan diantaranya :

1. 10 sampel Aluminium paduan (Al-Si) yang telah di bersihkan dan dipotong sesuai ukuran.
2. Timbangan digunakan untuk menimbang Kalsium karbonat.
3. Kalsium Karbonat yang sudah di timbang untuk membuat Komposisi larutan CaCO_3 .
4. Ember 2 buah sebagai wadah pendinginan cepat (*Quenching*).
5. Timer digunakan untuk menghitung lama waktu proses holding time Heat Treatment dan Artificial Aging.

2.10.2 Proses Uji Komposisi

Pengujian komposisi kimia dilakukan berdasarkan standar ASTM E125-17 untuk mengidentifikasi kandungan unsur pada material yang digunakan dalam penelitian:

1. Sampel logam dibersihkan dari kotoran, minyak, oksida, atau kontaminan lain yang dapat memengaruhi hasil pengujian. Permukaan sampel biasanya diampelas atau digerinda untuk mendapatkan permukaan yang rata dan homogen sebelum dianalisis.
2. Sampel ditempatkan pada ruang analisis alat, misalnya pada port pembacaanudukan *X-Ray Fluorescence* (XRF). Penempatan dilakukan dengan memastikan sampel stabil dan posisi permukaan berada pada titik pembacaan yang tepat.
3. Mengatur parameter alat, seperti mode pengujian, jenis material, serta rentang unsur yang ingin dianalisis. Kalibrasi alat dilakukan jika diperlukan untuk memastikan akurasi hasil.
4. Alat kemudian melakukan pembacaan dengan memancarkan energi (sinar-X) ke permukaan sampel. Energi yang dipancarkan kembali oleh atom-atom unsur pada sampel ditangkap oleh detektor, lalu diubah menjadi data komposisi kimia berdasarkan intensitas spektrum yang diterima.
5. Hasil pembacaan berupa persentase unsur-unsur dalam sampel ditampilkan pada layar perangkat.
6. Setelah pengujian selesai, sampel dilepas dari alat dan area pembacaan dibersihkan untuk menjaga keakuratan alat pada pengujian berikutnya.

2.10.3 Proses Heat Treatment

Berikut merupakan tahapan yang dilakukan dalam proses quenching, dimulai dari pemanasan spesimen hingga proses pendinginan dan evaluasi hasil:

1. Spesimen dibersihkan dari minyak, kotoran, serta oksida yang menempel pada permukaan.
2. Spesimen dimasukkan ke dalam tungku pemanas (*furnace*) yang telah dikondisikan.
3. Tungku diatur pada temperatur yang telah ditentukan sesuai jenis material. Spesimen dipanaskan hingga mencapai suhu austenisasi yaitu 580 C dan ditahan pada waktu 20 menit.
4. Wadah quenching / ember diisi dengan media pendingin seperti air atau larutan CaCO_3 25%.

2.10.4 Proses Quenching

Berikut merupakan tahapan yang dilakukan dalam proses quenching, dimulai dari pemanasan spesimen hingga proses pendinginan dan evaluasi hasil:

1. Spesimen dikeluarkan dari tungku menggunakan penjepit atau alat keselamatan lainnya.
2. Spesimen dicelupkan sepenuhnya ke dalam media pendingin air dan larutan CaCO_3 25%.
3. Setelah temperatur spesimen turun hingga mencapai kondisi aman, spesimen dibersihkan dari residu media pendingin.

2.10.5 Proses Artificial Aging

Proses artificial aging dilakukan setelah quenching untuk memicu pembentukan presipitasi yang dapat meningkatkan kekuatan material, khususnya pada paduan aluminium seperti Al-Si. Berikut tahapan lengkapnya:

1. Spesimen yang telah mengalami proses quenching didinginkan hingga mencapai suhu ruangan.
2. Spesimen ditempatkan di dalam tungku setelah suhu mencapai nilai yang ditetapkan.
3. Spesimen ditahan pada suhu aging yaitu 200 C selama 20 menit.
4. Setelah waktu penahanan tercapai, spesimen dikeluarkan dari tungku dan dibiarkan mendingin pada suhu ruang.
5. Spesimen diperiksa secara visual untuk memastikan tidak terjadi perubahan warna atau cacat permukaan.

2.10.6 Pengujian X-Ray Diffraction

Pengujian X-Ray Diffraction (XRD) dilakukan untuk mengidentifikasi fasa dan struktur kristal material menggunakan alat Bruker AXS D8 Advance Eco. Adapun tahapan pengujian adalah sebagai berikut:

1. Spesimen yang akan diuji berupa padatan dengan permukaan yang telah dipersiapkan agar rata dan bersih sehingga pancaran sinar-X dapat mengenai permukaan spesimen secara merata.
2. Sampel diletakkan pada *sample holder* XRD dan diratakan untuk menghindari orientasi butiran yang tidak merata.
3. Perangkat XRD dinyalakan, kemudian parameter pengujian disetel, seperti: jenis radiasi ($\text{Cu-K}\alpha$), rentang sudut 2θ , kecepatan pemindaian, dan ukuran langkah (step size).
4. Sampel ditempatkan ke dalam ruang XRD, lalu posisi *holder* dikunci agar tidak

bergerak selama pemindaian.

5. Proses pemindaian (scanning) dijalankan sehingga sinar-X ditembakkan ke sampel dan difraktikan pada berbagai sudut 2θ untuk menghasilkan pola difraksi.
6. Data difraktogram yang terbentuk direkam oleh detektor dan disimpan dalam perangkat lunak XRD.
7. Pola XRD kemudian dianalisis untuk mengidentifikasi puncak difraksi (2θ), intensitas relatif, indeks Miller (hkl), fase kristal menggunakan database JCPDS dan menghitung ukuran kristalit menggunakan persamaan Scherrer.
8. Setelah proses selesai, alat XRD dimatikan dan sampel dikeluarkan dari ruang pengujian.

2.10.7 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan Micro Vickers dilakukan berdasarkan standar ASTM E384 untuk mengetahui nilai kekerasan material setelah proses perlakuan panas. Tahapan pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Sampel yang telah melalui proses pemolesan dipastikan memiliki permukaan rata, bersih, dan bebas goresan.
2. Spesimen diletakkan pada dudukan atau meja uji dengan posisi permukaan terpolish menghadap indenter.
3. Memilih jenis indenter berupa intan berbentuk piramida segi empat dengan sudut puncak 136° .
4. Indenter ditekan ke permukaan spesimen secara bertahap hingga mencapai beban penuh.
5. Setelah beban dilepas, jejak indentasi diukur. pengukuran diameter atau diagonal indentasi menggunakan mikroskop digital atau optic atau dibaca langsung dari skala mesin.
6. Nilai kekerasan yang diperoleh dicatat, biasanya dalam satuan HV (Vickers).
7. Data kekerasan dianalisis untuk menentukan efek perlakuan panas seperti quenching dan aging terhadap perubahan sifat mekanik.

2.11 Rancangan Analisis Data

Model data informasional yang didasarkan pada temuan pengujian studi adalah desain analisis data.

2.11.1 Rancangan Analisis Uji X-Ray Diffraction (XRD)

Pengujian struktur kristal dilakukan menggunakan perangkat X-Ray Diffractometer (XRD) tipe Bruker AXS D8 Advance Eco. Tujuan pemeriksaan ini adalah untuk mengetahui fase

kristal, tingkat kristalinitas, dan ukuran kristalit pada sampel setelah perlakuan quenching dan aging. Sampel dianalisis menggunakan radiasi Cu-K α dalam rentang sudut 2θ yang ditetapkan.

Data difraktogram yang diperoleh kemudian dicocokkan dengan database JCPDS untuk identifikasi fase, indeks Miller (hkl), puncak difraksi (2θ), intensitas relatif, nilai Full Width at Half Maximum (FWHM). Selain itu, ukuran kristalit dihitung menggunakan Persamaan Scherrer dengan memanfaatkan data nilai FWHM, sudut Bragg (θ), dan panjang gelombang sinar-X yang digunakan selama pengujian.

Ukuran kristalit dihitung menggunakan Persamaan Scherrer sebagai berikut:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

Keterangan :

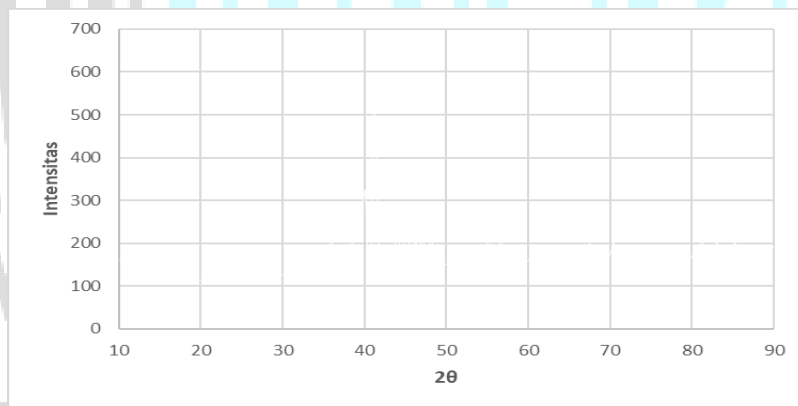
D = ukuran kristalit (nm)

K = konstanta Scherrer (0,9)

λ = panjang gelombang sinar-X Cu-K α (0,15406 nm)

β = nilai FWHM (radian)

θ = sudut Bragg ($^{\circ}$)



Gambar 15 Grafik Rancangan Data Hasil XRD

2.11.2 Rancangan Analisis uji Kekerasan Micro Vickers

Pengujian kekerasan pada material paduan aluminium-silikon dilakukan menggunakan alat uji kekerasan tipe *Micro Vickers*. Metode ini dipilih karena mampu memberikan ketelitian tinggi, terutama untuk material yang memiliki lapisan hasil perlakuan panas seperti karburisasi. Pengujian *Micro Vickers* menggunakan indenter berbentuk piramida intan dengan sudut puncak 136° , kemudian beban tertentu diaplikasikan selama waktu penahanan standar sehingga menghasilkan jejak indentasi berbentuk belah ketupat.

Tujuan utama dari pengujian ini adalah untuk menentukan nilai kekerasan lapisan permukaan material setelah proses karburisasi serta mengevaluasi perubahan sifat mekanik

yang terjadi. Nilai kekerasan Vickers diperoleh dengan mengukur panjang kedua diagonal jejak indentasi, kemudian dihitung menggunakan rumus :

$$HV = \frac{1.854 \times P}{d^2} \quad (2)$$

Dimana,

HV = Kekerasan Vickers (Kgf/mm²)

P = Beban uji (Kgf)

d = Rata rata diagonal indentasi (mm)

Hasil pengujian kekerasan secara lengkap disajikan pada Tabel 3.2

Tabel 2 Rancangan Hasil Pengujian Kekerasan

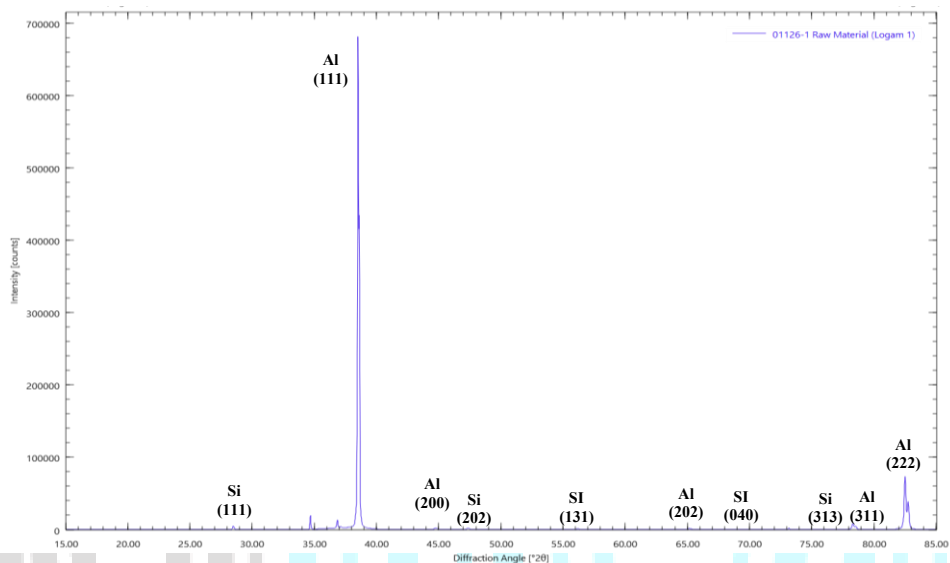
Hasil Uji Kekerasan media pendingin						
Sampel	Kekerasan HV (100 gf)					Rata Rata (HV)
	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4	Titik 5	
Raw Material						
Quenching Air						
Quenching Air dan Artificial Aging						
Presentase Perubahan kekerasan						
Quenching Air						
Quenching Air dan Artificial Aging						

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Analisa Pengujian XRD

3.1.1 Analisa Hasil Pengujian XRD pada Raw Material

Di bawah ini ditampilkan spektrum hasil pengujian X-Ray Diffraction (XRD) pada sampel *raw material* sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.1. Interpretasi pola difraksi dilakukan menggunakan perangkat lunak Match! 4 dengan database PDF (Powder Diffraction File) untuk mengidentifikasi unsur yang terdeteksi, menentukan bidang kristal (indeks Miller), serta memperoleh parameter difraksi seperti sudut 2θ, intensitas, Full Width at Half Maximum (FWHM), dan ukuran kristalit. Parameter-parameter tersebut digunakan untuk mengevaluasi kondisi awal struktur kristal paduan aluminium-silikon sebelum diberi perlakuan panas.



Gambar 16 Grafik XRD pada Raw Material

Berdasarkan Gambar 4.1 pola difraksi XRD pada sampel *raw material* menunjukkan bahwa *raw material* tersusun atas dua unsur utama, yaitu unsur aluminium (Al) dan unsur silikon (Si). Unsur Si teridentifikasi pada sudut difraksi 2θ sebesar $28,48^\circ$, $47,33^\circ$, $56,15^\circ$, $69,19^\circ$, dan $76,39^\circ$ dengan indeks Miller berturut-turut (111), (202), (131), (040), dan (313). Sementara itu, unsur Al teridentifikasi pada sudut 2θ sebesar $38,51^\circ$, $44,77^\circ$, $65,14^\circ$, $78,30^\circ$, dan $82,49^\circ$ dengan indeks Miller (111), (200), (202), (222), dan (311). Keberadaan kedua unsur tersebut menunjukkan bahwa paduan aluminium-silikon masih mempertahankan struktur kristal awal tanpa mengalami perubahan yang signifikan karena spesimen belum memperoleh perlakuan *solution treatment* maupun *artificial aging*.

