

PENGARUH KOMPOSISI MEDIA PENDINGIN LARUTAN CaCO_3 35% TERHADAP KEKERASAN DAN *X-RAY DIFFRACTION* PADA PROSES *QUENCHING* DAN *ARTIFICIAL AGING* ALUMINIUM SILIKON

Ihwanuddin Nur Muhlisin*, Masyrukan, S.T., M.T.

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta

Abstrak

Aluminium silikon (Al-Si) merupakan paduan yang banyak digunakan dalam industri otomotif karena sifatnya yang ringan dan memiliki *castability* yang baik, namun sifat mekanisnya masih perlu ditingkatkan melalui perlakuan panas. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh media pendingin larutan CaCO_3 35% dibandingkan air pada proses *quenching* dan *artificial aging* terhadap kekerasan serta struktur kristal paduan Al-Si. Spesimen berbentuk silinder ($\phi 50$ mm, $t=20$ mm) diperlakukan melalui tahapan *solution treatment*, *quenching*, dan *artificial aging* pada temperatur 200°C . Pengujian kekerasan dilakukan dengan metode Vickers (100 Kgf), sedangkan karakterisasi struktur kristal menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengidentifikasi fasa, nilai FWHM, dan ukuran kristalit melalui persamaan Scherrer. Hasil menunjukkan bahwa *quenching* media air meningkatkan kekerasan sebesar 5,83% menjadi 94,02 HV, namun turun kembali ke 88,82 HV setelah *artificial aging* akibat fenomena *over-aging*. Sebaliknya, *quenching* media CaCO_3 35% menghasilkan peningkatan kekerasan sebesar 26,76% menjadi 112,62 HV, dan setelah *artificial aging* masih bertahan pada 106,72 HV (+20,12%). Analisis XRD menunjukkan seluruh sampel didominasi fasa aluminium (Al) dengan silikon (Si) sebagai fasa sekunder tanpa terbentuknya fasa baru, dengan ukuran kristalit bervariasi pada rentang 16,38–104,95 nm. Disimpulkan bahwa larutan CaCO_3 35% lebih efektif sebagai media pendingin dalam meningkatkan dan mempertahankan kekerasan paduan aluminium silikon dibandingkan media air.

Kata kunci: Aluminium Silikon, *Quenching*, *Artificial Aging*, CaCO_3 , kekerasan Vickers, *X-Ray Diffraction*

Abstrak

Aluminum-silicon (Al-Si) is an alloy widely used in the automotive industry due to its lightweight properties and good castability; however, its mechanical properties still need to be improved through heat treatment. This study aims to analyze the effect of 35% CaCO_3 solution as a quenching medium compared to water during quenching and artificial aging processes on the hardness and crystal structure of Al-Si alloy. Cylindrical specimens ($\phi 50$ mm, $t=20$ mm) were subjected to solution treatment, quenching, and artificial aging at a temperature of 200°C . Hardness testing was carried out using the Vickers method (100 kgf), while crystal structure characterization was performed using X-Ray Diffraction (XRD) to identify phases, FWHM values, and crystallite size through the Scherrer equation. The results show that water quenching increased hardness by 5.83% to 94.02 HV, but decreased back to 88.82 HV after artificial aging due to the over-aging phenomenon. In contrast, quenching with 35% CaCO_3 solution produced a hardness increase of 26.76% to 112.62 HV, and after artificial aging it remained at 106.72 HV (+20.12%). XRD analysis revealed that all samples were dominated by the aluminum (Al) phase with silicon (Si) as a secondary phase, with no new phases formed, and crystallite

sizes varying in the range of 16.38–104.95 nm. It is concluded that 35% CaCO_3 solution is more effective as a quenching medium in improving and maintaining the hardness of aluminum-silicon alloy compared to water.

Kata kunci: *Aluminum–Silicon Alloy, Quenching, Artificial Aging, Calcium Carbonate (CaCO_3), X-Ray Diffraction, Vickers Hardness*

1. PENDAHULUAN

Material aluminium telah menjadi salah satu bahan logam yang sangat penting dan luas digunakan dalam berbagai aplikasi teknologi. Kepopuleran aluminium dapat dilihat dari sifat-sifatnya yang ringan, tahan korosi, dan memiliki konduktivitas listrik yang baik. Selain itu, sifat-sifat mekanisnya yang memadai membuat aluminium menjadi pilihan utama dalam industri otomotif, penerbangan, konstruksi, dan elektronik. Meskipun memiliki banyak keunggulan, aluminium juga memiliki kelemahan dalam hal kekuatan mekanis yang relatif rendah. Oleh karena itu, penelitian yang berkaitan dengan metode penguatan aluminium sangat penting untuk meningkatkan performa dan daya tahan material ini dalam aplikasi yang semakin beragam. (Shieddieque dkk., 2024)

Paduan aluminium memiliki densitas yang rendah yaitu 2,7 g/cm³. Dengan densitas yang rendah, penggunaan aluminium sebagai komponen otomotif dapat mereduksi berat keseluruhan kendaraan lebih dari 300 kg untuk kendaraan berukuran medium (1400 kg). Dimana setiap pengurangan berat sebesar 100 kg, akan mengurangi konsumsi bahan bakar yang diperlukan sebesar 0.3-0.6 liter per 100 km sehingga dapat menurunkan emisi gas buangan sebanyak 20%. Dari berbagai jenis paduan aluminium, paduan aluminium Al-Si-Cu merupakan paduan yang paling umum digunakan dalam industri otomotif. Dalam beberapa tahun belakangan ini, penggunaan paduan aluminium tersebut meningkat, terutama di industri otomotif yang menggunakan *secondary* aluminium hasil *recycling* dalam bentuk berbagai komponen seperti piston, *cylinder head*, *wheel*, *load floor suspension*, *crank case* dan *manifold*. Namun paduan Al-Si-Cu hasil pengecoran masih memiliki sifat mekanis yang rendah sehingga diperlukan proses lain untuk meningkatkan kekuatannya. (Muas M dkk., 2020)

Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk memperbaiki sifat mekanik paduan aluminium adalah dengan memberikan proses perlakuan panas. Proses ini meliputi proses *solution treatment* dan proses *aging*. Pada proses *solution treatment*, aluminium dipanaskan sampai mencapai suhu 420°C dan kemudian di *holding* untuk menyeragamkan suhu dan strukturnya. Selanjutnya proses ini diakhiri dengan pemberian pendinginan cepat (*quenching*). Tujuan dari proses ini adalah untuk meningkatkan kekuatan pada bahan tersebut.

Solution treatment adalah tahap pertama dari proses *age hardening*. *Solution treatment* yaitu proses pemanasan logam didalam dapur pemanas dengan temperatur 420°C dan dilakukan penahanan atau dengan jenis dan ukuran benda kerja. Tujuan dari proses *solution treatment* untuk mendapatkan larutan padat yang mendekati homogen. (Naafila dkk., 2024)

Proses *quenching* merupakan tahapan dalam proses perlakuan panas. *Quenching* dilakukan dengan cara mendinginkan logam yang telah dipanaskan dalam dapur pemanas kedalam media pendingin. Dalam proses *age hardening* logam yang di *quenching* adalah logam paduan aluminium yang telah dipanaskan dalam dapur pemanas kedalam media pendingin air. Tujuan dilakukan *quenching* adalah agar larutan padat *homogen* yang terbentuk pada *solution heat treatment* dan kekosongan atom dalam keseimbangan termal pada temperatur tinggi tetap pada tempatnya. (Naafila dkk., 2024)