Puncak difraksi dengan intensitas tertinggi berasal dari unsur Al pada sudut 2θ sebesar $38,51^\circ$ dengan intensitas 589643 counts pada bidang kristal (111). Tingginya intensitas tersebut menunjukkan bahwa unsur aluminium merupakan unsur yang dominan terdeteksi pada pola difraksi XRD material. Namun demikian, intensitas difraksi tidak hanya dipengaruhi oleh jumlah unsur, tetapi juga dipengaruhi oleh orientasi kristal (*preferred orientation*), faktor struktur (*structure factor*), faktor multiplikasi, serta kondisi pengujian XRD. Oleh karena itu, intensitas puncak tidak dapat digunakan sebagai satu-satunya indikator untuk menentukan proporsi suatu unsur dalam material, melainkan harus dianalisis bersama posisi puncak dan parameter difraksi lainnya.

Struktur kristal aluminium yang teridentifikasi merupakan struktur Face Centered Cubic (FCC) yang dikenal memiliki keuletan tinggi serta kemampuan deformasi plastis yang baik. Berdasarkan hasil analisis pada puncak utama unsur Al diperoleh nilai FWHM sebesar $0,0844^\circ$

dengan ukuran kristalit sebesar 94,19 nm. Nilai FWHM yang relatif kecil menunjukkan bahwa pelebaran puncak difraksi masih rendah sehingga kristalit aluminium memiliki ukuran yang relatif besar.

Menurut Persamaan Scherrer, ukuran kristalit berbanding terbalik dengan nilai FWHM. Semakin kecil nilai FWHM maka pelebaran puncak difraksi semakin rendah sehingga ukuran kristalit yang dihitung akan semakin besar. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pada raw material densitas cacat kristal (crystal defects) dan regangan kisi (lattice strain) masih relatif rendah karena material belum mengalami deformasi maupun perlakuan panas yang dapat meningkatkan tegangan sisa (residual stress). Dengan demikian, struktur kristal aluminium pada kondisi awal masih berada dalam keadaan yang relatif stabil.

Selain unsur aluminium, unsur silikon juga teridentifikasi dengan puncak utama pada sudut 2θ sebesar $28,48^\circ$ dengan intensitas 3735 counts pada bidang kristal (111). Puncak-puncak Si lainnya muncul pada sudut $47,33^\circ$, $56,15^\circ$, $69,19^\circ$, dan $76,39^\circ$ dengan intensitas yang lebih rendah. Unsur silikon memiliki struktur kristal Diamond Cubic, yang merupakan struktur kristal khas silikon. Munculnya beberapa puncak difraksi Si menunjukkan bahwa unsur silikon berada dalam kondisi kristalin dan terdistribusi di dalam matriks aluminium.

Hasil analisis pada puncak utama unsur Si menunjukkan nilai FWHM sebesar $0,0948^\circ$ dengan ukuran kristalit sebesar 83,87 nm. Nilai FWHM unsur Si sedikit lebih besar dibandingkan unsur Al sehingga ukuran kristalitnya menjadi lebih kecil. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa masing-masing unsur memiliki karakteristik kristal yang berbeda akibat perbedaan struktur kristal, parameter kisi, serta mekanisme pertumbuhan kristal selama proses pembekuan (*solidification*) material.

Secara keseluruhan, hasil karakterisasi XRD menunjukkan bahwa *raw material* didominasi oleh unsur Al dengan ukuran kristalit relatif besar, yaitu 94,19 nm, sedangkan unsur Si memiliki ukuran kristalit sebesar 83,87 nm. Ukuran kristalit yang relatif besar serta nilai FWHM yang rendah menunjukkan bahwa material masih berada pada kondisi awal sebelum mengalami perlakuan panas, sehingga densitas cacat kristal dan regangan kisi masih rendah. Kondisi ini menjadi acuan (*baseline*) untuk mengevaluasi perubahan struktur kristal setelah proses *quenching* dan *artificial aging*. Pada subbab berikutnya akan dianalisis bagaimana perlakuan panas memengaruhi perubahan nilai FWHM, ukuran kristalit, serta hubungannya dengan peningkatan kekerasan material sesuai mekanisme Hall–Petch.

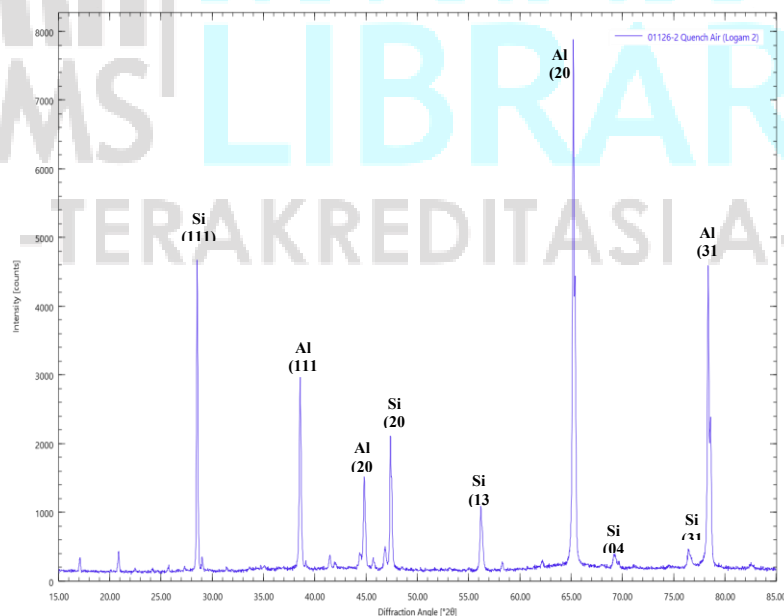
Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Yusuf dkk. (2024) yang menyatakan bahwa material paduan aluminium dengan nilai FWHM yang rendah cenderung memiliki ukuran kristalit yang lebih besar, sedangkan peningkatan nilai FWHM akibat perlakuan tertentu akan

menyebabkan ukuran kristalit menurun sesuai Persamaan Scherrer. Penelitian tersebut juga menjelaskan bahwa ukuran kristalit merupakan salah satu parameter penting untuk mengevaluasi perubahan struktur kristal akibat proses perlakuan panas maupun deformasi

Tabel 3 2 θ dan Intensitas Raw Material

No	Unsur	2 θ	Intensitas (Counts)	FWHM (°)	Ukuran Kristalit (nm)
1	Al	38,51	589643	0,0844	94,19
2		44,77	1585	0,1723	46,13
3		65,14	1210	0,1638	48,52
4		78,30	7909	0,1733	45,86
5		82,49	70436	0,2047	38,83
6	Si	28,48	3735	0,0948	83,87
7		47,33	1809	0,1318	60,31
8		56,14	715	0,1638	48,52
9		69,19	139	0,3497	22,73
10		76,39	552	0,2079	38,23

3.1.2 Analisa Hasil Pengujian XRD pada Quenching Air



Gambar 17 Grafik XRD pada Quenching Air

Berdasarkan Gambar 4.2 pola difraksi XRD pada spesimen *Quenching Air* masih menunjukkan bahwa spesimen Quenching Air masih tersusun atas dua unsur utama, yaitu unsur aluminium (Al) dan unsur silikon (Si). Unsur Si teridentifikasi pada sudut difraksi 2 θ sebesar 28,55°,

47,38°, 56,25°, 69,29°, dan 76,43° dengan indeks Miller berturut-turut (111), (202), (131), (040), dan (313). Sementara itu, unsur Al teridentifikasi pada sudut 38,58°, 44,83°, 65,21°, dan 78,52° dengan indeks Miller (111), (200), (202), dan (311). Tidak ditemukannya unsur baru pada pola difraksi menunjukkan bahwa proses *quenching* tidak mengubah komposisi unsur penyusun material, namun memengaruhi karakteristik struktur kristalnya.

Puncak difraksi dengan intensitas tertinggi berasal dari unsur Al pada sudut 2θ sebesar 65,21° dengan intensitas sebesar 7070 counts pada bidang kristal (202), sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.2. Tingginya intensitas puncak tersebut menunjukkan bahwa unsur aluminium masih menjadi unsur dominan yang terdeteksi pada pola difraksi XRD. Akan tetapi, intensitas difraksi tidak hanya dipengaruhi oleh jumlah unsur, melainkan juga dipengaruhi oleh orientasi kristal (*preferred orientation*), faktor struktur (*structure factor*), dan kondisi pengujian. Oleh karena itu, perubahan intensitas tidak dapat digunakan sebagai satu-satunya dasar untuk menjelaskan perubahan struktur kristal akibat proses *quenching*.

Apabila dibandingkan dengan *raw material*, terjadi pergeseran posisi puncak difraksi pada unsur Al maupun Si setelah proses *quenching* menggunakan media pendingin air. Pada unsur Al, puncak difraksi bidang (111) bergeser dari 38,51° menjadi 38,58°, bidang (200) bergeser dari 44,77° menjadi 44,83°, sedangkan bidang (202) bergeser dari 65,14° menjadi 65,21°. Pergeseran serupa juga terjadi pada unsur Si, di mana puncak difraksi pada bidang (111) bergeser dari 28,48° menjadi 28,55°, serta pada bidang-bidang kristal lainnya mengalami perubahan sudut difraksi yang relatif kecil. Pergeseran sudut difraksi tersebut mengindikasikan adanya perubahan parameter kisi (*lattice parameter*) dan jarak antarbidang kristal (*interplanar spacing* atau *d-spacing*) akibat perlakuan panas. Berdasarkan Hukum Bragg, peningkatan nilai sudut 2θ menunjukkan kecenderungan penurunan nilai *d-spacing*, yang mengindikasikan terbentuknya regangan kisi (*lattice strain*) dan tegangan sisa (*residual stress*) selama proses *quenching*. Pendinginan yang berlangsung cepat menyebabkan atom-atom hasil *solution treatment* tidak memiliki waktu yang cukup untuk berdifusi menuju kondisi kesetimbangan sehingga struktur kristal mengalami distorsi yang ditunjukkan oleh pergeseran posisi puncak difraksi.

Selain terjadi pergeseran posisi puncak difraksi, proses *quenching* juga menyebabkan perubahan distribusi intensitas difraksi. Pada *raw material*, puncak difraksi dengan intensitas tertinggi berasal dari unsur Al pada bidang kristal (111) dengan sudut 2θ sebesar 38,51° dan intensitas 589643 counts. Setelah proses *quenching* menggunakan media pendingin air, puncak dengan intensitas tertinggi berpindah ke bidang kristal Al (202) pada sudut 2θ sebesar 65,21° dengan intensitas 7070 counts. Perubahan posisi puncak dengan intensitas tertinggi tersebut

menunjukkan bahwa proses *quenching* memengaruhi karakteristik difraksi sinar-X pada material. Perubahan intensitas difraksi dapat dipengaruhi oleh perubahan orientasi kristal (*preferred orientation*), faktor struktur (*structure factor*), tingkat kristalinitas, regangan kisi (*lattice strain*), serta tegangan sisa (*residual stress*) yang terbentuk selama proses pendinginan cepat. Oleh karena itu, perubahan intensitas puncak tidak menunjukkan perubahan komposisi unsur penyusun material, melainkan mengindikasikan adanya perubahan karakteristik struktur kristal akibat perlakuan panas.

Perubahan posisi dan intensitas puncak difraksi tersebut menunjukkan bahwa proses *quenching* tidak hanya memengaruhi orientasi kristal, tetapi juga mengubah karakteristik struktur kristal material. Perubahan tersebut selanjutnya tercermin pada nilai FWHM dan ukuran kristalit yang akan dibahas pada bagian berikutnya sebagai indikator perubahan struktur kristal akibat proses pendinginan cepat.

Struktur kristal aluminium tetap berbentuk Face Centered Cubic (FCC). Berdasarkan hasil analisis pada puncak utama unsur Al diperoleh nilai FWHM sebesar $0,1670^\circ$ dengan ukuran kristalit sebesar 47,48 nm. Jika dibandingkan dengan *raw material* yang memiliki nilai FWHM sebesar $0,0844^\circ$ dan ukuran kristalit 94,19 nm, terlihat bahwa setelah proses *quenching* nilai FWHM meningkat hampir dua kali lipat, sedangkan ukuran kristalit menurun hingga sekitar 50%.

Penurunan ukuran kristalit tersebut dipengaruhi oleh laju pendinginan (*cooling rate*) media air yang relatif tinggi. Pendinginan yang berlangsung sangat cepat menyebabkan atom-atom hasil *solution treatment* tidak memiliki waktu yang cukup untuk berdifusi menuju kondisi kesetimbangan sehingga struktur kristal mengalami penyempitan. Akibatnya, terbentuk regangan kisi (*lattice strain*) dan tegangan sisa (*residual stress*) yang lebih tinggi di dalam material. Kondisi tersebut menyebabkan puncak difraksi mengalami pelebaran (*peak broadening*) yang ditunjukkan oleh meningkatnya nilai *Full Width at Half Maximum* (FWHM). Berdasarkan Persamaan Scherrer, peningkatan nilai FWHM berbanding terbalik dengan ukuran kristalit, sehingga semakin besar nilai FWHM maka ukuran kristalit yang diperoleh menjadi semakin kecil. Oleh karena itu, peningkatan nilai FWHM pada spesimen *Quenching Air* menunjukkan bahwa pendinginan cepat menghasilkan struktur kristal yang lebih halus dibandingkan *raw material*.

Berdasarkan Persamaan Scherrer, ukuran kristalit berbanding terbalik dengan nilai FWHM. Semakin besar nilai FWHM maka pelebaran puncak difraksi (*peak broadening*) akan semakin tinggi sehingga ukuran kristalit menjadi semakin kecil. Peningkatan nilai FWHM pada spesimen *Quenching Air* menunjukkan bahwa proses pendinginan cepat menyebabkan

meningkatnya regangan kisi (*lattice strain*) dan tegangan sisa (*residual stress*) di dalam material. Kondisi tersebut terjadi karena atom-atom aluminium tidak memiliki waktu yang cukup untuk berdifusi menuju posisi kesetimbangan selama pendinginan, sehingga menghasilkan struktur kristal yang lebih halus dengan ukuran kristalit yang lebih kecil dibandingkan *raw material*.

Selain unsur aluminium, unsur silikon juga teridentifikasi dengan puncak utama pada sudut 2θ sebesar $28,53^\circ$ dengan intensitas sebesar 3421 counts pada bidang kristal (111). Puncak-puncak Si lainnya muncul pada sudut $47,38^\circ$, $56,25^\circ$, $69,29^\circ$, dan $76,43^\circ$ dengan intensitas yang lebih rendah. Unsur silikon tetap memiliki struktur kristal Diamond Cubic, sehingga menunjukkan bahwa proses *quenching* tidak mengubah struktur kristal dasar unsur Si.

Hasil analisis pada puncak utama unsur Si menunjukkan nilai FWHM sebesar $0,1200^\circ$ dengan ukuran kristalit sebesar 66,37 nm. Jika dibandingkan dengan *raw material* yang memiliki ukuran kristalit sebesar 83,87 nm, terjadi penurunan ukuran kristalit setelah proses *quenching*. Peningkatan nilai FWHM pada unsur Si menunjukkan adanya pelebaran puncak difraksi yang mengindikasikan meningkatnya cacat kristal dan regangan kisi akibat pendinginan cepat. Kondisi tersebut memperlihatkan bahwa baik unsur Al maupun Si sama-sama mengalami penyempitan ukuran kristalit, meskipun besarnya perubahan berbeda pada masing-masing unsur.