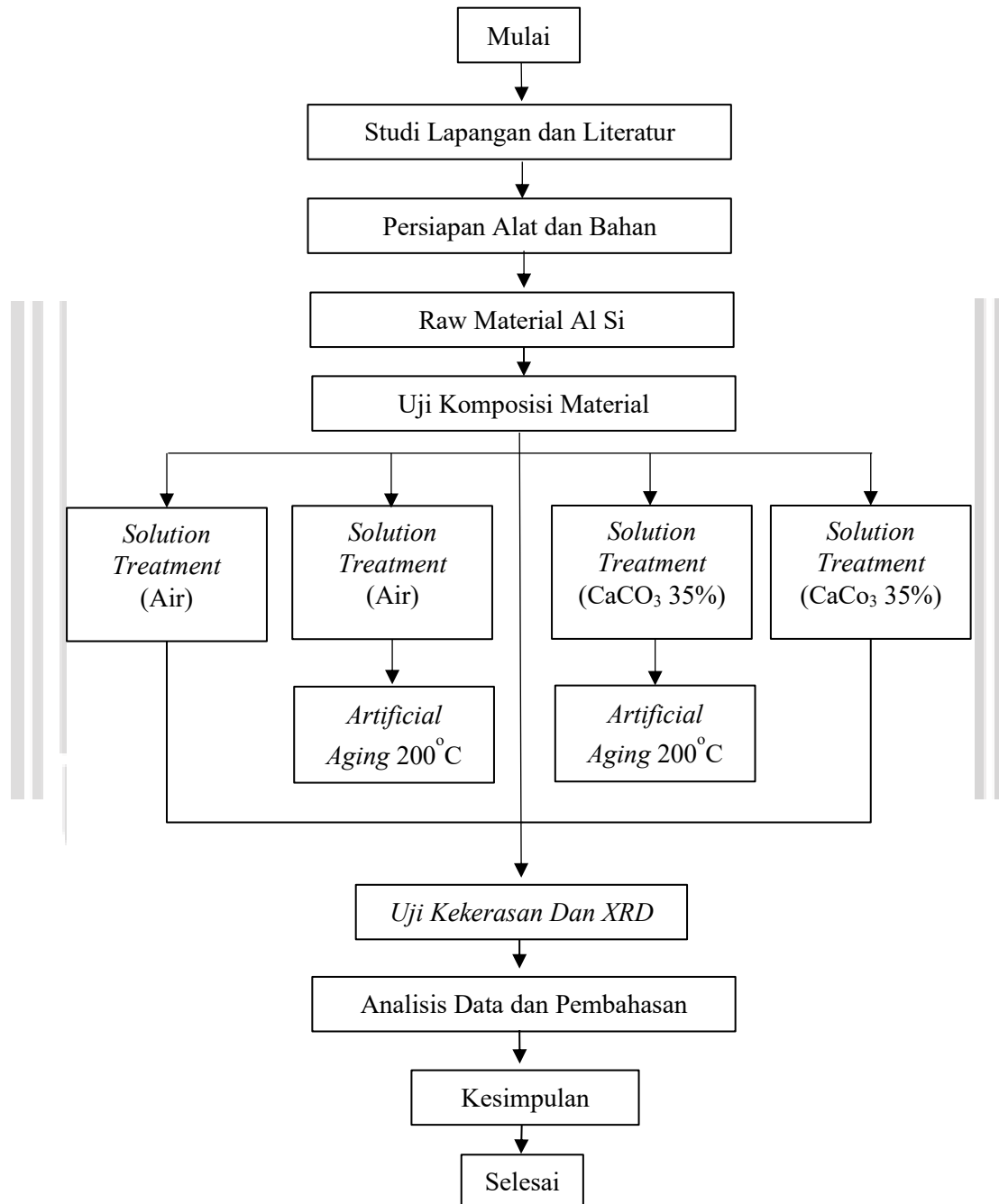
Artificial aging (menahan paduan secara konstan dengan suhu sedang selama periode yang telah ditentukan) menghasilkan peningkatan sifat mekanik seperti kekuatan dan kekerasan tarik dan dalam pemburukan plastisitas secara bersamaan. Karena pertumbuhannya kekuatan paduan setelah perlakuan panas sangat sering disertai dengan pengurangan plastisitas, mereka hubungan optimal harus dipilih tergantung pada yang diberikan penerapan paduan. (Naafila dkk., 2024)

Meskipun pengaruh media pendingin konvensional (air, oli, polimer) terhadap paduan aluminium telah cukup terdokumentasi, penggunaan larutan/dispersi berkomposisi CaCO_3 sebagai media pendingin pada proses *quenching* belum banyak diteliti, khususnya terkait bagaimana komposisi tersebut mempengaruhi laju pendinginan, pembentukan presipitat selama *subsequent artificial aging*, perubahan kekerasan, dan fase-fase yang terdeteksi oleh *X-Ray Diffraction* (XRD). Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk memahami apakah dan bagaimana CaCO_3 35% dapat menjadi media pendingin alternatif yang mengontrol pembentukan presipitat, mengoptimalkan kekerasan permukaan, atau mengubah fase yang terdeteksi pada XRD pada paduan aluminium silikon. Studi ini akan mengisi kekosongan literatur terkait penggunaan media pendingin berbasis CaCO_3 dan memberikan data empiris yang berguna bagi aplikasi industri yang membutuhkan kombinasi sifat kekerasan dan mikrostruktur tertentu.

2. METODE

2.1 Diagram Alir Penelitian

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



Gambar 1 Diagram Alir Penelitian

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 (AlSi) dengan diameter 50 mm dan tinggi 20 mm.

Tabel 1 Komposisi Paduan Al-Si

UNSUR	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/Oven

Tungku pemanas adalah alat yang digunakan untuk menghasilkan suhu tinggi secara terkendali guna memanaskan, mengeringkan, membakar, atau melakukan perlakuan panas (heat treatment) terhadap bahan tertentu. Alat ini umum digunakan di laboratorium, industri metalurgi, keramik, kimia, hingga manufaktur.



Gambar 2 Tungku pemanas

2. Ember

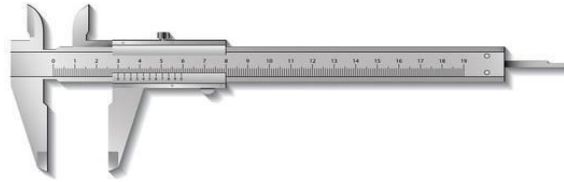
Ember berfungsi sebagai kontainer stabil untuk air, oli, atau cairan quench lainnya. Bahan ember harus tahan panas dan tidak gampang deformasi jika kontak dengan logam panas. Ember dalam proses quench adalah wadah yang digunakan untuk menampung media pendingin seperti air, oli, atau larutan tertentu. Ember berfungsi sebagai tempat perendaman logam panas agar terjadi pendinginan cepat sesuai kebutuhan proses quenching.



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 adalah tempat atau kontainer yang digunakan untuk menampung, menyimpan, dan melindungi sampel sebelum dilakukan pengujian atau analisis.



Gambar 5 Wadah sampel

5. Amplas

Amplas adalah bahan abrasif berbentuk lembaran kertas atau kain yang permukaannya dilapisi partikel kasar (abrasive). Amplas digunakan untuk mengikis, menghaluskan, membersihkan, atau membentuk permukaan suatu material.



Gambar 6 Amplas

6. Mesin Pemotong

Mesin pemotong adalah peralatan mekanis yang dirancang untuk memotong, membelah, atau memisahkan material menjadi bentuk atau ukuran tertentu dengan menggunakan energi gerak, tekanan, atau putaran.



Gambar 7 Mesin pemotong

7. Manual Metallographic & Polishing Machine

Manual Metallographic & Polishing Machine adalah mesin yang digunakan untuk melakukan proses pengamplasan (grinding) dan pemolesan (polishing) pada permukaan sampel logam dalam rangka persiapan analisis persiapan analisis metalografi.



Gambar 8 Manual Metallographic & Polishing Machine

8. Kain Bludru

Kain bludru digunakan sebagai media pemolesan akhir pada spesimen setelah tahap penghalusan (grinding). Permukaan kain yang lembut dan berbulu pendek memungkinkan abrasif bekerja secara merata tanpa menimbulkan goresan baru pada spesimen. Penggunaan kain bludru bertujuan untuk menghasilkan permukaan spesimen yang sangat halus, rata, dan reflektif, sehingga struktur mikro logam dapat terlihat jelas saat diamati melalui mikroskop.



Gambar 9 Kain bludru

9. Alat Uji Komposisi Kimia

Alat Uji Komposisi Kimia adalah perangkat laboratorium yang digunakan untuk menentukan kandungan unsur-unsur kimia dalam suatu material, baik dalam bentuk logam, cairan, maupun sampel padat lainnya. Alat ini bekerja dengan menganalisis sampel menggunakan metode tertentu sehingga dapat diketahui persen unsur seperti karbon, mangan, silikon, nikel, krom, sulfur, dan elemen lainnya.



Gambar 10 Alat Uji Komposisi Kimia

10. 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 bentuk jejak yang dihasilkan.



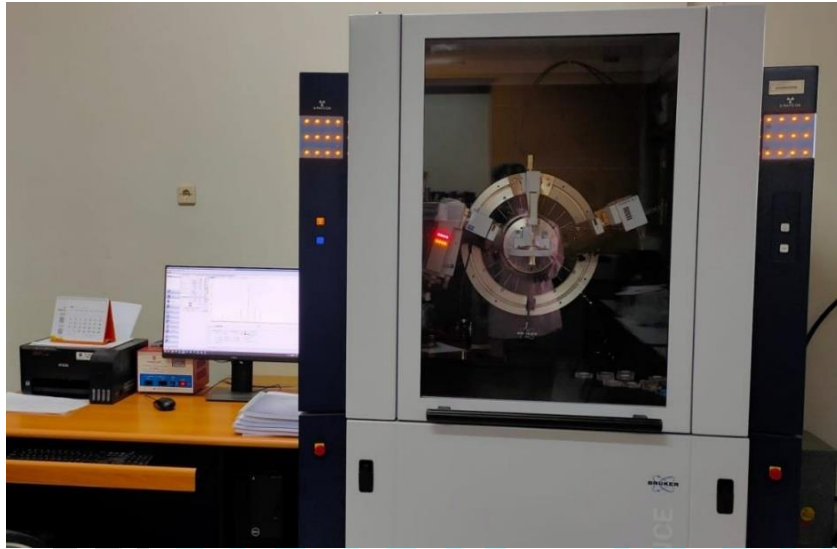
Gambar 11 Alat Uji Kekerasan

11. Alat Uji XRD

X-Ray Diffraction (XRD) merupakan salah satu metode karakterisasi material yang digunakan untuk mengidentifikasi struktur kristal, menentukan fasa yang terbentuk, serta menganalisis parameter kristalografi suatu material. Prinsip kerja XRD didasarkan pada difraksi sinar-X yang terjadi ketika berkas sinar-X mengenai bidang kristal dalam material. Difraksi yang dihasilkan akan membentuk pola tertentu yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi jenis fasa dan struktur kristal material yang diuji.

Peralatan XRD terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu sumber sinar-X (X-ray tube), goniometer, holder sampel, detektor, dan sistem pengolah data. Sumber sinar-X berfungsi menghasilkan radiasi sinar-X yang diarahkan menuju sampel. Goniometer berfungsi mengatur sudut datang dan sudut pantul sinar-X selama proses pemindaian. Holder sampel digunakan sebagai tempat peletakan spesimen yang akan diuji, sedangkan detektor

berfungsi menangkap sinar-X yang terdifraksi dan mengubahnya menjadi sinyal yang dapat diolah menjadi data difraksi.



Gambar 12 Alat Uji XRD

2.3 Instalasi Pengujian

Instalasi pengujian pada penelitian ini disusun untuk memastikan seluruh rangkaian proses perlakuan panas, pendinginan, serta pengujian sifat mekanik dan mikrostruktur dapat berlangsung secara terkendali dan sesuai prosedur standar. Instalasi pengujian mencakup perangkat pemanas, sistem pendinginan, instrumen karakterisasi mekanik, serta peralatan observasi mikrostruktur yang digunakan untuk menilai pengaruh media pendingin larutan CaCO_3 35% terhadap kekerasan dan morfologi mikro pada spesimen.

2.3.1 Instalasi Proses Quenching

Proses *quenching* dilakukan menggunakan tungku pemanas laboratorium yang mampu mencapai temperatur austenisasi material alumunium-silikon-magnesium. Instalasi terdiri atas:

- i. Tungku Pemanas (*Furnace*)

Digunakan untuk memanaskan spesimen hingga suhu perlakuan tertentu sebelum dilakukan quenching. Suhu dipertahankan secara stabil hingga waktu penahanan (*holding time*) terpenuhi.

- ii. Wadah Media Pendingin Larutan CaCO_3

Wadah *quench* diisi dengan larutan CaCO_3 20% yang telah dicampur secara homogen. Wadah ditempatkan dekat tungku untuk meminimalkan penurunan temperatur pada saat pemindahan spesimen panas.

iii. Peralatan Penjepit dan Keselamatan

Penjepit tahan panas digunakan untuk mengambil spesimen dari tungku dan memasukkannya ke media pendingin. Peralatan keselamatan seperti sarung tangan tahan panas, kacamata pelindung, dan apron digunakan selama proses.

2.3.2 Instalasi Proses Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan Hardness Tester tipe Rockwell, yang terdiri atas:

1. Mesin Uji Kekerasan Rockwell

Berfungsi memberikan beban penetrasi tertentu menggunakan indenter kerucut berlian atau bola baja sesuai skala pengujian yang digunakan.

2. Meja Penyangga Spesimen

Menjaga stabilitas permukaan spesimen saat dilakukan indentasi.

3. Sistem Pembacaan Kekerasan

Menampilkan nilai Rockwell Hardness Number (HR) secara digital atau analog

2.3.3 Instalasi Proses Pengujian Struktur Mikro dengan *X-Ray Diffraction* (XRD)

Untuk menganalisis perubahan struktur mikro akibat quenching dan aging, digunakan instalasi XRD yang meliputi:

1. Mesin *X-ray Diffraction* (XRD)

merupakan perangkat inti yang digunakan dalam pengujian struktur mikro. Di dalamnya terdapat sumber sinar-X (umumnya Cu-K α), goniometer untuk mengatur sudut difraksi, serta detektor yang menangkap sinar yang terdifraksi oleh sampel. Mesin ini berfungsi menghasilkan berkas sinar-X, mengarahkan ke permukaan material, dan merekam pola difraksi yang terbentuk. Dengan komponen ini, XRD mampu memberikan data mengenai fase kristal, ukuran butir, dan tekstur material.

2. Sistem Instrumentasi dan Kontrol

berperan dalam menjaga kestabilan serta akurasi proses pengujian. Sistem ini mencakup pengatur daya tabung sinar-X, pendingin, serta mekanisme pengendali goniometer agar sudut difraksi dapat diatur dengan presisi. Selain itu, sistem kontrol juga memastikan keamanan radiasi dan konsistensi parameter uji seperti kecepatan pemindaian, step size, serta waktu penahanan. Tanpa sistem yang terintegrasi, hasil pengujian tidak akan akurat dan sulit

direproduksi.

3. Komputer dan Perangkat Lunak Analisis

menjadi bagian akhir dari instalasi XRD. Data intensitas difraksi yang ditangkap detektor diolah oleh komputer menjadi pola difraksi berupa grafik intensitas terhadap sudut 2θ . Perangkat lunak analisis seperti HighScore Plus atau Match digunakan untuk membandingkan pola difraksi dengan database (misalnya ICDD PDF-4) sehingga fase kristal dapat diidentifikasi. Dari hasil analisis ini, peneliti dapat mengetahui struktur mikro material, ukuran kristalit, tegangan sisa, maupun presipitasi yang terbentuk.

2.4 Sampel

Sampel specimen yang digunakan dalam penelitian ini yaitu :

1. Aluminium Silikon (AlSi)

Aluminium Silikon yang digunakan sebagai specimen uji dalam proses penelitian ini. Ukuran specimen untuk penelitian ini adalah $\phi = 50 \text{ mm}$ dan $T = 20 \text{ mm}$. Spesimen aluminium silicon dapat dilihat pada gambar



Gambar 13 Aluminium Silikon (Al-Si)

2. Kalsium Karbonat (CaCO_3)

Kalsium karbonat (CaCO_3) yang digunakan sebagai specimen 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.

2.5 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 PUI Baterai Universitas Negeri Sebelas Maret.
5. Laboratorium Penelitian dan Pengujian Terpadu (LPPTD) Universitas Gadjah Mada.

2.6 Prosedur Penelitian

2.6.1 Persiapan Alat dan Bahan

Persiapan bahan dan alat dilakukan mulai dengan menyiapkan peralatan Quenching, specimen, dan karbon didekoratif. Adapun yang dibutuhkan diantaranya :

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

2.6.2 Proses Uji Komposisi

Berikut adalah langkah-langkah yang terlibat dalam proses Quenching :

1. Sampel logam dibersihkan dari kotoran, minyak, oksida, atau kontaminan lain yang dapat memengaruhi hasil pengujian. Permukaan sampel biasanya diamplas atau digerinda untuk mendapatkan permukaan yang rata dan homogen sebelum dianalisis.
2. Sampel ditempatkan pada ruang analisis alat, misalnya pada port pembacaan dudukan 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.

2.6.3 Proses Quenching Media Air

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.

2.6.4 Proses Quenching Media CaCO_3 35%

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 berupa larutan CaCO_3 35%

2.6.5 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 30°C .
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.