Penurunan ukuran kristalit setelah proses *quenching* berpotensi meningkatkan sifat mekanik material, khususnya kekerasan. Menurut teori Hall–Petch, semakin kecil ukuran kristalit atau ukuran butir, maka jumlah batas butir (*grain boundary*) akan semakin banyak. Batas butir tersebut berfungsi sebagai penghambat pergerakan dislokasi sehingga deformasi plastis menjadi lebih sulit terjadi. Akibatnya, material memerlukan tegangan yang lebih besar untuk mengalami deformasi, sehingga nilai kekerasannya meningkat. Oleh karena itu, penyempitan ukuran kristalit yang terjadi pada spesimen *Quenching Air* diperkirakan menjadi salah satu penyebab meningkatnya nilai kekerasan yang diperoleh pada hasil pengujian Micro Vickers.

Secara keseluruhan, hasil karakterisasi XRD menunjukkan bahwa proses *quenching* menggunakan media pendingin air menyebabkan peningkatan nilai FWHM serta penurunan ukuran kristalit pada unsur Al dan Si dibandingkan dengan *raw material*. Perubahan tersebut menunjukkan bahwa laju pendinginan yang tinggi menghasilkan pelebaran puncak difraksi (*peak broadening*), peningkatan regangan kisi, dan bertambahnya tegangan sisa di dalam material. Kondisi ini menghasilkan struktur kristal yang lebih halus dan diperkirakan berkontribusi terhadap peningkatan kekerasan material sesuai mekanisme Hall–Petch. Dengan demikian, media pendingin air terbukti memberikan pengaruh yang signifikan terhadap

perubahan struktur kristal paduan aluminium-silikon setelah proses *quenching*.

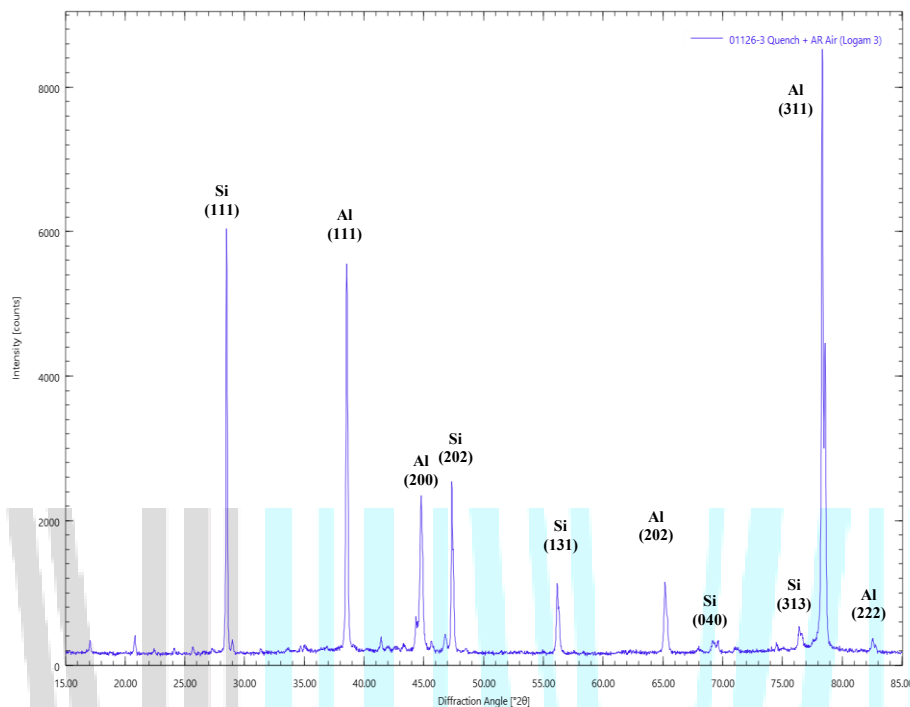
Hasil penelitian ini juga sesuai dengan penelitian Zhang et al. (2020) yang melaporkan bahwa proses *quenching* pada paduan aluminium menghasilkan ukuran kristalit yang lebih kecil dibandingkan kondisi sebelum perlakuan panas. Penurunan ukuran kristalit tersebut meningkatkan jumlah batas butir (*grain boundary*) yang berfungsi sebagai penghambat pergerakan dislokasi sehingga kekerasan material meningkat sesuai mekanisme Hall–Petch. Fenomena tersebut sejalan dengan hasil penelitian ini, di mana spesimen *Quenching Air* mengalami penurunan ukuran kristalit aluminium dari 94,19 nm menjadi 47,48 nm, sedangkan nilai kekerasan meningkat dari 88,84 HV menjadi 94,02 HV. Hasil tersebut menunjukkan bahwa media pendingin air memberikan pengaruh yang signifikan terhadap perubahan struktur kristal sekaligus meningkatkan sifat mekanik paduan aluminium-silikon.

Dengan demikian, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan media pendingin air menghasilkan perubahan struktur kristal yang paling signifikan dibandingkan kondisi *raw material*, ditandai dengan meningkatnya nilai FWHM, menurunnya ukuran kristalit, serta meningkatnya nilai kekerasan. Hasil tersebut memperkuat bahwa *cooling rate* merupakan salah satu faktor utama yang menentukan perubahan mikrostruktur dan sifat mekanik paduan aluminium-silikon setelah proses *quenching*.

Tabel 4 2 θ dan Intensitas Pada *Quenching Air*

No	Unsur	2 θ	Intensitas (Counts)	FWHM (°)	Ukuran Kristalit (nm)
1	Al	38,58	2114	0,1660	47,80
2		44,83	1076	0,1730	46,00
3		65,21	7070	0,1670	47,48
4		78,52	4592	0,2050	38,83
5	Si	28,53	3421	0,1200	66,37
6		47,38	1740	0,1310	60,91
7		56,25	1093	0,1670	47,48
8		69,29	115	0,3080	25,85
9		76,43	228	0,2670	29,74

3.1.3 Analisa Hasil Pengujian XRD pada Quenching Air dan Artificial Aging



Gambar 18 Grafik XRD pada Quenching Air dan Artificial Aging

Berdasarkan Gambar 4.3 pola difraksi XRD pada spesimen *Quenching Air* dan *Artificial Aging* masih menunjukkan keberadaan dua fase utama, yaitu unsur aluminium (Al) dan unsur silikon (Si). Unsur Si teridentifikasi pada sudut difraksi 2θ sebesar $28,48^\circ$, $47,34^\circ$, $56,15^\circ$, $69,15^\circ$, dan $76,39^\circ$ dengan indeks Miller berturut-turut (111), (202), (131), (040), dan (313). Sementara itu, unsur Al teridentifikasi pada sudut 2θ sebesar $38,54^\circ$, $44,77^\circ$, $65,17^\circ$, $78,32^\circ$, dan $82,52^\circ$ dengan indeks Miller (111), (200), (202), (311), dan (222). Hasil tersebut menunjukkan bahwa proses *artificial aging* tidak membentuk unsur baru yang dapat terdeteksi oleh XRD, tetapi lebih memengaruhi perubahan karakteristik struktur kristal akibat proses difusi atom selama perlakuan panas.

Puncak difraksi dengan intensitas tertinggi berasal dari unsur Al pada sudut 2θ sebesar $78,32^\circ$ dengan intensitas sebesar 7941 counts pada bidang kristal (311), sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.3. Tingginya intensitas puncak tersebut menunjukkan bahwa unsur aluminium masih merupakan unsur dominan yang terdeteksi pada pola difraksi XRD. Namun demikian, intensitas difraksi dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti orientasi kristal (*preferred orientation*), faktor struktur (*structure factor*), faktor multiplikasi, dan kondisi pengujian. Oleh karena itu, perubahan intensitas tidak dapat dijadikan satu-satunya dasar untuk menjelaskan perubahan struktur kristal akibat proses *artificial aging*.

Apabila dibandingkan dengan spesimen Quenching Air, terjadi perubahan posisi puncak difraksi setelah proses *artificial aging*. Pada unsur Al, puncak difraksi bidang (111) bergeser dari $38,58^\circ$ menjadi $38,54^\circ$, bidang (200) bergeser dari $44,83^\circ$ menjadi $44,77^\circ$, sedangkan bidang (202) bergeser dari $65,21^\circ$ menjadi $65,17^\circ$. Pergeseran serupa juga terjadi pada unsur Si, di mana puncak difraksi bidang (111) bergeser dari $28,55^\circ$ menjadi $28,48^\circ$, sedangkan puncak-puncak lainnya mengalami perubahan sudut difraksi yang relatif kecil. Pergeseran sudut difraksi ke arah nilai 2θ yang lebih rendah mengindikasikan adanya perubahan parameter kisi (*lattice parameter*) dan peningkatan jarak antarbidang kristal (*d-spacing*) setelah proses *artificial aging*. Kondisi ini menunjukkan bahwa selama proses *artificial aging* terjadi difusi atom yang menyebabkan sebagian regangan kisi (*lattice strain*) dan tegangan sisa (*residual stress*) hasil proses *quenching* mengalami relaksasi, sehingga struktur kristal cenderung kembali menuju kondisi yang lebih stabil. Meskipun perubahan sudut difraksi relatif kecil, hasil tersebut menunjukkan bahwa proses *artificial aging* memberikan pengaruh terhadap kondisi internal kristal tanpa mengubah struktur kristal maupun unsur penyusun material.

Selain menyebabkan pergeseran posisi puncak difraksi, proses *artificial aging* juga memengaruhi distribusi intensitas difraksi. Pada spesimen Quenching Air, puncak difraksi dengan intensitas tertinggi berasal dari unsur Al pada bidang kristal (202) dengan sudut 2θ sebesar $65,21^\circ$ dan intensitas 7070 counts. Setelah dilakukan proses *artificial aging*, puncak difraksi dengan intensitas tertinggi berubah menjadi 7941 counts pada sudut 2θ sebesar $78,32^\circ$ yang berasal dari bidang kristal Al (311). Perubahan posisi puncak dengan intensitas tertinggi tersebut menunjukkan bahwa proses *artificial aging* memengaruhi distribusi intensitas difraksi pada bidang-bidang kristal aluminium. Perubahan intensitas ini dipengaruhi oleh proses difusi atom selama pemanasan yang menyebabkan perubahan orientasi kristal (*preferred orientation*), tingkat kristalinitas, serta distribusi tegangan di dalam material. Dengan demikian, perubahan intensitas puncak tidak menunjukkan perubahan komposisi unsur penyusun material, tetapi mengindikasikan adanya perubahan karakteristik struktur kristal sebagai akibat dari kombinasi proses *quenching* dan *artificial aging*.

Struktur kristal aluminium tetap berbentuk Face Centered Cubic (FCC). Berdasarkan hasil analisis pada puncak utama unsur Al diperoleh nilai FWHM sebesar $0,1638^\circ$ dengan ukuran kristalit sebesar 48,52 nm. Jika dibandingkan dengan spesimen Quenching Air, nilai FWHM Al mengalami sedikit penurunan dari $0,1670^\circ$ menjadi $0,1638^\circ$, sedangkan ukuran kristalit meningkat dari 47,48 nm menjadi 48,52 nm. Perubahan ini menunjukkan bahwa selama proses *artificial aging* terjadi relaksasi sebagian tegangan internal (*stress relaxation*) sehingga pelebaran puncak difraksi sedikit berkurang dan ukuran kristalit mengalami peningkatan.

Peningkatan ukuran kristalit tersebut menunjukkan bahwa selama proses *artificial aging* terjadi relaksasi tegangan internal (*stress relaxation*) yang terbentuk akibat proses *quenching*. Pada saat material dipanaskan selama proses *aging*, atom-atom memperoleh energi yang cukup untuk berdifusi menuju posisi yang lebih stabil sehingga sebagian regangan kisi (*lattice strain*) dan tegangan sisa (*residual stress*) berkurang. Berkurangnya regangan kisi menyebabkan pelebaran puncak difraksi (*peak broadening*) menurun, yang ditunjukkan oleh penurunan nilai *Full Width at Half Maximum* (FWHM). Berdasarkan Persamaan Scherrer, penurunan nilai FWHM berbanding terbalik dengan ukuran kristalit, sehingga ukuran kristalit mengalami peningkatan dibandingkan spesimen yang hanya mengalami proses *quenching*. Selain itu, proses difusi atom selama *artificial aging* juga memungkinkan terjadinya pertumbuhan kristalit (*crystal growth*), sehingga struktur kristal menjadi lebih stabil dibandingkan setelah proses *quenching*.

Menurut Persamaan Scherrer, ukuran kristalit berbanding terbalik dengan nilai FWHM. Penurunan nilai FWHM menunjukkan bahwa pelebaran puncak difraksi menjadi lebih kecil sehingga ukuran kristalit meningkat. Kondisi ini mengindikasikan bahwa selama proses *artificial aging* atom-atom memiliki energi yang cukup untuk berdifusi menuju posisi yang lebih stabil, sehingga sebagian regangan kisi (*lattice strain*) dan tegangan sisa (*residual stress*) yang terbentuk selama proses *quenching* mulai berkurang. Akibatnya, struktur kristal menjadi lebih stabil dibandingkan setelah proses *quenching* saja.

Selain unsur aluminium, unsur silikon juga teridentifikasi dengan puncak utama pada sudut 2θ sebesar $28,48^\circ$ dengan intensitas sebesar 4508 counts pada bidang kristal (111). Puncak-puncak Si lainnya muncul pada sudut $47,34^\circ$, $56,15^\circ$, $69,15^\circ$, dan $76,39^\circ$ dengan intensitas yang lebih rendah. Unsur silikon tetap memiliki struktur kristal Diamond Cubic, yang menunjukkan bahwa perlakuan *artificial aging* tidak mengubah struktur kristal dasar unsur Si.

Hasil analisis pada puncak utama unsur Si menunjukkan nilai FWHM sebesar $0,0814^\circ$ dengan ukuran kristalit sebesar 97,68 nm. Jika dibandingkan dengan spesimen Quenching Air, nilai FWHM Si mengalami penurunan dari $0,1200^\circ$ menjadi $0,0814^\circ$, sedangkan ukuran kristalit meningkat secara signifikan dari 66,37 nm menjadi 97,68 nm. Penurunan nilai FWHM tersebut menunjukkan berkurangnya pelebaran puncak difraksi yang mengindikasikan terjadinya relaksasi regangan kisi selama proses *artificial aging*. Difusi atom yang berlangsung selama pemanasan memungkinkan kristalit mengalami pertumbuhan (*crystal growth*), sehingga ukuran kristalit menjadi lebih besar dibandingkan setelah proses *quenching*.

Proses *artificial aging* juga berkaitan dengan mekanisme precipitation hardening, yaitu terbentuknya presipitat halus akibat difusi atom selama proses pemanasan. Pada paduan

aluminium, proses ini umumnya diawali dengan pembentukan Guinier–Preston (GP) Zone, kemudian berkembang menjadi presipitat metastabil sebelum akhirnya membentuk presipitat yang lebih stabil apabila waktu atau temperatur *aging* semakin tinggi. Selama tahap *aging* yang optimum, presipitat halus dapat menghambat pergerakan dislokasi sehingga meningkatkan kekuatan material. Namun, apabila proses *aging* berlangsung terlalu lama atau pada temperatur yang terlalu tinggi (*overaging*), presipitat akan mengalami pembesaran (*coarsening*) sehingga efektivitasnya dalam menghambat dislokasi menurun.