2.6.6 Pengujian Struktur Kristal

Hasil pengujian X-ray Diffraction (XRD) digunakan untuk menentukan fasa kristal yang terbentuk, Berikut adalah tahapan lengkapnya:

1. Sampel aluminium dipotong sesuai ukuran holder XRD. Permukaan sampel dibuat rata dan bersih dari oksida maupun kontaminan.
2. Sampel aluminium ditempatkan pada sample holder XRD dengan posisi stabil dan rata. Penempatan yang baik penting agar sinar-X mengenai permukaan sampel secara merata dan menghasilkan pola difraksi yang akurat.
3. Pengaturan instrumen XRD.
4. Sinar-X ditembakkan ke sampel aluminium. Detektor merekam intensitas sinar-X yang terpantul pada berbagai sudut 2θ , menghasilkan pola difraksi khas berupa grafik intensitas terhadap sudut.
5. Melakukan Pengamatan.
6. Data hasil scanning berupa puncak-puncak difraksi dianalisis dengan membandingkan posisi dan intensitas puncak terhadap database standar (ICDD/JCPDS).

2.7 Rancangan Analisis Data

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

2.7.1 Rancangan Analisis Uji X-Ray Diffraction (XRD)

Analisis X-Ray Diffraction (XRD) pada penelitian ini dilakukan untuk mengetahui perubahan struktur kristal, identifikasi fasa, serta ukuran kristalit pada spesimen paduan aluminium-silikon setelah mengalami perlakuan panas dan proses quenching. Data yang diperoleh dari pengujian XRD berupa difraktogram yang menunjukkan hubungan antara intensitas difraksi terhadap sudut difraksi (2θ).

Tahap pertama analisis dilakukan dengan mengidentifikasi puncak-puncak difraksi yang muncul pada difraktogram. Setiap puncak yang terdeteksi kemudian dicocokkan dengan data standar pada database Powder Diffraction File (PDF) dari International Centre for Diffraction Data (ICDD) untuk menentukan fasa yang terbentuk pada material. Hasil identifikasi ini digunakan untuk mengetahui keberadaan fasa aluminium (Al), silikon (Si), maupun fasa lain yang mungkin terbentuk akibat perlakuan yang diberikan.

Tahap berikutnya adalah menentukan nilai jarak antarbidang kristal (d-spacing) menggunakan data sudut difraksi yang diperoleh. Selanjutnya dilakukan pengindeksan bidang kristal dengan menentukan indeks Miller (hkl) pada setiap puncak difraksi utama.

Pengindeksan ini bertujuan untuk mengetahui orientasi bidang kristal yang berkontribusi terhadap pola difraksi yang dihasilkan.

Selain identifikasi fasa, analisis juga dilakukan terhadap nilai Full Width at Half Maximum (FWHM) dari puncak difraksi. Nilai FWHM digunakan untuk menghitung ukuran kristalit menggunakan Persamaan Scherrer sebagai berikut:

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

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 (°)

2.7.2 Rancangan Analisis Uji Kekerasan Metode Vickers

Pengujian kekerasan pada material paduan aluminium-silikon dilakukan menggunakan alat uji kekerasan tipe Vickers. Metode ini dipilih karena mampu memberikan ketelitian tinggi, terutama untuk material yang memiliki lapisan hasil perlakuan panas seperti karburisasi. Pengujian 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:

$$HV = \frac{1.584 \times F}{d^2}$$

Dimana,

HV = Kekerasan Vickers (Kgf/mm²)

F = Beban uji (Kgf)

d = Rata rata diagonal indentasi (mm)

Hasil pengujian kekerasan secara lengkap disajikan pada Tabel 3.3

Tabel 2 Data uji kekerasan

No.	Media pendingin	Diagonal rata-rata (Inchi)	Beban (Kgf)	Nilai Kekerasan (HV)
1.				

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil dan Analisis Uji XRD (*X-Ray Diffraction*)

Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan untuk mengidentifikasi fasa yang terdapat pada material serta menganalisis perubahan struktur kristal akibat perlakuan panas dan media pendinginan yang digunakan. Metode XRD bekerja berdasarkan prinsip difraksi sinar-X oleh bidang-bidang kristal dalam material, sehingga menghasilkan pola difraksi khas pada sudut tertentu (2θ) yang dapat digunakan untuk menentukan jenis fasa, struktur kristal dan tingkat kristalinitas material.

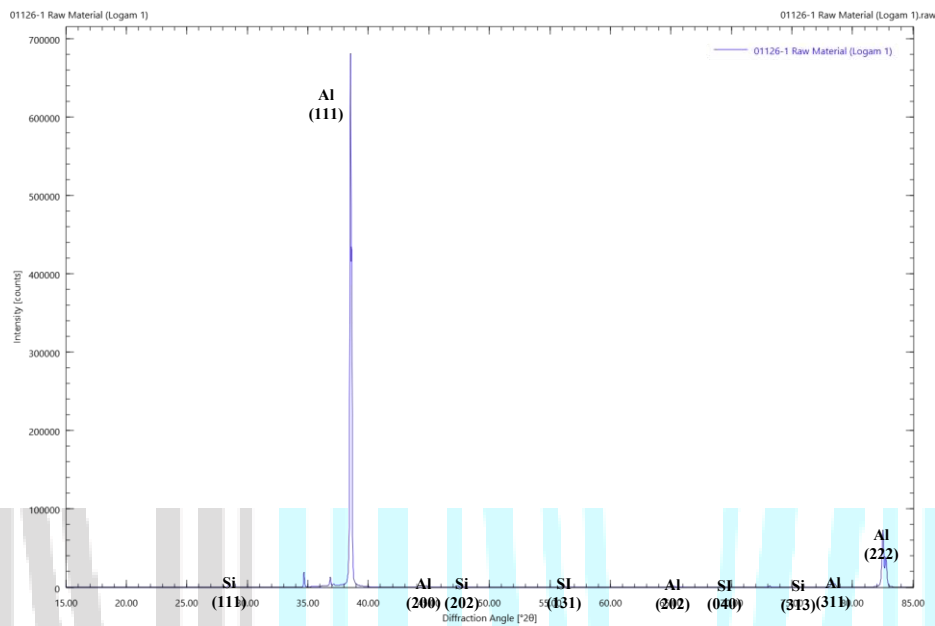
Analisis hasil XRD pada penelitian ini meliputi identifikasi fasa berdasarkan posisi puncak difraksi dan indeks Miller (hkl), sehingga dapat diketahui perubahan fasa setelah perlakuan panas. Selain itu, perubahan intensitas puncak difraksi juga diamati untuk menunjukkan dominasi suatu fasa atau orientasi bidang kristal tertentu dalam material. Semakin tinggi intensitas puncak, maka semakin dominan bidang kristal yang bersesuaian.

Parameter lain yang dianalisis adalah *Full Width at Half Maximum* (FWHM), yaitu lebar puncak difraksi pada setengah intensitas maksimum. Nilai FWHM digunakan untuk mengetahui keteraturan kristal, regangan kisi, serta ukuran kristalit material.

Berdasarkan nilai FWHM tersebut, dilakukan perhitungan ukuran kristalit menggunakan persamaan Scherrer. Ukuran kristalit merupakan ukuran rata-rata domain kristal penyusun material, yang berbeda dengan ukuran butir hasil pengamatan mikroskopis. Perubahan ukuran kristalit dapat menunjukkan pengaruh perlakuan panas, proses quenching, maupun artificial aging terhadap perkembangan struktur mikro material.

Melalui analisis fasa, intensitas puncak difraksi, nilai FWHM, dan ukuran kristalit, diperoleh informasi yang komprehensif mengenai perubahan struktur kristal material akibat variasi perlakuan yang diberikan.

3.1.1 Raw Material



Gambar 14 Grafik X-Ray Diffraction Raw Material

Berdasarkan grafik pola difraksi XRD Raw Material, terlihat bahwa sampel didominasi oleh fasa aluminium (Al) dengan keberadaan fasa silikon (Si) sebagai fasa pendamping. Hal ini ditunjukkan oleh munculnya beberapa puncak difraksi yang telah teridentifikasi pada sudut 2θ tertentu.

Puncak difraksi dengan intensitas tertinggi muncul pada sudut 2θ sekitar $38,5^\circ$ yang diidentifikasi sebagai Al (111). Puncak ini memiliki intensitas yang jauh lebih tinggi dibandingkan puncak lainnya, menunjukkan bahwa aluminium merupakan fasa utama (matriks) dalam material. Dominasi bidang (111) juga menunjukkan bahwa orientasi kristal aluminium pada bidang tersebut lebih dominan dibanding bidang kristal lainnya.

Selain puncak utama Al (111), terdapat puncak aluminium lain pada sekitar $44,8^\circ$ yang merupakan Al (200) dan pada sekitar 65° yang teridentifikasi sebagai Al (202). Munculnya beberapa puncak aluminium ini menunjukkan bahwa struktur kristal aluminium masih tersusun dengan baik dan mempertahankan karakteristik kristalinitasnya.