Secara keseluruhan, hasil karakterisasi XRD menunjukkan bahwa proses *artificial aging* setelah *quenching* menyebabkan penurunan nilai FWHM dan peningkatan ukuran kristalit pada unsur Al maupun Si. Perubahan tersebut mengindikasikan terjadinya relaksasi tegangan internal, berkurangnya regangan kisi, serta berlangsungnya difusi atom selama proses pemanasan. Struktur kristal menjadi lebih stabil dibandingkan setelah proses *quenching*, namun peningkatan ukuran kristalit mengurangi jumlah batas butir yang berperan sebagai penghambat dislokasi. Kondisi ini berkontribusi terhadap penurunan nilai kekerasan material dibandingkan spesimen yang hanya mengalami proses *quenching*.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Chen et al. (2020) yang melaporkan bahwa proses *artificial aging* setelah *solution treatment* dan *water quenching* menyebabkan terjadinya difusi atom serta pembentukan presipitat β'' (*beta double prime*) yang berperan dalam mekanisme *precipitation hardening*. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa selama proses *aging* terjadi perubahan posisi puncak difraksi XRD akibat perubahan parameter kisi serta perkembangan presipitat di dalam matriks aluminium. Selain itu, pembentukan presipitat halus selama tahap *peak aging* mampu meningkatkan kekerasan material, sedangkan perubahan ukuran dan distribusi presipitat pada tahap selanjutnya dapat memengaruhi stabilitas struktur kristal.

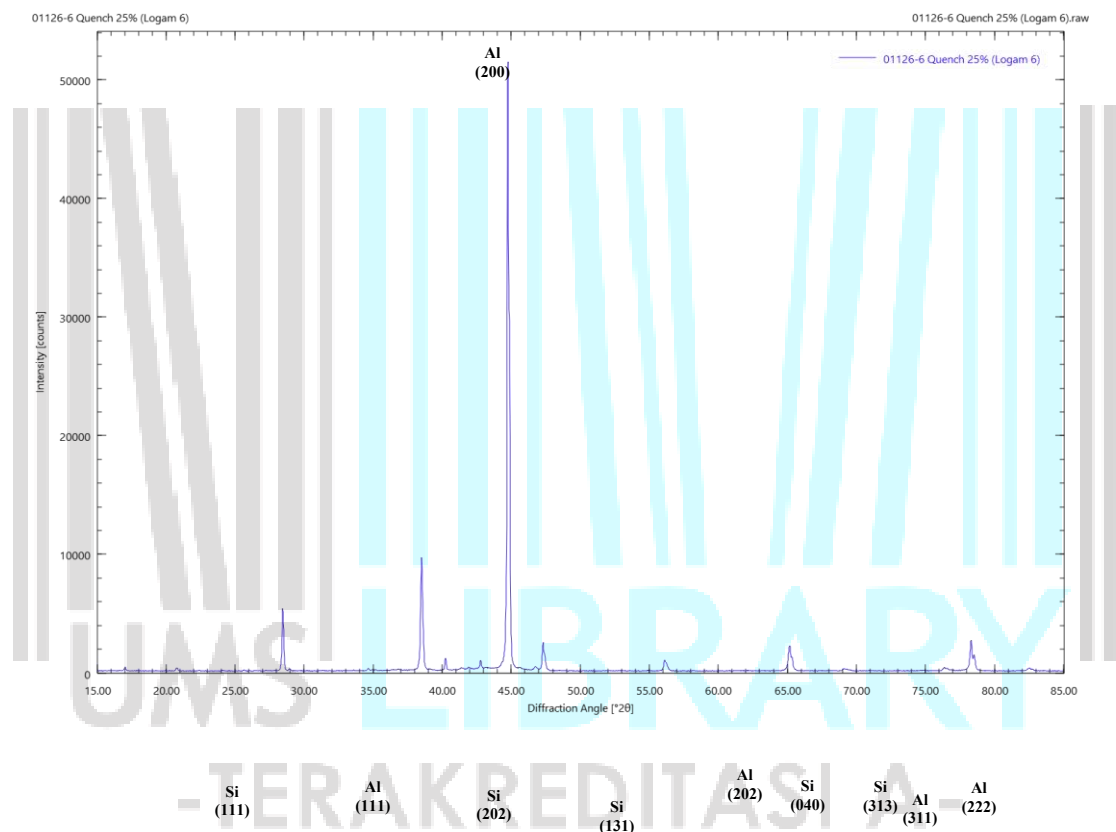
Dengan demikian, hasil penelitian ini memperkuat bahwa proses *artificial aging* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap perkembangan struktur kristal dan sifat mekanik paduan aluminium melalui mekanisme difusi atom, pembentukan presipitat, serta relaksasi tegangan internal. Perubahan tersebut menyebabkan hubungan antara ukuran kristalit dan kekerasan tidak selalu berbanding lurus, karena respons material dipengaruhi oleh interaksi antara mekanisme *Hall–Petch* dan *precipitation hardening*.

Tabel 5 2 θ dan Intensitas Pada *Quenching* Air dan *Artificial Aging*

No	Unsur	2 θ	Intensitas (Counts)	FWHM (°)	Ukuran Kristalit (nm)
1	Al	38,54	4317	0,2047	38,83
2		44,77	1618	0,2018	39,39

3		65,17	843	0,1752	45,37
4		78,32	7941	0,1638	48,52
5		82,55	156	0,2047	38,83
6	Si	28,48	4508	0,0814	97,68
7		47,34	2076	0,1433	38,83
8		56,15	886	0,1752	55,08
9		69,15	133	0,4467	17,79
10		76,39	283	0,1638	48,52

3.1.4 Analisa Hasil Pengujian XRD pada Quenching Larutan CaCO_3 25%



Gambar 19 Grafik XRD pada Quenching Larutan CaCO_3 25%

Berdasarkan Gambar 4.4 pola difraksi XRD pada spesimen Quenching Larutan CaCO_3 25% masih tersusun atas dua unsur utama, yaitu unsur aluminium (Al) dan unsur silikon (Si). Unsur Si teridentifikasi pada sudut difraksi 2θ sebesar $28,44^\circ$, $47,29^\circ$, $56,10^\circ$, $69,10^\circ$, dan $76,35^\circ$ dengan indeks Miller berturut-turut (111), (202), (131), (040), dan (313). Sementara itu, unsur Al teridentifikasi pada sudut 2θ sebesar $38,50^\circ$, $44,75^\circ$, $65,15^\circ$, $78,29^\circ$, dan $82,51^\circ$ dengan indeks Miller (111), (200), (202), (311), dan (222). Tidak ditemukannya unsur baru pada pola difraksi menunjukkan bahwa proses *quenching* menggunakan larutan CaCO_3 25% tidak mengubah unsur penyusun material, tetapi memengaruhi karakteristik struktur kristalnya.

Puncak difraksi dengan intensitas tertinggi berasal dari unsur Al pada sudut 2θ sebesar $44,75^\circ$

dengan intensitas sebesar 45.906 counts pada bidang kristal (200), sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.4. Tingginya intensitas tersebut menunjukkan bahwa unsur aluminium masih merupakan unsur dominan yang terdeteksi pada pola difraksi XRD. Meskipun demikian, intensitas difraksi tidak hanya dipengaruhi oleh jumlah unsur, tetapi juga dipengaruhi oleh orientasi kristal (*preferred orientation*), faktor struktur (*structure factor*), faktor multiplikasi, dan kondisi pengujian. Oleh karena itu, perubahan intensitas perlu dianalisis bersama parameter difraksi lainnya, seperti nilai FWHM dan ukuran kristalit.

Struktur kristal aluminium tetap berbentuk Face Centered Cubic (FCC). Berdasarkan hasil analisis pada puncak utama unsur Al diperoleh nilai FWHM sebesar $0,1638^\circ$ dengan ukuran kristalit sebesar 52,47 nm. Jika dibandingkan dengan *raw material* yang memiliki ukuran kristalit 94,19 nm, terjadi penurunan ukuran kristalit setelah proses *quenching*. Namun, apabila dibandingkan dengan spesimen Quenching Air yang memiliki ukuran kristalit 47,48 nm, ukuran kristalit pada media larutan CaCO_3 25% sedikit lebih besar.

Ukuran kristalit yang lebih besar dibandingkan spesimen *Quenching Air* menunjukkan bahwa media pendingin larutan CaCO_3 25% memiliki laju pendinginan (*cooling rate*) yang lebih rendah dibandingkan media air. Laju pendinginan yang lebih rendah menyebabkan atom-atom masih memiliki waktu untuk berdifusi selama proses pendinginan menuju posisi yang lebih stabil. Difusi atom yang masih berlangsung tersebut memungkinkan terjadinya pertumbuhan kristalit (*crystal growth*), sehingga ukuran kristalit yang terbentuk menjadi lebih besar dibandingkan spesimen yang didinginkan menggunakan media air. Kondisi ini juga menyebabkan regangan kisi (*lattice strain*) dan tegangan sisa (*residual stress*) yang terbentuk lebih rendah, sehingga pelebaran puncak difraksi (*peak broadening*) tidak sebesar pada media pendingin air. Berdasarkan Persamaan Scherrer, pelebaran puncak yang lebih kecil menghasilkan ukuran kristalit yang lebih besar. Oleh karena itu, media pendingin larutan CaCO_3 25% menghasilkan karakteristik struktur kristal yang berbeda dibandingkan media pendingin air akibat perbedaan laju pendinginan selama proses *quenching*.

Berdasarkan Persamaan Scherrer, ukuran kristalit berbanding terbalik dengan nilai FWHM. Nilai FWHM yang relatif lebih besar dibandingkan *raw material* menunjukkan adanya pelebaran puncak difraksi (*peak broadening*) akibat meningkatnya regangan kisi (*lattice strain*) dan tegangan sisa (*residual stress*) selama proses pendinginan. Akan tetapi, ukuran kristalit pada media CaCO_3 25% masih lebih besar dibandingkan media air. Kondisi ini menunjukkan bahwa media larutan CaCO_3 25% memiliki laju pendinginan (*cooling rate*) yang lebih rendah dibandingkan air, sehingga atom-atom masih memiliki waktu yang lebih lama untuk berdifusi selama proses pendinginan. Difusi atom yang masih berlangsung memungkinkan kristalit

mengalami pertumbuhan sehingga ukuran kristalit menjadi lebih besar dibandingkan spesimen yang didinginkan menggunakan media air.

Selain unsur aluminium, unsur silikon juga teridentifikasi dengan puncak utama pada sudut 2θ sebesar $28,44^\circ$ dengan intensitas sebesar 4092 counts pada bidang kristal (111). Puncak-puncak Si lainnya muncul pada sudut $47,29^\circ$, $56,10^\circ$, $69,10^\circ$, dan $76,35^\circ$ dengan intensitas yang lebih rendah. Unsur silikon tetap memiliki struktur kristal Diamond Cubic, yang menunjukkan bahwa proses *quenching* menggunakan media larutan CaCO_3 25% tidak mengubah struktur kristal dasar unsur Si.

Apabila dibandingkan dengan *raw material*, terjadi pergeseran posisi puncak difraksi pada unsur Al maupun Si setelah proses *quenching* menggunakan media pendingin larutan CaCO_3 25%. Pada unsur Al, puncak difraksi bidang (111) bergeser dari $38,51^\circ$ menjadi $38,50^\circ$, bidang (200) bergeser dari $44,77^\circ$ menjadi $44,75^\circ$, sedangkan bidang (202) bergeser dari $65,14^\circ$ menjadi $65,15^\circ$. Unsur Si juga mengalami pergeseran sudut difraksi yang relatif kecil, yaitu pada bidang (111) dari $28,48^\circ$ menjadi $28,44^\circ$, serta pada bidang-bidang kristal lainnya. Pergeseran sudut difraksi tersebut menunjukkan adanya perubahan parameter kisi (*lattice parameter*) dan jarak antarbidang kristal (*interplanar spacing* atau *d-spacing*) akibat perlakuan panas. Berdasarkan Hukum Bragg, perubahan nilai sudut 2θ mengindikasikan terjadinya perubahan *d-spacing* yang dipengaruhi oleh regangan kisi (*lattice strain*) dan tegangan sisa (*residual stress*). Namun demikian, besarnya pergeseran sudut difraksi pada media larutan CaCO_3 25% relatif lebih kecil dibandingkan media pendingin air, yang menunjukkan bahwa laju pendinginan media CaCO_3 25% menghasilkan perubahan struktur kristal yang lebih rendah sehingga distorsi kisi yang terbentuk juga lebih kecil.

Selain mengalami pergeseran posisi puncak difraksi, spesimen yang didinginkan menggunakan media larutan CaCO_3 25% juga menunjukkan perubahan distribusi intensitas difraksi. Pada *raw material*, puncak difraksi dengan intensitas tertinggi berasal dari unsur Al pada bidang kristal (111) dengan sudut 2θ sebesar $38,51^\circ$ dan intensitas 589643 counts. Setelah proses *quenching* menggunakan media larutan CaCO_3 25%, puncak difraksi dengan intensitas tertinggi berpindah ke sudut $44,75^\circ$ pada bidang kristal Al (200) dengan intensitas sebesar 45.906 counts. Perubahan bidang kristal yang menghasilkan intensitas difraksi maksimum menunjukkan bahwa proses *quenching* menggunakan media larutan CaCO_3 25% memengaruhi karakteristik difraksi sinar-X pada material. Perubahan intensitas tersebut dipengaruhi oleh perubahan orientasi kristal (*preferred orientation*), faktor struktur (*structure factor*), tingkat kristalinitas, serta distribusi regangan kisi yang terbentuk selama proses pendinginan. Oleh karena itu, perubahan intensitas puncak tidak menunjukkan perubahan unsur penyusun material,

melainkan mengindikasikan adanya perubahan karakteristik struktur kristal akibat proses *quenching* menggunakan media pendingin larutan CaCO_3 25%.

Perubahan posisi maupun intensitas puncak difraksi tersebut menunjukkan bahwa proses *quenching* menggunakan media larutan CaCO_3 25% memberikan pengaruh terhadap karakteristik struktur kristal paduan aluminium-silikon. Perubahan tersebut selanjutnya dianalisis melalui nilai *Full Width at Half Maximum* (FWHM) dan ukuran kristalit untuk mengetahui sejauh mana media pendingin memengaruhi perubahan struktur kristal dibandingkan dengan kondisi *raw material* maupun media pendingin air.