Fasa silikon terlihat dari puncak pada sudut 2θ sekitar $28,5^\circ$ (Si (111)), kemudian diikuti puncak lain pada sekitar 47° (Si (202)), 56° (Si (131)), dan $69-76^\circ$ (Si (040)). Intensitas puncak silikon yang jauh lebih rendah dibanding aluminium menunjukkan bahwa silikon berada sebagai fasa sekunder dan jumlahnya lebih sedikit di dalam matriks aluminium.

Secara visual, puncak-puncak difraksi pada grafik terlihat tajam dan sempit, terutama pada puncak utama Al (111), yang menunjukkan bahwa material memiliki tingkat kristalinitas yang baik. Selain itu, tidak terlihat adanya puncak tambahan yang signifikan di luar puncak

aluminium dan silikon, sehingga dapat diindikasikan bahwa tidak terjadi pembentukan fasa baru pada raw material dan struktur material masih berupa paduan Al–Si.

Tabel 3 Hasil Identifikasi Puncak Difraksi XRD Raw Material

No	2 θ (°)	d (Å)	I/I ₀ (Peak Height)	Counts (Peak Area)	FWHM (°)	Indeks Miller	Fasa
1	28.47	3.1327	16.81	530.08	0.0948	(111)	Si
2	28.54	3.1327	8.41	265.04	0.0948	(111)	Si
3	38.52	2.3388	500.00	13623.19	0.0819	(111)	Al
4	44.80	2.0265	2.26	153.73	0.2047	(200)	Al
5	47.34	1.9186	7.93	323.28	0.1225	(202)	Si
6	47.47	1.9186	3.97	161.64	0.1225	(202)	Si
7	56.17	1.6363	3.03	200.59	0.1987	(131)	Si
8	56.32	1.6363	1.52	100.30	0.1987	(131)	Si
9	65.21	1.4295	4.28	466.84	0.3275	(202)	Al
10	65.40	1.4295	2.14	233.42	0.3275	(202)	Al
11	69.18	1.3568	0.52	98.11	0.5693	(040)	Si
12	69.38	1.3568	0.26	49.06	0.5693	(040)	Si
13	76.43	1.2452	1.01	70.16	0.2078	(313)	Si
14	76.65	1.2452	0.51	35.08	0.2078	(313)	Si
15	78.38	1.2191	25.09	3076.76	0.3685	(311)	Al
16	78.61	1.2191	12.55	1538.38	0.3685	(311)	Al
17	82.65	1.1665	95.91	4372.00	0.4503	(222)	Al
18	82.90	1.1665	47.95	7186.00	0.4503	(222)	Al

Berdasarkan hasil identifikasi pola difraksi sinar-X (XRD), sampel menunjukkan keberadaan dua fasa utama yaitu aluminium (Al) dan silikon (Si). Puncak difraksi tertinggi terdeteksi pada sudut 2 θ sebesar 38,52° dengan intensitas relatif (I/I₀) sebesar 1000 dan nilai counts mencapai 108215,42. Puncak ini diidentifikasi sebagai fasa aluminium dengan orientasi bidang kristal (111), yang menunjukkan bahwa aluminium merupakan fasa dominan dalam material. Selain itu, aluminium juga terdeteksi pada sudut 44,76°, 44,88°, 65,29°, dan 69,18° yang masing-masing berkaitan dengan bidang kristal (200) dan (202). Dominasi puncak aluminium menunjukkan bahwa matriks utama sampel tersusun oleh fasa Al yang memiliki tingkat kristalinitas yang baik.

Fasa silikon teridentifikasi pada beberapa sudut difraksi, yaitu 28,27°, 28,54°, 47,36°, 47,49°, 56,25°, 65,11°, 69,38°, dan 76,43°. Puncak-puncak tersebut berkaitan dengan bidang kristal

(111), (202), (131), dan (040). Intensitas relatif fasa Si lebih rendah dibandingkan fasa Al, yang menunjukkan bahwa silikon berperan sebagai fasa sekunder dalam sampel. Keberadaan puncak Si pada sudut 2θ sekitar 28° merupakan karakteristik khas kristal silikon yang umum ditemukan pada paduan Al-Si.

Berdasarkan hasil identifikasi indeks Miller dari data XRD, sampel menunjukkan beberapa orientasi bidang kristal pada fasa aluminium (Al) dan silikon (Si). Fasa Si teridentifikasi pada bidang (111), (202), (131), dan (040) yang muncul pada beberapa sudut difraksi berbeda, menandakan silikon tersebar dalam beberapa arah pertumbuhan kristal. Sementara itu, fasa Al teridentifikasi pada bidang (111), (200), dan (202).

Bidang (111) menjadi orientasi yang paling dominan, terutama pada fasa aluminium karena menghasilkan intensitas difraksi tertinggi pada sudut $2\theta = 38,52^\circ$. Dominasi bidang (111) menunjukkan bahwa pertumbuhan dan susunan kristal pada sampel cenderung terarah pada bidang tersebut. Adanya bidang lain seperti (200), (202), (131), dan (040) menunjukkan bahwa struktur kristal material tidak homogen dan memiliki beberapa orientasi kristal pendukung.

Nilai Full Width at Half Maximum (FWHM) yang diperoleh berada pada rentang 0,111 hingga 0,3403. Puncak dengan nilai FWHM yang relatif kecil, seperti pada sudut $28,27^\circ$ dan $38,52^\circ$, menunjukkan tingkat kristalinitas yang baik dan ukuran kristalit yang cenderung lebih besar. Sebaliknya, puncak dengan nilai FWHM yang lebih besar mengindikasikan ukuran kristalit yang lebih kecil atau adanya regangan kisi pada struktur kristal. Secara keseluruhan, hasil analisis XRD menunjukkan bahwa sampel memiliki struktur kristal yang baik dengan fasa aluminium sebagai fasa dominan dan silikon sebagai fasa penguat yang tersebar dalam matriks aluminium.

Tabel 4 Hasil Perhitungan Ukuran Kristalit Raw Material

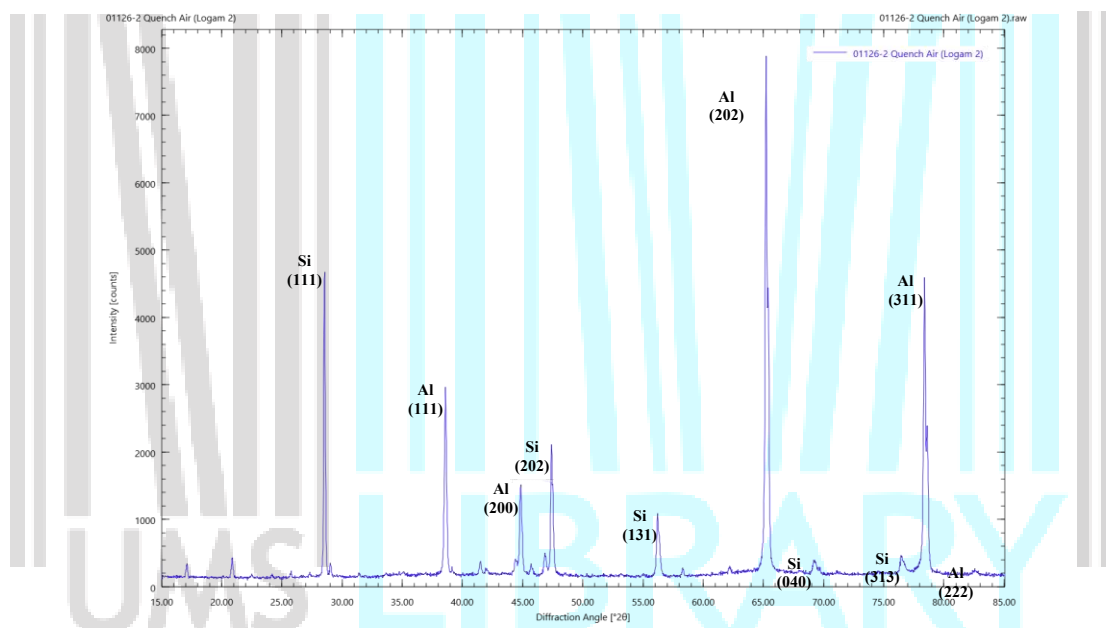
Fasa	Bidang (hkl)	2θ ($^\circ$)	FWHM ($^\circ$)	Ukuran Kristalit (nm)
Si	(111)	28,47	0,0948	86,22
Al	(111)	38,56	0,0819	102,61
Al	(200)	44,80	0,2047	41,99
Si	(202)	47,34	0,1225	69,98
Si	(131)	56,17	0,1987	46,44
Al	(202)	65,21	0,3275	28,48
Si	(040)	69,18	0,5693	16,38
Si	(313)	76,43	0,2078	46,14
Al	(311)	78,38	0,3685	26,21
Al	(222)	82,65	0,4503	22,42

Berdasarkan hasil perhitungan ukuran kristalit, diperoleh rentang ukuran kristalit sebesar 16,38–102,61 nm. Ukuran kristalit terbesar terdapat pada bidang Al (111) sebesar 102,61 nm,

diikuti Si (111) sebesar 86,22 nm, yang menunjukkan bahwa kedua bidang tersebut memiliki tingkat keteraturan kristal yang lebih baik dan menjadi orientasi kristal yang dominan pada material.

Sebaliknya, ukuran kristalit terkecil terdapat pada Si (040) sebesar 16,38 nm, diikuti Al (222) sebesar 22,42 nm dan Al (311) sebesar 26,21 nm, yang menunjukkan adanya pelebaran puncak difraksi yang lebih tinggi. Secara umum, hasil ini menunjukkan bahwa fasa aluminium (Al) memiliki ukuran kristalit yang cenderung lebih besar dibandingkan silikon (Si) sehingga aluminium menjadi fasa dominan pada raw material, sedangkan silikon berperan sebagai fasa sekunder yang tersebar dalam matriks aluminium.

3.1.2 Quenching Media Air



Gambar 15 Grafik X-Ray Diffraction dengan Quenching media Air

Hasil karakterisasi XRD pada sampel quenching dengan media air menunjukkan keberadaan dua fasa kristalin utama, yaitu silikon (Si) dan aluminium (Al). Identifikasi fasa dilakukan berdasarkan posisi puncak difraksi yang muncul pada pola XRD. Fasa Si terdeteksi pada bidang kristal (111), (202), (131), (040), dan (313) yang masing-masing berada pada sudut 2θ sekitar $28,5^\circ$, $47,4^\circ$, $56,2^\circ$, $69,3^\circ$, dan $76,5^\circ$. Sementara itu, fasa Al teridentifikasi pada bidang (111), (200), (202), (311), dan (222) yang muncul pada sudut 2θ sekitar $38,6^\circ$, $44,8^\circ$, $65,3^\circ$, $78,5^\circ$, dan $82,8^\circ$. Kesesuaian posisi puncak dengan data referensi menunjukkan bahwa kedua fasa tersebut merupakan penyusun utama material tanpa adanya indikasi pembentukan fasa baru yang signifikan.

Puncak difraksi dengan intensitas tertinggi ditemukan pada bidang Al (202) di sekitar $2\theta = 65,3^\circ$ dengan intensitas mencapai sekitar 7600 counts. Tingginya intensitas puncak ini

menunjukkan bahwa bidang Al (202) memiliki orientasi kristal yang lebih dominan dibandingkan bidang kristal lainnya. Selain itu, puncak kuat juga teramati pada bidang Si (111) di sekitar $28,5^\circ$ dan Al (311) di sekitar $78,5^\circ$, yang mengindikasikan kontribusi signifikan kedua bidang tersebut terhadap struktur kristal material. Dominasi beberapa puncak tertentu mengindikasikan adanya kecenderungan orientasi kristal (preferred orientation) selama proses pembentukan material.

Tabel 5 Hasil Identifikasi Puncak Difraksi XRD Spesimen Quenching Media Air

No	2θ ($^\circ$)	d ($\text{\AA}$)	I/I ₀ (Peak Height)	Counts (Peak Area)	FWHM ($^\circ$)	Indeks Miller	Fasa
1	28,55	3,1239	587,27	568,88	0,1198	111	Si
2	38,60	2,3305	379,57	510,31	0,1663	111	Al
3	38,70	2,3305	189,79	255,15	0,1663	111	Al
4	44,85	2,0195	194,15	190,01	0,1211	200	Al
5	44,96	2,0195	97,08	95,00	0,1211	200	Al
6	47,44	1,9147	282,86	561,73	0,2456	202	Si
7	56,25	1,6342	132,65	307,34	0,2866	131	Si
8	65,29	1,4279	1000,00	2647,82	0,3275	202	Al
9	65,48	1,4279	500,00	1323,91	0,3275	202	Al
10	69,20	1,3565	28,47	64,68	0,2810	040	Si
11	69,40	1,3565	14,23	32,34	0,2810	040	Si
12	76,49	1,2443	36,03	90,46	0,3106	313	Si
13	76,72	1,2443	18,01	45,23	0,3106	313	Si
14	78,52	1,2172	333,51	1103,83	0,4094	311	Al
15	78,75	1,2172	166,75	551,91	0,4094	311	Al
16	82,78	1,1679	4,43	11,74	0,3275	222	Al

Data difraksi sinar-X pada tabel menunjukkan bahwa material yang dianalisis merupakan komposit dua fase, yakni Aluminium (Al) dan Silikon (Si). Dari 16 puncak difraksi yang terdeteksi, sebanyak 10 puncak diidentifikasi sebagai fase Al (nomor 2, 3, 4, 5, 8, 9, 14, 15, dan 16), sementara 6 puncak sisanya (nomor 1, 7, 10, 11, 12, dan 13) merupakan fase Si. Keberadaan kedua fase ini mengindikasikan bahwa sampel adalah paduan Al-Si, jenis material yang sangat umum digunakan dalam industri otomotif dan kedirgantaraan karena kombinasi sifat ringan, kuat, dan tahan panas.

Puncak difraksi paling dominan tercatat pada nomor 8 dengan sudut $2\theta = 65,29^\circ$, nilai I/I₀ sebesar 1000,00, dan indeks Miller (202) milik fase Al. Puncak ini ditetapkan sebagai puncak

referensi (100%), yang berarti seluruh intensitas puncak lainnya dinormalisasi terhadap puncak ini. Puncak dominan kedua adalah nomor 1 milik fase Si pada $2\theta = 28,55^\circ$ dengan $I/I_0 = 587,27$ dan indeks Miller (111), yang merupakan bidang kristal paling kuat untuk struktur kubik berlian Si. Puncak-puncak dengan intensitas rendah seperti nomor 10, 11, 16 ($I/I_0 < 30$) mengindikasikan bidang kristal minor yang kurang berkontribusi terhadap struktur dominan material.

Secara keseluruhan, indeks Miller yang teridentifikasi dalam data XRD ini mencerminkan pola difraksi yang konsisten dengan referensi standar Al FCC dan Si kubik berlian. Bidang (202) Al sebagai puncak terkuat mengindikasikan kemungkinan tekstur kristalografis preferensial, sementara bidang (111) Si sebagai puncak terkuat pada fase Si mencerminkan sifat alami kerapatan atom tertinggi pada struktur kubik berlian. Fenomena peak splitting yang berulang pada kedua fase menunjukkan adanya tegangan mikro atau heterogenitas komposisi yang perlu ditelusuri lebih lanjut melalui analisis Williamson-Hall atau pemurnian Rietveld guna memperoleh gambaran struktural yang lebih akurat dan kuantitatif.

Nilai Full Width at Half Maximum (FWHM) dalam tabel menunjukkan tren yang meningkat seiring bertambahnya sudut 2θ , yakni dari $0,1198^\circ$ pada puncak pertama ($2\theta = 28,55^\circ$) hingga mencapai $0,4094^\circ$ pada puncak ke-14 dan ke-15 ($2\theta \approx 78,5^\circ$). Peningkatan FWHM ini merupakan perilaku yang wajar dalam difraksi sinar-X dan berkaitan erat dengan ukuran kristalit serta tegangan kisi (lattice strain). Menggunakan persamaan Scherrer, yakni $D = K\lambda/(\beta \cos \theta)$, ukuran kristalit rata-rata dapat diestimasikan secara kasar. Puncak dengan FWHM kecil (seperti nomor 1 dengan $\beta = 0,1198^\circ$) mengindikasikan kristalit yang relatif besar dan teratur, sedangkan puncak dengan FWHM besar (nomor 14–15, $\beta = 0,4094^\circ$) menunjukkan kristalit yang lebih kecil atau tingkat tegangan mikro yang lebih tinggi.