Hasil analisis pada puncak utama unsur Si menunjukkan nilai FWHM sebesar $0,0819^\circ$ dengan ukuran kristalit sebesar 100,11 nm. Jika dibandingkan dengan *raw material* yang memiliki ukuran kristalit 83,87 nm, terjadi peningkatan ukuran kristalit. Nilai FWHM yang relatif kecil menunjukkan bahwa pelebaran puncak difraksi berkurang sehingga kristalit mengalami pertumbuhan. Kondisi ini menunjukkan bahwa laju pendinginan media larutan CaCO_3 25% tidak secepat media air, sehingga proses difusi atom masih berlangsung selama pendinginan dan memungkinkan pertumbuhan kristalit unsur Si menjadi lebih besar.

Jika dibandingkan dengan spesimen Quenching Air, media larutan CaCO_3 25% menghasilkan ukuran kristalit unsur Al yang lebih besar (52,47 nm dibandingkan 47,48 nm) dan ukuran kristalit unsur Si yang juga lebih besar (100,11 nm dibandingkan 66,37 nm). Perbedaan ini menunjukkan bahwa media pendingin memiliki pengaruh yang signifikan terhadap perubahan struktur kristal. Air sebagai media pendingin memiliki laju pendinginan yang lebih tinggi sehingga menghasilkan penyempitan ukuran kristalit yang lebih besar, sedangkan larutan CaCO_3 25% memberikan laju pendinginan yang lebih rendah sehingga pertumbuhan kristalit masih dapat berlangsung selama proses pendinginan.

Menurut teori Hall–Petch, ukuran kristalit yang lebih kecil akan meningkatkan jumlah batas butir (*grain boundary*) yang berfungsi sebagai penghambat pergerakan dislokasi. Sebaliknya, ukuran kristalit yang lebih besar menyebabkan jumlah batas butir berkurang sehingga hambatan terhadap pergerakan dislokasi menjadi lebih kecil. Dengan demikian, spesimen yang didinginkan menggunakan media larutan CaCO_3 25% diperkirakan memiliki nilai kekerasan yang lebih rendah dibandingkan spesimen yang didinginkan menggunakan media air. Hubungan ini akan dibuktikan melalui hasil pengujian kekerasan Micro Vickers pada subbab berikutnya.

Secara keseluruhan, hasil karakterisasi XRD menunjukkan bahwa proses *quenching* menggunakan media larutan CaCO_3 25% menyebabkan perubahan struktur kristal yang ditandai dengan peningkatan nilai FWHM dibandingkan *raw material* serta perubahan ukuran

kristalit pada unsur Al dan Si. Dibandingkan media air, larutan CaCO_3 25% menghasilkan ukuran kristalit yang lebih besar akibat laju pendinginan yang lebih rendah sehingga difusi atom masih berlangsung selama proses pendinginan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa media pendingin berpengaruh terhadap karakteristik struktur kristal paduan aluminium-silikon, yang selanjutnya akan memengaruhi sifat mekanik material, khususnya kekerasan.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Fahrenholtz et al. (2019) yang menjelaskan bahwa laju pendinginan (*cooling rate*) merupakan faktor penting yang menentukan perkembangan mikrostruktur pada paduan aluminium selama proses *quenching*. Pendinginan yang berlangsung lebih lambat memberikan waktu yang cukup bagi atom terlarut untuk berdifusi dan membentuk presipitasi selama proses pendinginan (*quench-induced precipitation*). Fenomena tersebut mengurangi tingkat *supersaturated solid solution* yang terbentuk setelah *solution treatment*, sehingga kemampuan material untuk mengalami penguatan selama proses *aging* menjadi lebih rendah dibandingkan material yang didinginkan dengan laju pendinginan tinggi.

Temuan tersebut sesuai dengan hasil penelitian ini, di mana spesimen yang didinginkan menggunakan media larutan CaCO_3 25% memiliki ukuran kristalit aluminium sebesar 52,47 nm, lebih besar dibandingkan spesimen *Quenching Air* yang memiliki ukuran kristalit 47,48 nm. Ukuran kristalit yang lebih besar menunjukkan bahwa pertumbuhan kristal masih berlangsung selama pendinginan akibat laju pendinginan yang lebih rendah. Berdasarkan mekanisme Hall–Petch, kondisi tersebut menyebabkan jumlah batas butir (*grain boundary*) menjadi lebih sedikit sehingga hambatan terhadap pergerakan dislokasi berkurang dan nilai kekerasan cenderung lebih rendah dibandingkan spesimen yang didinginkan menggunakan media air.

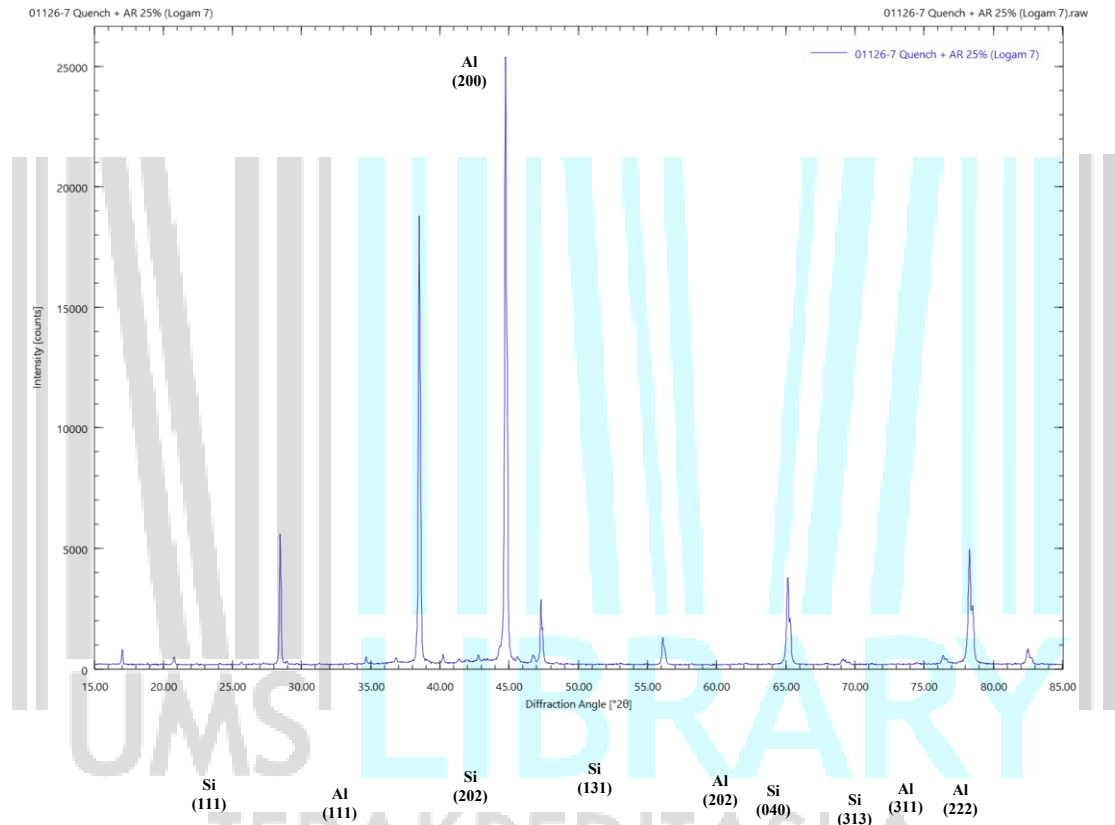
Dengan demikian, hasil penelitian ini memperkuat bahwa penggunaan media pendingin larutan CaCO_3 25% menghasilkan perubahan struktur kristal yang berbeda dibandingkan media pendingin air. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh laju pendinginan yang lebih rendah sehingga difusi atom masih berlangsung selama proses pendinginan, menyebabkan pertumbuhan kristalit lebih besar dan menghasilkan sifat mekanik yang lebih rendah dibandingkan pendinginan menggunakan media air.

Tabel 6 20 dan Intensitas Quenching Larutan CaCO_3 25%

No	Unsur	2θ	Intensitas (Counts)	FWHM ($^\circ$)	Ukuran Kristalit (nm)
1	Al	38,50	7519	0,1433	58,75
2		44,75	45906	0,1638	52,47

3	Si	65,15	1904	0,3275	28,80
4		78,29	2378	0,1638	62,56
5		82,51	203	0,3275	32,28
6		28,44	4092	0,0819	100,11
7	Al	47,29	2033	0,0819	105,94
8		56,10	827	0,3190	28,23
9		69,10	141	0,2047	47,14
10		76,35	235	0,4503	22,45

3.1.5 Analisa Hasil Pengujian XRD pada Quenching dan Artificial Aging Larutan CaCO_3 25%



Gambar 20 Grafik XRD pada *Quenching* dan *Artificial Aging* Larutan CaCO_3 25%

Berdasarkan Gambar 4.5 pola difraksi XRD pada spesimen *Quenching* dan *Artificial Aging* Larutan CaCO_3 25% masih tersusun atas dua unsur utama, yaitu unsur aluminium (Al) dan unsur silikon (Si). Unsur Si teridentifikasi pada sudut difraksi 2θ sebesar $28,44^\circ$, $47,29^\circ$, $56,10^\circ$, $69,12^\circ$, dan $76,35^\circ$ dengan indeks Miller berturut-turut (111), (202), (131), (040), dan (313). Sementara itu, unsur Al teridentifikasi pada sudut 2θ sebesar $38,49^\circ$, $44,73^\circ$, $65,13^\circ$, $78,26^\circ$, dan $82,48^\circ$ dengan indeks Miller (111), (200), (202), (311), dan (222). Tidak munculnya unsur baru pada pola difraksi menunjukkan bahwa kombinasi proses *quenching* dan *artificial aging* tidak mengubah unsur penyusun material, namun memberikan pengaruh terhadap karakteristik struktur kristalnya melalui proses difusi atom dan relaksasi tegangan selama perlakuan panas. Puncak difraksi dengan intensitas tertinggi berasal dari unsur Al pada sudut 2θ sebesar $44,73^\circ$

dengan intensitas sebesar 21.295 counts pada bidang kristal (200), sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.5. Tingginya intensitas tersebut menunjukkan bahwa unsur aluminium masih menjadi unsur dominan yang terdeteksi pada pola difraksi XRD. Namun demikian, intensitas difraksi tidak hanya dipengaruhi oleh jumlah unsur, tetapi juga dipengaruhi oleh orientasi kristal (*preferred orientation*), faktor struktur (*structure factor*), faktor multiplikasi, serta kondisi pengujian. Oleh karena itu, interpretasi perubahan struktur kristal tidak hanya didasarkan pada intensitas, tetapi juga mempertimbangkan nilai FWHM dan ukuran kristalit. Apabila dibandingkan dengan spesimen Quenching Larutan CaCO_3 25%, terjadi pergeseran posisi puncak difraksi setelah proses *artificial aging*. Pada unsur Al, puncak difraksi bidang (111) bergeser dari $38,50^\circ$ menjadi $38,49^\circ$, bidang (200) bergeser dari $44,75^\circ$ menjadi $44,73^\circ$, sedangkan bidang (202) bergeser dari $65,15^\circ$ menjadi $65,13^\circ$. Pergeseran yang relatif kecil juga terjadi pada unsur Si, di mana puncak difraksi pada bidang (111) bergeser dari $28,44^\circ$ menjadi $28,43^\circ$, sedangkan bidang kristal lainnya mengalami perubahan sudut difraksi yang tidak signifikan. Pergeseran sudut difraksi ke arah nilai 2θ yang lebih rendah menunjukkan adanya perubahan parameter kisi (*lattice parameter*) yang berkaitan dengan bertambahnya jarak antarbidang kristal (*interplanar spacing* atau *d-spacing*). Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa selama proses *artificial aging* terjadi difusi atom yang menyebabkan sebagian regangan kisi (*lattice strain*) dan tegangan sisa (*residual stress*) hasil proses *quenching* mengalami relaksasi. Akibatnya, struktur kristal menjadi lebih stabil tanpa mengubah struktur kristal dasar maupun unsur penyusun material.

Selain menyebabkan pergeseran posisi puncak difraksi, proses *artificial aging* juga memengaruhi distribusi intensitas difraksi pada spesimen yang didinginkan menggunakan media larutan CaCO_3 25%. Sebelum proses *artificial aging*, puncak difraksi dengan intensitas tertinggi berasal dari unsur Al pada bidang kristal (200) dengan sudut 2θ sebesar $44,75^\circ$ dan intensitas sebesar 45.906 counts. Setelah proses *artificial aging*, puncak difraksi dengan intensitas tertinggi masih berada pada bidang kristal Al (200), namun intensitasnya menurun menjadi 21.295 counts dengan posisi puncak bergeser menjadi $44,73^\circ$. Penurunan intensitas tersebut menunjukkan bahwa proses *artificial aging* memengaruhi karakteristik difraksi sinar-X melalui perubahan orientasi kristal (*preferred orientation*), tingkat kristalinitas, faktor struktur (*structure factor*), serta distribusi regangan di dalam material. Meskipun terjadi perubahan intensitas, hasil identifikasi XRD menunjukkan bahwa unsur yang terdeteksi tetap berupa aluminium (Al) dan silikon (Si), sehingga perubahan tersebut tidak menunjukkan perubahan komposisi material, melainkan mencerminkan perubahan karakteristik struktur kristal akibat kombinasi proses *quenching* dan *artificial aging*.

Perubahan posisi dan intensitas puncak difraksi setelah proses *quenching* dan *artificial aging* menggunakan media larutan CaCO_3 25% menunjukkan bahwa perlakuan panas memberikan pengaruh terhadap karakteristik struktur kristal paduan aluminium-silikon. Untuk mengetahui perubahan struktur kristal secara lebih rinci, dilakukan analisis terhadap nilai *Full Width at Half Maximum* (FWHM) dan ukuran kristalit, sehingga dapat dijelaskan hubungan antara perlakuan panas, perubahan struktur kristal, dan sifat mekanik material.

Berdasarkan hasil analisis pada puncak utama unsur Al diperoleh nilai FWHM sebesar $0,2047^\circ$ dengan ukuran kristalit sebesar 41,98 nm. Apabila dibandingkan dengan spesimen Quenching Larutan CaCO_3 25%, ukuran kristalit unsur Al mengalami penurunan dari 52,47 nm menjadi 41,98 nm, sedangkan nilai FWHM mengalami peningkatan. Berdasarkan Persamaan Scherrer, peningkatan nilai FWHM menunjukkan pelebaran puncak difraksi (*peak broadening*) yang menyebabkan ukuran kristalit menjadi lebih kecil. Kondisi ini mengindikasikan bahwa setelah proses *artificial aging* masih terdapat regangan kisi (*lattice strain*) dan perubahan struktur kristal yang dipengaruhi oleh proses difusi atom selama perlakuan panas.

Hasil analisis pada puncak utama unsur Si menunjukkan nilai FWHM sebesar $0,0819^\circ$ dengan ukuran kristalit sebesar 100,11 nm. Nilai tersebut relatif sama dengan spesimen Quenching Larutan CaCO_3 25%, sehingga menunjukkan bahwa proses *artificial aging* pada kondisi penelitian ini tidak memberikan perubahan yang signifikan terhadap ukuran kristalit unsur Si. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa pertumbuhan kristalit unsur Si telah mencapai kondisi yang relatif stabil selama proses *quenching*, sehingga perlakuan *artificial aging* tidak lagi menghasilkan perubahan ukuran kristalit yang berarti.

Selama proses *artificial aging*, atom-atom di dalam material memperoleh energi termal yang memungkinkan terjadinya difusi menuju kondisi yang lebih stabil. Difusi atom tersebut dapat menyebabkan terbentuknya presipitat halus (*precipitation hardening*) sekaligus mengurangi sebagian tegangan sisa (*residual stress*) yang terbentuk selama proses *quenching*. Akan tetapi, apabila proses *aging* berlangsung pada kondisi yang menyebabkan presipitat mengalami pertumbuhan (*coarsening*), efektivitas presipitat dalam menghambat pergerakan dislokasi dapat berkurang. Kondisi ini menyebabkan peningkatan stabilitas struktur kristal, tetapi tidak selalu diikuti oleh peningkatan kekerasan material.

Apabila dibandingkan dengan spesimen Quenching Air dan Artificial Aging, ukuran kristalit unsur Al pada media larutan CaCO_3 25% lebih kecil (41,98 nm dibandingkan 48,52 nm), sedangkan ukuran kristalit unsur Si relatif hampir sama (100,11 nm dibandingkan 97,68 nm). Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa kombinasi media pendingin dan proses *artificial aging* memberikan respons yang berbeda terhadap masing-masing unsur penyusun material.

Media pendingin larutan CaCO_3 25% menghasilkan mekanisme pendinginan yang berbeda dibandingkan media air, sehingga memengaruhi proses difusi atom, relaksasi tegangan, dan perkembangan struktur kristal selama proses *artificial aging*.

Menurut teori Hall–Petch, ukuran kristalit yang lebih kecil akan meningkatkan jumlah batas butir (*grain boundary*) sehingga hambatan terhadap pergerakan dislokasi menjadi lebih besar. Sebaliknya, ukuran kristalit yang lebih besar menyebabkan jumlah batas butir berkurang sehingga material lebih mudah mengalami deformasi plastis. Meskipun ukuran kristalit unsur Al pada spesimen ini lebih kecil dibandingkan spesimen Quenching Larutan CaCO_3 25%, nilai kekerasan material tidak hanya dipengaruhi oleh ukuran kristalit, tetapi juga dipengaruhi oleh distribusi presipitat, tingkat tegangan sisa, serta mekanisme difusi selama proses *artificial aging*. Oleh karena itu, perubahan struktur kristal yang diamati melalui pengujian XRD perlu dianalisis bersama hasil pengujian kekerasan untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai pengaruh perlakuan panas terhadap sifat material.

Secara keseluruhan, hasil karakterisasi XRD menunjukkan bahwa kombinasi proses *quenching* menggunakan larutan CaCO_3 25% dan *artificial aging* menyebabkan perubahan karakteristik struktur kristal yang ditandai oleh peningkatan nilai FWHM dan penurunan ukuran kristalit pada unsur Al, sedangkan ukuran kristalit unsur Si relatif tidak mengalami perubahan yang signifikan. Perubahan tersebut menunjukkan bahwa proses *artificial aging* memengaruhi mekanisme difusi atom, relaksasi tegangan internal, dan perkembangan struktur kristal setelah proses *quenching*.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Milkereit et al. (2019) yang menjelaskan bahwa keberhasilan proses *age-hardening* pada paduan aluminium sangat dipengaruhi oleh tahapan *solution treatment*, *quenching*, dan *artificial aging*. Media *quenching* dengan laju pendinginan yang lebih rendah memungkinkan terjadinya *quench-induced precipitation* selama pendinginan sehingga mengurangi jumlah atom terlarut (*solute atoms*) yang membentuk kondisi *supersaturated solid solution*. Akibatnya, efektivitas pembentukan presipitat penguat selama proses *artificial aging* menjadi lebih rendah dibandingkan material yang didinginkan menggunakan media dengan laju pendinginan tinggi.

Fenomena tersebut sesuai dengan hasil penelitian ini, di mana spesimen yang mengalami *quenching* menggunakan larutan CaCO_3 25% kemudian dilanjutkan dengan *artificial aging* menunjukkan perubahan ukuran kristalit aluminium menjadi 41,98 nm, sedangkan ukuran kristalit silikon relatif tidak mengalami perubahan yang signifikan. Meskipun ukuran kristalit aluminium menjadi lebih kecil, peningkatan nilai kekerasan hanya terjadi dalam jumlah yang relatif kecil. Hal ini menunjukkan bahwa sifat mekanik material tidak hanya dipengaruhi oleh

ukuran kristalit, tetapi juga oleh tingkat *supersaturated solid solution*, distribusi presipitat, serta kinetika presipitasi yang berlangsung selama proses *artificial aging*.

Dengan demikian, hasil penelitian ini memperkuat bahwa kombinasi media pendingin dan proses *artificial aging* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap perkembangan struktur kristal dan sifat mekanik paduan aluminium-silikon. Perubahan tersebut dikendalikan oleh interaksi antara laju pendinginan (*cooling rate*), difusi atom, pembentukan presipitat, dan relaksasi tegangan internal, sehingga hubungan antara ukuran kristalit dan kekerasan menjadi lebih kompleks dibandingkan perlakuan *quenching* tanpa proses *aging*.

Tabel 7 20 dan Intensitas Quenching dan *Artificial Aging* Larutan CaCO₃ 25%

No	Unsur	2 θ	Intensitas (Counts)	FWHM (°)	Ukuran Kristalit (nm)
1	Al	38,49	15729	0,1233	68,27
2		44,73	21295	0,2047	41,98
3		65,13	3256	0,3275	28,79
4		78,26	4357	0,3275	31,28
5		82,48	554	0,2047	51,65
6	Si	28,44	4087	0,0819	100,11
7		47,29	2303	0,2047	42,38
8		56,10	1013	0,2704	33,30
9		69,12	189	0,4094	23,57
10		76,35	317	0,4913	20,57

3.2 Hasil Analisa Pengujian Kekerasan Mikro Vickers

Pengujian Micro Vickers dilakukan untuk mengetahui pengaruh proses *quenching* dan *artificial aging* terhadap kekerasan paduan aluminium-silikon. Nilai kekerasan diperoleh dari hasil pengukuran pada beberapa titik pengujian dan dinyatakan dalam satuan Vickers Hardness (HV). Perbedaan nilai kekerasan yang diperoleh menunjukkan adanya perubahan mikrostruktur akibat perlakuan panas yang diberikan. Pengujian kekerasan dilakukan pada lima titik pengukuran untuk setiap spesimen guna memperoleh nilai yang lebih representatif terhadap kondisi permukaan material setelah perlakuan panas. Nilai kekerasan yang diperoleh kemudian dirata-ratakan sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam membandingkan pengaruh variasi media pendingin dan proses *artificial aging* terhadap perubahan sifat mekanik paduan aluminium-silikon. Semakin tinggi nilai kekerasan yang diperoleh menunjukkan semakin besar kemampuan material dalam menahan deformasi plastis akibat pembebanan. Hasil pengujian kekerasan selengkapnya disajikan pada Tabel 4.6 dan Gambar 4.6.

3.2.1 Hasil Uji Kekerasan media pendingin Air

Tabel 8 Data Hasil Uji Kekerasan Media Pendingin Air

Hasil Uji Kekerasan Media Pendingin Air						
Sampel	Kekerasan HV (100 gf)					Rata Rata HV
	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4	Titik 5	
Raw Material	89,80	90,30	89,30	87,40	87,40	88,84
Quenching Air	95,50	91,30	94,40	95,30	93,60	94,02
Quenching Air dan Artificial Aging	88,80	88,50	88,70	88,60	89,50	88,82
Presentase Perubahan kekerasan						
Quenching Air	+ 5,83 %					
Quenching Air dan Artificial Aging	- 0,02 %					

Berdasarkan Tabel 4.6 hasil pengujian, *raw material* memiliki nilai kekerasan rata-rata sebesar 88,84 HV. Nilai tersebut merupakan kondisi awal material sebelum mengalami perlakuan panas sehingga struktur kristalnya masih relatif stabil dengan ukuran kristalit unsur Al sebesar 94,19 nm dan unsur Si sebesar 83,87 nm, sebagaimana diperoleh dari hasil karakterisasi XRD. Ukuran kristalit yang relatif besar menyebabkan jumlah batas butir (*grain boundary*) masih sedikit sehingga hambatan terhadap pergerakan dislokasi belum optimal. Kondisi tersebut menghasilkan nilai kekerasan yang lebih rendah dibandingkan spesimen yang telah mengalami proses *quenching*.

Setelah dilakukan proses *quenching* menggunakan media pendingin air, nilai kekerasan meningkat menjadi 94,02 HV atau mengalami kenaikan sebesar 5,83% dibandingkan *raw material*. Peningkatan kekerasan ini menunjukkan bahwa pendinginan cepat (*rapid cooling*) mampu meningkatkan sifat mekanik material. Selama proses *quenching*, laju pendinginan yang tinggi menghasilkan kondisi supersaturated solid solution, yaitu atom-atom paduan terperangkap di dalam matriks aluminium karena tidak memiliki waktu yang cukup untuk berdifusi menuju kondisi kesetimbangan. Kondisi tersebut meningkatkan regangan kisi (*lattice strain*) dan tegangan sisa (*residual stress*), sebagaimana ditunjukkan oleh hasil pengujian XRD melalui peningkatan nilai FWHM dan penurunan ukuran kristalit unsur Al dari 94,19 nm

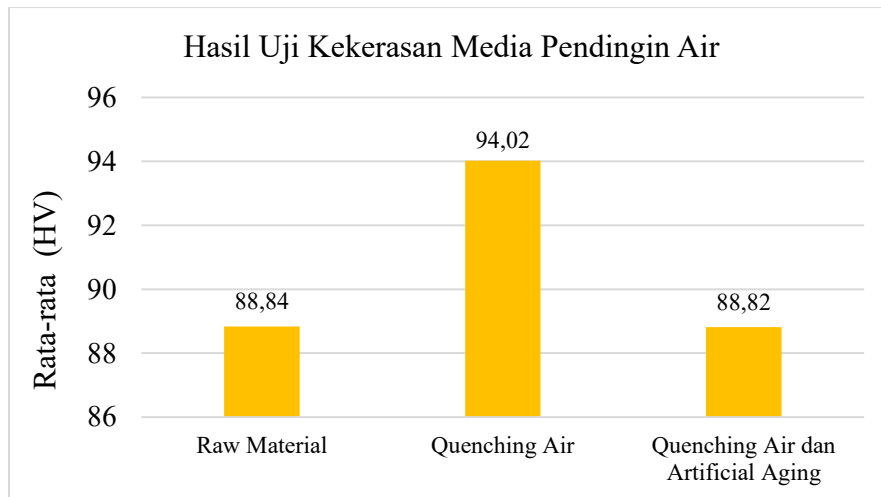
menjadi 47,48 nm.

Menurut teori Hall–Petch, penurunan ukuran kristalit menyebabkan jumlah batas butir meningkat sehingga pergerakan dislokasi menjadi lebih sulit. Hambatan terhadap pergerakan dislokasi tersebut meningkatkan kekuatan dan kekerasan material. Dengan demikian, peningkatan kekerasan setelah proses *quenching* tidak hanya dipengaruhi oleh pendinginan cepat, tetapi juga berkaitan dengan penyempitan ukuran kristalit serta meningkatnya hambatan terhadap deformasi plastis.

Berbeda dengan spesimen hasil *quenching*, spesimen yang mengalami proses *quenching* dan dilanjutkan dengan *artificial aging* memiliki nilai kekerasan rata-rata sebesar 88,82 HV, atau mengalami penurunan sebesar 0,02% dibandingkan *raw material*. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa proses *artificial aging* pada kondisi penelitian ini tidak memberikan peningkatan kekerasan, tetapi justru menyebabkan nilai kekerasan kembali mendekati kondisi awal material.

Hasil karakterisasi XRD menunjukkan bahwa setelah proses *artificial aging* ukuran kristalit unsur Al meningkat menjadi 48,52 nm, sedangkan ukuran kristalit unsur Si meningkat menjadi 97,68 nm. Peningkatan ukuran kristalit tersebut mengindikasikan bahwa selama proses *artificial aging* berlangsung difusi atom dan relaksasi sebagian tegangan internal yang terbentuk selama proses *quenching*. Bertambahnya ukuran kristalit menyebabkan jumlah batas butir berkurang sehingga hambatan terhadap pergerakan dislokasi menjadi lebih kecil. Kondisi ini menyebabkan nilai kekerasan material menurun dibandingkan spesimen yang hanya mengalami proses *quenching*.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa media pendingin air memberikan peningkatan kekerasan yang paling tinggi setelah proses *quenching*. Namun, perlakuan *artificial aging* pada kondisi penelitian ini menyebabkan terjadinya perubahan struktur kristal yang ditunjukkan oleh peningkatan ukuran kristalit dan penurunan tegangan internal, sehingga nilai kekerasan menurun kembali. Hasil tersebut menunjukkan bahwa perubahan sifat mekanik material dipengaruhi oleh hubungan antara laju pendinginan, ukuran kristalit, serta mekanisme hambatan pergerakan dislokasi sesuai teori Hall–Petch.



Gambar 21 Perbandingan kekerasan Raw Material antara Quenching Air dan Quenching Air & Artificial Aging

Jika dibandingkan secara keseluruhan Pada Gambar 4.6, spesimen dengan perlakuan *quenching* menggunakan media pendingin air memberikan nilai kekerasan tertinggi dibandingkan perlakuan lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa media pendingin air memiliki laju pendinginan (*cooling rate*) yang lebih tinggi sehingga mampu menghasilkan perubahan struktur kristal yang lebih signifikan. Pendinginan yang berlangsung secara cepat menyebabkan atom-atom hasil *solution treatment* tidak memiliki waktu yang cukup untuk berdifusi menuju kondisi kesetimbangan, sehingga terbentuk kondisi *supersaturated solid solution*. Kondisi tersebut meningkatkan regangan kisi (*lattice strain*) dan tegangan sisa (*residual stress*), yang pada akhirnya berkontribusi terhadap peningkatan kekerasan material. Hasil karakterisasi XRD juga menunjukkan bahwa proses *quenching* menggunakan media air menyebabkan penurunan ukuran kristalit unsur Al dari 94,19 nm pada *raw material* menjadi 47,48 nm. Berdasarkan teori Hall–Petch, penurunan ukuran kristalit menyebabkan jumlah batas butir (*grain boundary*) meningkat sehingga pergerakan dislokasi menjadi lebih sulit. Hambatan terhadap pergerakan dislokasi tersebut menyebabkan material memiliki ketahanan yang lebih tinggi terhadap deformasi plastis, sehingga nilai kekerasan meningkat dibandingkan kondisi awal.