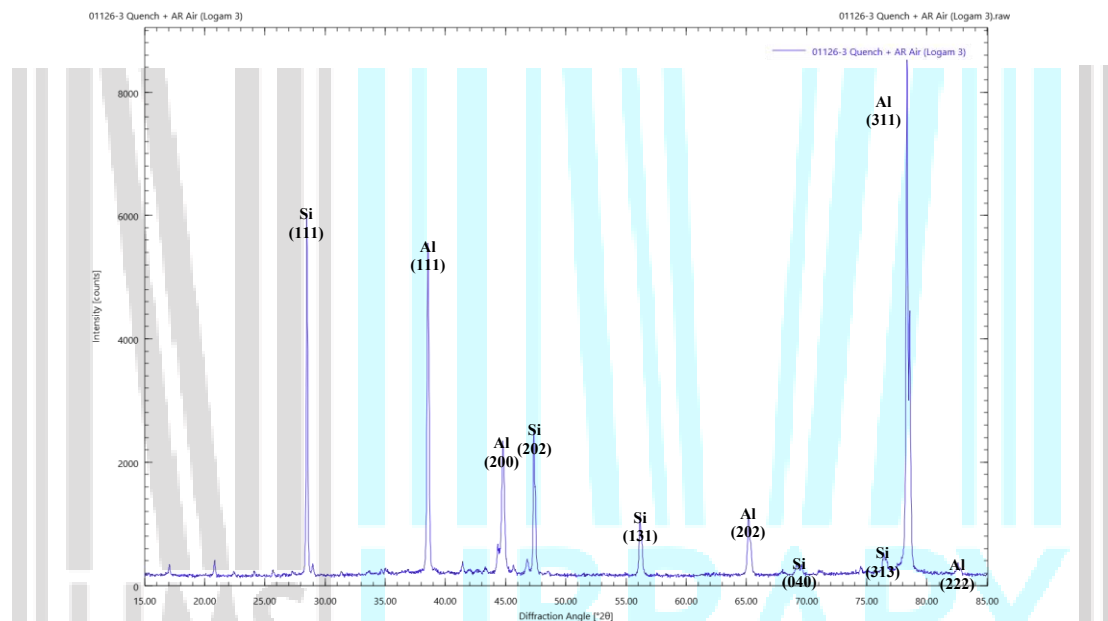
Tabel 6 Hasil Perhitungan Ukuran Kristalit Spesimen Quenching Media Air

Fasa	Bidang (hkl)	2θ ($^\circ$)	FWHM ($^\circ$)	Ukuran Kristalit (nm)
Si	(111)	28,55	0,1198	68,56
Al	(111)	38,60	0,1663	50,56
Al	(200)	44,85	0,1211	70,58
Si	(202)	47,44	0,2456	35,03
Si	(131)	56,25	0,2866	30,83
Al	(202)	65,29	0,3275	27,82
Si	(040)	69,20	0,2810	32,99
Si	(313)	76,49	0,3106	32,05
Al	(311)	78,52	0,4094	24,42
Al	(222)	82,78	0,3275	31,22

Berdasarkan tabel ukuran kristalit, diperoleh ukuran kristalit pada rentang 24,42–70,58 nm yang menunjukkan adanya variasi pertumbuhan kristal pada setiap bidang. Ukuran kristalit terbesar terdapat pada fasa Al bidang (200) sebesar 70,58 nm, yang menunjukkan pertumbuhan kristal lebih baik pada orientasi tersebut. Sementara itu, ukuran kristalit terkecil terdapat pada fasa Al bidang (311) sebesar 24,42 nm, yang menunjukkan kristal yang lebih halus.

Secara umum, hasil ini menunjukkan bahwa sampel memiliki struktur polikristalin dengan ukuran kristalit yang tidak seragam, di mana ukuran kristalit dipengaruhi oleh orientasi bidang kristal dan nilai FWHM yang dihasilkan dari pola difraksi XRD.

3.1.3 Quenching Media Air dan Artificial Aging



Gambar 16 Grafik X-Ray Diffraction dengan Quenching media Air dan Artificial Aging

Berdasarkan grafik X-Ray Diffraction (XRD) sampel quenching media air dan artificial aging, terlihat bahwa pola difraksi menunjukkan keberadaan dua fasa utama yaitu aluminium (Al) dan silikon (Si). Identifikasi dilakukan berdasarkan posisi puncak difraksi dan indeks Miller (hkl) yang muncul pada setiap sudut difraksi (2θ). Puncak pertama yang cukup tinggi muncul pada sudut sekitar $28,55^\circ$ dan diidentifikasi sebagai fasa Si dengan bidang (111). Puncak ini menunjukkan keberadaan kristal silikon yang masih cukup dominan dalam struktur material setelah perlakuan panas dan pendinginan.

Puncak berikutnya yang memiliki intensitas tinggi berada pada sudut sekitar $38,60^\circ$ dan teridentifikasi sebagai fasa Al bidang (111). Puncak ini menunjukkan bahwa aluminium menjadi salah satu penyusun utama material dengan orientasi pertumbuhan kristal dominan pada bidang (111). Selain itu, puncak aluminium juga muncul pada sudut sekitar $44,85^\circ$ (200)

dan $65,29^\circ$ (202) yang menandakan adanya orientasi kristal lain pada fasa Al.

Pada rentang sudut menengah hingga tinggi juga terlihat beberapa puncak tambahan dari fasa silikon, yaitu pada $47,44^\circ$ bidang (202), $56,25^\circ$ bidang (131), $69,20^\circ$ bidang (040), dan $76,49^\circ$ bidang (313). Intensitas puncak-puncak tersebut lebih rendah dibandingkan puncak utama sehingga menunjukkan bahwa distribusi silikon dalam material tidak menjadi fasa dominan.

Puncak dengan intensitas tertinggi pada grafik berada di sekitar $78,52^\circ$ yang diidentifikasi sebagai fasa Al bidang (311). Tingginya intensitas puncak ini menunjukkan adanya orientasi preferensial atau dominasi pertumbuhan kristal aluminium pada bidang tersebut. Selain itu, masih terdeteksi puncak aluminium pada sudut $82,78^\circ$ bidang (222) dengan intensitas yang lebih rendah sebagai refleksi lanjutan dari struktur kristal aluminium.

Secara keseluruhan, pola XRD menunjukkan bahwa sampel memiliki struktur polikristalin dengan dominasi fasa aluminium (Al) dan keberadaan fasa silikon (Si) sebagai fasa sekunder. Munculnya beberapa bidang kristal yang berbeda menunjukkan bahwa proses quenching dan aging menggunakan media air memengaruhi orientasi pertumbuhan kristal dan menghasilkan distribusi fasa yang cukup merata pada material.

Tabel 7 Hasil Identifikasi Puncak Difraksi XRD Spesimen Quenching Media Air dan Artificial Aging

No	2θ ($^\circ$)	d ($\text{\AA}$)	I/I _o (Peak Height)	Counts (Peak Area)	FWHM ($^\circ$)	Indeks Miller	Fasa
1	28,43	$3,137_1$	433,95	355,46	0,0819	111	Si
2	28,50	$3,137_1$	216,97	177,73	0,0819	111	Si
3	38,60	$2,336_5$	291,42	358,07	0,1228	111	Al
4	44,86	$2,023_9$	104,60	247,27	0,2363	200	Al
5	47,42	$1,915_5$	191,41	376,80	0,1968	202	Si
6	56,23	$1,634_7$	102,87	294,94	0,2866	232	Si
7	65,21	$1,429_5$	115,09	329,97	0,2866	202	Al
8	65,40	$1,429_5$	57,55	164,98	0,2866	202	Al
9	69,14	$1,357_5$	8,57	45,64	0,2456	040	Si
10	69,34	$1,357_5$	9,29	22,82	0,2456	404	Si

11	76,37	1,246 0	38,89	63,72	0,1638	313	Si
12	76,59	1,243 0	19,45	31,86	0,1638	313	Si
13	78,38	1,219 1	1000,0 0	1638,2 7	0,1638	311	Al
14	78,61	1,219 1	500,00	819,14	0,1638	311	Al
15	82,57	1,167 4	21,63	53,14	0,2456	222	Al
16	82,82	1,167 4	10,81	26,57	0,2456	222	Al

Berdasarkan hasil identifikasi data X-Ray Diffraction (XRD) pada tabel, sampel menunjukkan keberadaan dua fasa utama yaitu aluminium (Al) dan silikon (Si) dengan beberapa orientasi bidang kristal yang berbeda. Identifikasi dilakukan berdasarkan nilai sudut difraksi (2θ), jarak antar bidang kristal (d -spacing), intensitas relatif (I/I_0), nilai *counts*, serta indeks Miller (hkl) yang muncul pada masing-masing puncak.

Fasa silikon (Si) teridentifikasi pada beberapa sudut difraksi yaitu sekitar $28,43^\circ$ – $28,50^\circ$, $47,42^\circ$, $56,23^\circ$, $69,14^\circ$ – $69,34^\circ$, dan $76,37^\circ$ – $76,59^\circ$. Puncak pada $28,43^\circ$ dengan bidang (111) memiliki intensitas relatif cukup tinggi ($I/I_0 = 433,95$) yang menunjukkan keberadaan kristal Si yang cukup dominan pada orientasi tersebut. Selain itu, Si juga teridentifikasi pada bidang (202), (232), (040), (404), dan (313) yang menunjukkan bahwa fasa silikon tersebar pada beberapa arah pertumbuhan kristal dan membentuk struktur yang tidak hanya terfokus pada satu orientasi.

Sementara itu, fasa aluminium (Al) muncul pada sudut difraksi $38,60^\circ$, $44,86^\circ$, $65,21^\circ$ – $65,40^\circ$, $78,38^\circ$ – $78,61^\circ$, dan $82,57^\circ$ – $82,82^\circ$. Puncak dengan intensitas tertinggi terletak pada sudut $78,38^\circ$ dengan nilai $I/I_0 = 1000$ dan *counts* sebesar 1638,27, yang diidentifikasi sebagai bidang (311) aluminium. Hal ini menunjukkan bahwa fasa Al merupakan fasa dominan dan memiliki orientasi kristal utama pada bidang (311). Selain itu, aluminium juga terdeteksi pada bidang (111), (200), (202), dan (222) sebagai refleksi tambahan dari struktur kristalnya.

Dari nilai FWHM yang diperoleh, terlihat rentang sekitar $0,0819$ – $0,2866^\circ$. Puncak dengan nilai FWHM yang lebih kecil mengindikasikan tingkat kristalinitas yang lebih baik dan ukuran kristalit yang cenderung lebih besar, sedangkan nilai FWHM yang lebih besar menunjukkan ukuran kristalit lebih kecil atau adanya regangan kisi. Secara keseluruhan, hasil analisis XRD menunjukkan bahwa sampel memiliki struktur polikristalin dengan dominasi fasa aluminium (Al), sedangkan silikon (Si) berperan sebagai fasa sekunder yang tetap terdistribusi pada beberapa orientasi bidang kristal.

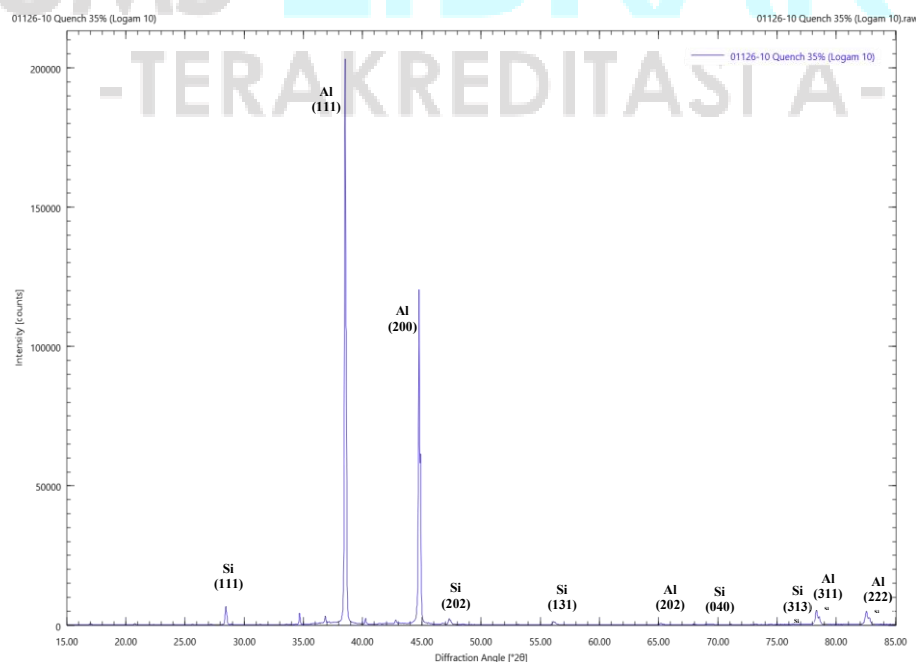
Tabel 8 Hasil Perhitungan Ukuran Kristalit Spesimen Quenching Media Air dan Artificial Aging

Fasa	Bidang (hkl)	2θ (°)	FWHM (°)	Ukuran Kristalit (nm)
Si	(111)	28,43	0,0819	100,45
Al	(111)	38,60	0,1228	68,56
Al	(200)	44,86	0,2363	36,18
Si	(202)	47,42	0,1968	43,71
Si	(232)	56,23	0,2866	30,85
Al	(202)	65,21	0,2866	31,75
Si	(040)	69,14	0,2456	37,61
Si	(313)	76,37	0,1638	60,68
Al	(311)	78,38	0,1638	61,14
Al	(222)	82,57	0,2456	41,62

Berdasarkan tabel ukuran kristalit, diperoleh ukuran kristalit pada rentang 30,85–100,45 nm yang menunjukkan adanya perbedaan pertumbuhan kristal pada setiap bidang kristal. Ukuran kristalit terbesar terdapat pada fasa Si bidang (111) sebesar 100,45 nm, yang menunjukkan tingkat kristalinitas lebih baik dan struktur kristal yang lebih berkembang. Sementara itu, ukuran kristalit terkecil terdapat pada fasa Si bidang (232) sebesar 30,85 nm, yang menunjukkan kristal yang lebih halus.

Secara umum, hasil ini menunjukkan bahwa sampel memiliki struktur polikristalin dengan ukuran kristalit yang bervariasi, serta adanya pengaruh orientasi bidang kristal terhadap pertumbuhan kristalit pada fasa aluminium dan silikon.

3.1.4 Quenching media CaCO₃ 35%



Gambar 17 Grafik X-Ray Diffraction dengan Quenching Media CaCO₃ 35%

Hasil pengujian X-Ray Diffraction (XRD) pada sampel aluminium silikon yang mengalami proses quenching menggunakan media CaCO_3 35% menunjukkan bahwa fasa utama yang teridentifikasi adalah aluminium (Al) dan silikon (Si). Puncak difraksi aluminium terdeteksi pada sudut 2θ sekitar 38° , 45° , 65° , 78° , dan 82° . Sementara itu, puncak silikon muncul pada sudut 2θ sekitar 28° , 47° , 55° , 69° , dan 77° .

Puncak difraksi tertinggi muncul pada sudut 2θ sekitar $38,5^\circ$ yang diidentifikasi sebagai bidang Al (111) dengan intensitas sekitar 205.000 counts. Intensitas yang sangat tinggi ini menunjukkan bahwa struktur material sangat didominasi oleh fasa aluminium (Al). Munculnya beberapa puncak aluminium lain seperti Al (202)/(220), Al (311), dan Al (222) mengonfirmasi bahwa aluminium tetap menjadi matriks utama dengan struktur kristal Face Centered Cubic (FCC), sehingga dapat disimpulkan bahwa proses quenching tidak menyebabkan perubahan struktur kristal dasar aluminium.

Sementara itu, puncak silikon seperti Si (111), Si (202), Si (131), Si (040), dan Si (313) muncul dengan intensitas yang jauh lebih kecil dibanding aluminium. Hal ini menunjukkan bahwa silikon hadir sebagai fasa sekunder yang terdistribusi di dalam matriks aluminium.

Selain itu, puncak-puncak difraksi yang relatif tajam dan sempit menunjukkan tingkat kristalinitas yang tinggi serta keteraturan susunan atom yang baik. Tidak terdeteksinya puncak fasa baru yang signifikan mengindikasikan bahwa proses quenching menggunakan media CaCO_3 35% tidak menghasilkan transformasi fasa yang berarti, melainkan lebih berpengaruh terhadap perubahan mikrostruktur dan distribusi presipitat pada material aluminium paduan tersebut.

Tabel 9 Hasil Identifikasi Puncak Difraksi XRD Spesimen Quenching Media Larutan CaCO_3 35%

No	2θ ($^\circ$)	d ($\text{\AA}$)	I/I ₀ (Peak Height)	Counts (Peak Area)	FWHM ($^\circ$)	Indeks Miller	Fasa
1	28.43	3.1371	29.69	709.02	0.0997	(111)	Si
2	28.50	3.1371	14.84	354.51	0.0997	(111)	Si
3	38.60	2.3365	500.00	9811.34	0.0819	(111)	