Sementara itu, perlakuan *artificial aging* setelah proses *quenching* menyebabkan nilai kekerasan menurun hingga mendekati kondisi *raw material*. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa selama proses *artificial aging* terjadi difusi atom dan relaksasi sebagian tegangan internal yang terbentuk selama proses *quenching*. Kondisi ini menyebabkan struktur kristal menjadi lebih stabil serta mengurangi hambatan terhadap pergerakan dislokasi. Dengan demikian, meskipun proses *artificial aging* bertujuan meningkatkan sifat mekanik melalui

mekanisme presipitasi, pada kondisi perlakuan dalam penelitian ini nilai kekerasan justru mengalami penurunan dibandingkan spesimen yang hanya mengalami proses *quenching*.

3.2.2 Hasil Uji Kekerasan media pendingin larutan CaCO_3 25%

Tabel 9 Data Hasil Uji Kekerasan Media Pendingin larutan CaCO_3 25%

Hasil Uji Kekerasan media pendingin larutan CaCO_3 25%						
Sampel	Kekerasan HV (100 gf)					Rata Rata HV
	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4	Titik 5	
Raw Material	89,80	90,30	89,30	87,40	87,40	88,84
Quenching CaCO_3 25%	88,10	89,00	89,80	90,70	89,00	89,32
Quenching CaCO_3 25% dan Artificial Aging	88,90	91,20	89,50	90,00	88,00	89,52
Presentase Perubahan kekerasan						
Quenching CaCO_3	+ 0,54 %					
Quenching Air dan Artificial Aging	+ 0,77 %					

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.7, *raw material* memiliki nilai kekerasan rata-rata sebesar 88,84 HV. Setelah dilakukan proses *quenching* menggunakan media pendingin larutan CaCO_3 25%, nilai kekerasan meningkat menjadi 89,32 HV, atau mengalami kenaikan sebesar 0,54% dibandingkan *raw material*. Selanjutnya, spesimen yang mengalami proses *quenching* dan dilanjutkan dengan *artificial aging* memiliki nilai kekerasan rata-rata sebesar 89,52 HV, atau meningkat sebesar 0,77% dibandingkan *raw material*. Hasil tersebut menunjukkan bahwa media pendingin larutan CaCO_3 25% hanya memberikan peningkatan kekerasan yang relatif kecil dibandingkan media pendingin air.

Peningkatan kekerasan setelah proses *quenching* menggunakan larutan CaCO_3 25% dipengaruhi oleh perubahan struktur kristal akibat perlakuan panas. Selama proses *solution treatment*, sebagian unsur paduan larut ke dalam matriks aluminium dan membentuk kondisi supersaturated solid solution setelah proses *quenching*. Akan tetapi, laju pendinginan larutan CaCO_3 25% lebih rendah dibandingkan media air sehingga atom-atom masih memiliki waktu untuk berdifusi menuju kondisi yang lebih stabil selama proses pendinginan. Akibatnya,

peningkatan regangan kisi (*lattice strain*) dan tegangan sisa (*residual stress*) tidak sebesar yang terjadi pada media air.

Hasil karakterisasi XRD mendukung kondisi tersebut. Pada spesimen *Quenching* larutan CaCO_3 25%, ukuran kristalit unsur Al sebesar 52,47 nm, sedangkan pada media air sebesar 47,48 nm. Ukuran kristalit unsur Si pada media CaCO_3 25% juga lebih besar dibandingkan media air. Ukuran kristalit yang lebih besar menunjukkan bahwa proses pertumbuhan kristalit masih berlangsung selama pendinginan karena laju pendinginan media CaCO_3 25% lebih rendah. Berdasarkan teori Hall–Petch, ukuran kristalit yang lebih besar menyebabkan jumlah batas butir (*grain boundary*) lebih sedikit sehingga hambatan terhadap pergerakan dislokasi menjadi lebih kecil. Kondisi tersebut menyebabkan peningkatan kekerasan pada media CaCO_3 25% tidak sebesar peningkatan kekerasan yang dihasilkan oleh media pendingin air.

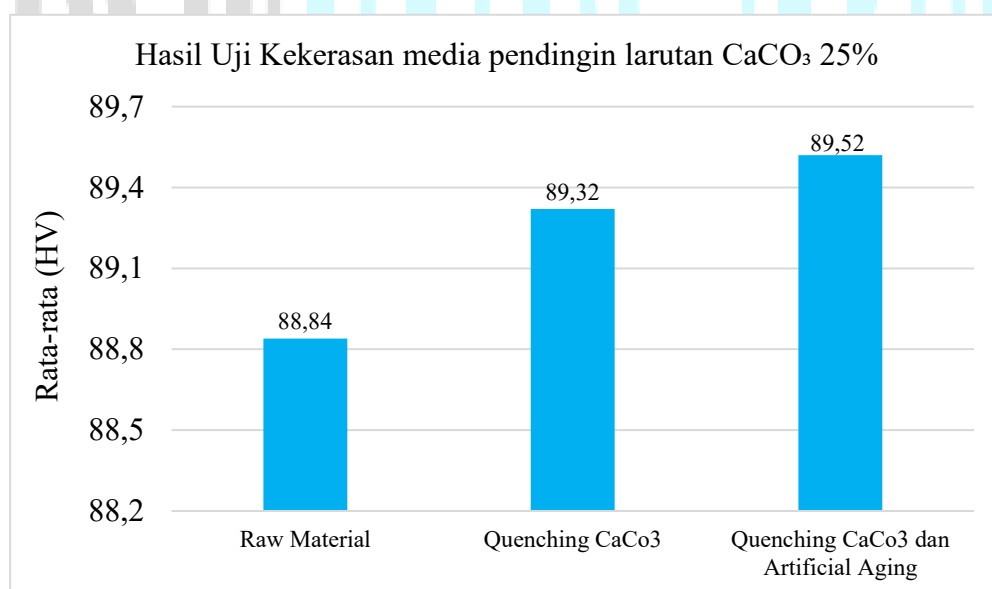
Setelah proses *artificial aging*, nilai kekerasan meningkat menjadi 89,52 HV. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa proses *aging* memberikan kontribusi terhadap peningkatan sifat mekanik material, meskipun peningkatannya relatif kecil. Selama proses *artificial aging*, atom-atom yang berada dalam kondisi supersaturated solid solution mengalami difusi sehingga terbentuk presipitat halus (*precipitation hardening*). Presipitat tersebut dapat menghambat pergerakan dislokasi sehingga memberikan tambahan kekuatan pada material. Namun demikian, peningkatan kekerasan yang diperoleh masih terbatas karena media pendingin larutan CaCO_3 25% menghasilkan laju pendinginan yang lebih rendah dibandingkan media air, sehingga jumlah atom yang tertahan dalam kondisi lewat jenuh lebih sedikit.

Hasil karakterisasi XRD setelah proses *quenching* dan *artificial aging* menunjukkan bahwa ukuran kristalit unsur Al berubah menjadi sekitar 41,98 nm, sedangkan ukuran kristalit unsur Si relatif tetap berada pada kisaran 100,11 nm. Perubahan tersebut menunjukkan bahwa proses *artificial aging* tidak hanya dipengaruhi oleh ukuran kristalit, tetapi juga oleh mekanisme difusi atom, distribusi presipitat, dan relaksasi tegangan internal. Oleh karena itu, perubahan kekerasan material merupakan hasil interaksi beberapa mekanisme penguatan, bukan hanya dipengaruhi oleh satu parameter struktur kristal.

Apabila dibandingkan dengan media pendingin air, peningkatan kekerasan pada media larutan CaCO_3 25% jauh lebih rendah. Media air menghasilkan nilai kekerasan sebesar 94,02 HV, sedangkan media larutan CaCO_3 25% hanya mencapai 89,32 HV setelah proses *quenching*. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa laju pendinginan merupakan faktor yang sangat berpengaruh terhadap perubahan struktur kristal dan sifat mekanik material. Pendinginan yang lebih cepat pada media air menghasilkan ukuran kristalit yang lebih kecil sehingga jumlah batas butir meningkat dan hambatan terhadap pergerakan dislokasi menjadi lebih besar. Sebaliknya,

pendinginan menggunakan larutan CaCO_3 25% berlangsung lebih lambat sehingga kristalit mengalami pertumbuhan dan peningkatan kekerasan menjadi lebih rendah. Kondisi ini sesuai dengan teori Hall–Petch yang menyatakan bahwa material dengan ukuran kristalit lebih kecil cenderung memiliki kekerasan yang lebih tinggi.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa proses *quenching* dan *artificial aging* menggunakan media pendingin larutan CaCO_3 25% mampu meningkatkan kekerasan paduan aluminium-silikon dibandingkan *raw material*. Namun, peningkatan tersebut lebih rendah dibandingkan media pendingin air karena laju pendinginan yang lebih lambat menyebabkan pertumbuhan kristalit masih berlangsung selama proses pendinginan. Hubungan antara hasil pengujian XRD dan kekerasan menunjukkan bahwa perubahan ukuran kristalit, mekanisme difusi atom, pembentukan presipitat, serta hambatan terhadap pergerakan dislokasi secara bersama-sama memengaruhi sifat mekanik material setelah perlakuan panas.



Gambar 22 Perbandingan kekerasan Raw Material antara Quenching CaCO_3 dan Quenching CaCO_3 dan Artificial Aging 25%

Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 4.7, spesimen yang mengalami proses *quenching* menggunakan media pendingin larutan CaCO_3 25% dan dilanjutkan dengan *artificial aging* memiliki nilai kekerasan rata-rata sebesar 89,52 HV. Nilai tersebut sedikit lebih tinggi dibandingkan *raw material* yang memiliki nilai kekerasan sebesar 88,84 HV maupun spesimen hasil *quenching* larutan CaCO_3 25% tanpa *artificial aging* sebesar 89,32 HV. Peningkatan nilai kekerasan ini menunjukkan bahwa proses *artificial aging* memberikan kecenderungan meningkatkan kekerasan material setelah proses *quenching*. Selama proses *artificial aging*, atom-atom hasil *solution treatment* mengalami difusi sehingga memungkinkan terbentuknya

presipitat halus (*precipitation hardening*) yang dapat menghambat pergerakan dislokasi. Hambatan terhadap pergerakan dislokasi tersebut berkontribusi terhadap peningkatan kekerasan material.

3.3 Pembahasan Pengaruh Media Quenching terhadap Struktur Kristal dan Kekerasan Paduan Aluminium-Silikon

Hasil karakterisasi X-Ray Diffraction (XRD) dan pengujian kekerasan Micro Vickers menunjukkan bahwa variasi media pendingin dan perlakuan *artificial aging* memberikan pengaruh terhadap struktur kristal maupun sifat mekanik paduan aluminium-silikon. Perubahan tersebut ditunjukkan oleh adanya pergeseran sudut difraksi, perubahan intensitas puncak, perubahan nilai Full Width at Half Maximum (FWHM), ukuran kristalit, serta perubahan nilai kekerasan setelah perlakuan panas. Hasil tersebut menunjukkan bahwa perubahan struktur kristal yang diamati melalui pengujian XRD memiliki hubungan yang erat dengan perubahan sifat mekanik material.

Perbedaan media pendingin menyebabkan laju pendinginan (*cooling rate*) yang berbeda sehingga menghasilkan karakteristik struktur kristal yang berbeda pula. Media pendingin air memiliki laju pendinginan yang lebih tinggi dibandingkan larutan CaCO_3 25%, sehingga atom-atom hasil *solution treatment* tidak memiliki waktu yang cukup untuk berdifusi menuju kondisi kesetimbangan. Kondisi tersebut menyebabkan meningkatnya regangan kisi (*lattice strain*) dan tegangan sisa (*residual stress*) pada struktur kristal. Sebaliknya, media larutan CaCO_3 25% memiliki laju pendinginan yang lebih rendah sehingga difusi atom masih berlangsung selama proses pendinginan. Akibatnya, struktur kristal memiliki kesempatan untuk mengalami pertumbuhan kristalit (*crystal growth*), sehingga ukuran kristalit yang terbentuk lebih besar dibandingkan spesimen yang didinginkan menggunakan media air.

Perbedaan laju pendinginan tersebut tercermin pada hasil karakterisasi XRD. Spesimen Quenching Air memiliki ukuran kristalit unsur Al sebesar 47,48 nm, lebih kecil dibandingkan spesimen Quenching Larutan CaCO_3 25% sebesar 52,47 nm. Menurut Persamaan Scherrer, peningkatan nilai FWHM menunjukkan terjadinya pelebaran puncak difraksi (*peak broadening*) sehingga ukuran kristalit menjadi lebih kecil. Perubahan ukuran kristalit tersebut berkorelasi dengan hasil pengujian kekerasan, di mana spesimen Quenching Air memiliki nilai kekerasan tertinggi sebesar 94,02 HV, sedangkan spesimen Quenching Larutan CaCO_3 25% memiliki nilai kekerasan sebesar 89,32 HV. Kondisi ini sesuai dengan teori Hall–Petch, yang menyatakan bahwa ukuran kristalit yang lebih kecil menghasilkan jumlah batas butir (*grain boundary*) yang lebih banyak sehingga mampu menghambat pergerakan dislokasi dan meningkatkan kekerasan material.

Perlakuan *artificial aging* memberikan pengaruh terhadap perkembangan struktur kristal setelah proses *quenching*. Pada media pendingin air, ukuran kristalit unsur Al meningkat dari 47,48 nm menjadi 48,52 nm, yang menunjukkan terjadinya relaksasi tegangan internal (*stress relaxation*) dan pertumbuhan kristalit (*crystal growth*) selama proses pemanasan. Sebaliknya, pada media larutan CaCO_3 25%, ukuran kristalit unsur Al berubah dari 52,47 nm menjadi 41,98 nm, menunjukkan bahwa respons struktur kristal terhadap *artificial aging* dipengaruhi oleh kondisi awal material setelah proses *quenching*. Selain relaksasi tegangan internal, proses *artificial aging* juga memungkinkan terbentuknya presipitat halus (*precipitation hardening*) yang berperan dalam menghambat pergerakan dislokasi. Oleh karena itu, perubahan sifat mekanik setelah *artificial aging* dipengaruhi oleh interaksi antara difusi atom, perubahan struktur kristal, dan mekanisme presipitasi.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa media pendingin memberikan pengaruh yang signifikan terhadap struktur kristal dan kekerasan paduan aluminium-silikon. Media pendingin air menghasilkan *cooling rate* yang lebih tinggi sehingga meningkatkan *lattice strain* dan *residual stress*, memperbesar nilai FWHM, memperkecil ukuran kristalit, serta menghasilkan nilai kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan media larutan CaCO_3 25%. Sebaliknya, media larutan CaCO_3 25% memiliki laju pendinginan yang lebih rendah sehingga difusi atom masih berlangsung selama proses pendinginan dan memungkinkan pertumbuhan kristalit. Dengan demikian, hubungan antara laju pendinginan (*cooling rate*) → perubahan struktur kristal → perubahan ukuran kristalit → perubahan kekerasan menunjukkan bahwa media pendingin merupakan faktor utama yang menentukan sifat mekanik paduan aluminium-silikon setelah proses *quenching* dan *artificial aging*.

Tabel 10 Hubungan Ukuran Kristalit Unsur Al dan Si dengan Kekerasan

No	Perlakuan	FWHM Al (°)	Ukuran Kristalit Al (nm)	FWHM Si (°)	Ukuran Kristalit Si (nm)	Kekerasan (HV)
1	Raw Material	0,0844	94,19	0,0948	83,87	88,84
2	Quenching Air	0,1670	47,48	0,1200	66,37	94,02
3	Quenching Air + Artificial Aging	0,1638	48,52	0,0814	97,68	88,82

4	Quenching Larutan CaCO ₃ 25%	0,1638	52,47	0,0819	100,11	89,32
5	Quenching Larutan CaCO ₃ 25% + Artificial Aging	0,2047	41,98	0,0819	100,11	89,52

Berdasarkan Tabel 4.8, terlihat bahwa proses quenching dan artificial aging memberikan pengaruh yang berbeda terhadap nilai FWHM, ukuran kristalit unsur Al dan Si, serta nilai kekerasan paduan aluminium-silikon. Secara umum, perubahan nilai FWHM menunjukkan hubungan yang berbanding terbalik dengan ukuran kristalit sesuai Persamaan Scherrer, sedangkan perubahan ukuran kristalit berkaitan dengan perubahan sifat mekanik material melalui mekanisme Hall–Petch.

Pada kondisi raw material, nilai FWHM unsur Al dan Si masing-masing sebesar 0,0844° dan 0,0948°, dengan ukuran kristalit 94,19 nm dan 83,87 nm. Nilai kekerasan rata-rata sebesar 88,84 HV menunjukkan bahwa material masih berada pada kondisi awal sebelum mengalami perlakuan panas. Nilai FWHM yang rendah mengindikasikan pelebaran puncak difraksi yang kecil sehingga ukuran kristalit relatif besar, menandakan densitas cacat kristal, regangan kisi (*lattice strain*), dan tegangan sisa (*residual stress*) masih rendah.

Setelah dilakukan quenching menggunakan media air, nilai FWHM Al meningkat menjadi 0,1670° disertai penurunan ukuran kristalit Al menjadi 47,48 nm, sedangkan ukuran kristalit Si menurun menjadi 66,37 nm. Penurunan ukuran kristalit tersebut diikuti oleh peningkatan kekerasan menjadi 94,02 HV, yang merupakan nilai kekerasan tertinggi pada penelitian ini. Hasil tersebut menunjukkan bahwa media pendingin air memiliki laju pendinginan (*cooling rate*) yang tinggi sehingga menghasilkan pelebaran puncak difraksi (*peak broadening*), meningkatkan regangan kisi dan tegangan sisa, serta memperhalus struktur kristal. Menurut teori Hall–Petch, ukuran kristalit yang lebih kecil meningkatkan jumlah batas butir (*grain boundary*) sehingga pergerakan dislokasi semakin terhambat dan kekerasan material meningkat.

Pada spesimen Quenching Air + Artificial Aging, ukuran kristalit Al sedikit meningkat dari 47,48 nm menjadi 48,52 nm, sedangkan ukuran kristalit Si meningkat lebih signifikan menjadi 97,68 nm. Bersamaan dengan itu, nilai kekerasan menurun menjadi 88,82 HV. Peningkatan ukuran kristalit menunjukkan bahwa selama proses artificial aging terjadi difusi atom yang menyebabkan relaksasi tegangan internal dan pertumbuhan kristalit (*crystal growth*).

Akibatnya jumlah batas butir berkurang sehingga hambatan terhadap pergerakan dislokasi menurun dan kekerasan material kembali mendekati kondisi awal.

Pada perlakuan Quenching Larutan CaCO_3 25%, ukuran kristalit Al sebesar 52,47 nm, sedangkan ukuran kristalit Si meningkat menjadi 100,11 nm dengan nilai kekerasan 89,32 HV. Dibandingkan media air, ukuran kristalit yang lebih besar menunjukkan bahwa larutan CaCO_3 25% memiliki laju pendinginan yang lebih rendah sehingga atom masih memiliki waktu untuk berdifusi selama proses pendinginan. Difusi tersebut memungkinkan pertumbuhan kristalit berlangsung lebih lama sehingga struktur kristal menjadi lebih kasar dibandingkan media air. Oleh karena itu, hambatan terhadap pergerakan dislokasi menjadi lebih kecil sehingga kekerasannya juga lebih rendah.

Pada perlakuan Quenching Larutan CaCO_3 25% + Artificial Aging, nilai FWHM Al meningkat menjadi $0,2047^\circ$ sehingga ukuran kristalit Al menurun menjadi 41,98 nm, sedangkan ukuran kristalit Si tetap sebesar 100,11 nm. Walaupun ukuran kristalit Al menjadi yang paling kecil, nilai kekerasan hanya meningkat sedikit menjadi 89,52 HV. Kondisi ini menunjukkan bahwa hubungan antara ukuran kristalit dan kekerasan tidak sepenuhnya linier. Sifat mekanik material tidak hanya dipengaruhi oleh ukuran kristalit, tetapi juga dipengaruhi oleh mekanisme presipitasi selama artificial aging, distribusi presipitat, relaksasi tegangan sisa, serta kondisi supersaturated solid solution yang terbentuk setelah solution treatment dan quenching. Oleh karena itu, perubahan ukuran kristalit Al yang cukup besar tidak selalu menghasilkan peningkatan kekerasan yang signifikan apabila mekanisme presipitasi dan relaksasi tegangan berlangsung secara bersamaan.

4. PENUTUP

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh media pendingin air dan larutan CaCO_3 25% terhadap kekerasan dan struktur kristal paduan Aluminium Silikon (Al-Si) setelah proses quenching dan artificial aging, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Hasil pengujian X-Ray Diffraction (XRD) menunjukkan bahwa seluruh spesimen memiliki dua unsur utama, yaitu Aluminium (Al) dan Silikon (Si), sehingga proses quenching dan artificial aging tidak mengubah unsur utama material, tetapi mempengaruhi karakteristik struktur kristalnya. Pada raw material, unsur Al memiliki puncak difraksi tertinggi pada sudut 2θ sebesar $38,51^\circ$ dengan intensitas 589643 counts, sedangkan unsur Si memiliki puncak tertinggi pada sudut 2θ sebesar $28,48^\circ$ dengan intensitas 3735 counts. Setelah proses quenching menggunakan media air, unsur Al masih menjadi fase dominan dengan puncak tertinggi pada sudut 2θ sebesar $65,21^\circ$ dan

intensitas 7070 counts, sedangkan unsur Si memiliki intensitas tertinggi sebesar 3421 counts pada sudut 2θ $28,53^\circ$. Pada spesimen quenching air dan artificial aging, intensitas tertinggi unsur Al berubah menjadi 7941 counts pada sudut 2θ $78,32^\circ$, sedangkan unsur Si meningkat menjadi 4508 counts pada sudut 2θ $28,48^\circ$. Sementara itu, pada spesimen quenching larutan CaCO_3 25%, unsur Al memiliki intensitas tertinggi sebesar 45906 counts pada sudut 2θ $44,75^\circ$, unsur Si memiliki intensitas tertinggi sebesar 4092 counts pada sudut 2θ $28,44^\circ$ dan setelah artificial aging intensitas tertinggi unsur Al menjadi 21295 counts pada sudut 2θ $44,73^\circ$, unsur Si memiliki intensitas tertinggi sebesar 4087 counts pada sudut 2θ $28,48^\circ$. Adanya perubahan intensitas puncak pada setiap perlakuan menunjukkan bahwa media pendingin dan artificial aging mempengaruhi susunan atom serta karakteristik struktur kristal paduan Aluminium Silikon, meskipun fase utama yang terbentuk tetap Aluminium dan Silikon. Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan Persamaan Scherrer, ukuran kristalit unsur Al berubah dari 94,19 nm pada *raw material* menjadi 47,48 nm setelah *quenching* media air, kemudian meningkat menjadi 48,52 nm setelah *artificial aging*. Pada media pendingin larutan CaCO_3 25%, ukuran kristalit unsur Al sebesar 52,47 nm setelah proses *quenching* dan berubah menjadi 41,98 nm setelah proses *artificial aging*. Sementara itu, ukuran kristalit unsur Si juga mengalami perubahan pada setiap perlakuan, yang menunjukkan bahwa proses *quenching* dan *artificial aging* memengaruhi perkembangan struktur kristal kedua unsur tersebut. Perubahan ukuran kristalit tersebut dipengaruhi oleh perbedaan laju pendinginan (*cooling rate*) masing-masing media, yang menyebabkan perbedaan mekanisme difusi atom, regangan kisi (*lattice strain*), dan tegangan sisa (*residual stress*) selama proses perlakuan panas. Media pendingin air dengan laju pendinginan lebih tinggi menghasilkan ukuran kristalit yang lebih kecil dibandingkan media larutan CaCO_3 25%, sedangkan proses *artificial aging* menyebabkan perubahan struktur kristal melalui difusi atom, relaksasi tegangan internal, serta pertumbuhan atau perubahan kristalit sesuai kondisi awal material setelah proses *quenching*.

Hasil pengujian X-Ray Diffraction (XRD) menunjukkan bahwa struktur kristal paduan Aluminium Silikon (Al-Si) mengalami perubahan akibat penggunaan media pendingin yang berbeda. Unsur yang teridentifikasi pada seluruh spesimen didominasi oleh unsur Aluminium (Al) dan Silikon (Si), namun terjadi perubahan pada intensitas puncak difraksi setelah proses quenching dan artificial aging. Hal ini menunjukkan bahwa media pendingin air maupun larutan CaCO_3 25% memberikan pengaruh terhadap

karakteristik struktur kristal paduan Aluminium Silikon (Al-Si).

2. Penggunaan media pendingin air dan larutan CaCO_3 25% pada proses quenching dan artificial aging terbukti memberikan pengaruh terhadap nilai kekerasan paduan Aluminium Silikon (Al-Si). Nilai kekerasan raw material sebelum perlakuan sebesar 88,84 HV. Setelah dilakukan proses quenching menggunakan media pendingin air, nilai kekerasan meningkat menjadi 94,02 HV atau mengalami kenaikan sebesar 5,83%. Peningkatan ini menunjukkan bahwa pendinginan cepat menggunakan air mampu menghasilkan struktur yang lebih rapat sehingga meningkatkan ketahanan material terhadap deformasi plastis. Namun, setelah dilakukan artificial aging, nilai kekerasan menurun menjadi 88,82 HV atau turun sebesar 0,02% dibandingkan raw material. Sebaliknya, pada media pendingin larutan CaCO_3 25%, nilai kekerasan setelah quenching meningkat menjadi 89,32 HV atau naik sebesar 0,54%, sehingga pengaruh quenching saja belum terlalu signifikan. Akan tetapi, setelah dilanjutkan dengan proses artificial aging, nilai kekerasan meningkat menjadi 89,52 HV atau naik sebesar 0,77% dibandingkan raw material. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi media pendingin larutan CaCO_3 25% dan artificial aging merupakan perlakuan yang paling efektif dalam meningkatkan kekerasan paduan Aluminium Silikon (Al-Si).

DAFTAR PUSTAKA

- Admane, Rahul. 2025. "A Research Review on Al-Si Phase Diagram Phase Stability and Microstructure Evolution in Aluminum Alloy." *Rahul Admane* 13:4.
- Aziza, Yuliana. 2020. "PENGARUH KADAR GARAM DAPUR (NaCl) DALAM MEDIA PENDINGIN TERHADAP TINGKAT KEKERASAN PADA PROSES PENGKERASAN BAJA ST-60." *Jurnal Teknologi Terapan: G-Tech* 1(1):18–25. doi:10.33379/gtech.v1i1.263.
- Bibik, Natallia, Alexander Metel, Nikolai Cherenda, Catherine Sotova, Valiantsin Astashynski, Anton Kuzmitski, Yury Melnik, and Alexey Vereschaka. 2024. "Structure of Eutectic Al-Si Alloy Subjected to Compression Plasma Flow Impact." *Metals* 14(12). doi:10.3390/met14121415.
- Dong, Jian, Jufu Jiang, Ying Wang, Minjie Huang, Jingbo Cui, and Tao Song. 2025. "Effect of Solution and Aging Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Al-14Si-5Cu-1.1Mg-2.3Ni-0.3La Alloy." *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)* 38(3):449–64. doi:10.1007/s40195-024-01796-9.
- Fatimah, Siti, Risti Ragadhita, Dwi Fitria Al Husaeni, and Asep Bayu Dani Nandiyanto. 2022. "How to Calculate Crystallite Size from X-Ray Diffraction (XRD) Using Scherrer Method." *ASEAN Journal of Science and Engineering* 2(1):65–76. doi:10.17509/ajse.v2i1.37647.
- Gao, Chang, Xin Liu, Dong Zhao, Yiming Guo, Shaohua Chen, Fantao Gao, Tianle Liu, Zhenyang Cai, Danyang Liu, and Jinfeng Li. 2023. "Recent Progress in Testing and Characterization of Hardenability of Aluminum Alloys: A Review." *Materials* 16(13). doi:10.3390/ma16134736.

- Hadi Sujiono Laboratorium Fisika Material Jurusan Fisika, Eko, and Fmipa Universitas Negeri Makassar Jl Daeng Tata Raya. 2013. "KARAKTERISASI KALSIUM KARBONAT ($\text{Ca}(\text{CO}_3)$) DARI BATU KAPUR KELURAHAN TELLU LIMPOE KECAMATAN SUPPA." 169–72.
- Shieddieque, Apang Djafar, Yadi Heryadi, and Andika Candra. 2024. "PENGARUH VARIASI MEDIA QUENCHING TERHADAP KEKERASAN DAN STRUKTUR MIKRO MATERIAL PADUAN Al-Si- Material Aluminium Telah Menjadi Salah Satu Bahan Logam Yang Sangat Penting Dan Luas Digunakan Dalam Berbagai Aplikasi Menjadi Pilihan Utama Dalam Industri Pengu." 13(02):277–83.
- Sultan, Ahmad Zubair, and Nur Hamzah. 2019. "Pengaruh Solution Treatment Dan Artifial Aging Terhadap Sifat Mekanis Dan Struktur Mikro Paduan Alumunium A383." *Prosiding Seminar Nasional Penelitian Dan Pengabdian Kepada Masyarakat* 2019:68–77.
- Tsamroh, Dewi Izzatus, and Muchammad Riza Fauzy. 2022. "Peningkatan Sifat Mekanik Al6061 Melalui Heat Treatment Natural-Artificial Aging." *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan* 6(1):8–13. doi:10.33379/gtech.v6i1.1217.
- Yudhi Chandra Dwiaji. 2023. "Pengaruh Variasi Temperatur Perlakuan Panas Dan Media Pendingin Terhadap Sifat Mekanis Dan Mikrostruktur Aluminium 2024." *Journal of Applied Mechanical Engineering and Renewable Energy* 3(2):69–75. doi:10.52158/jamere.v3i2.571.
- Yudistira, Jastin, Firdaus, and Taufikurrahman. 2024. "PEMANFAATAN PADUAN ALUMINIUM SILIKON SEBAGAI MATERIAL SHIFTING LEVER PADA TRAKTOR TANGAN." *Machinery Jurnal Teknologi Terapan* 5(2):92–99.

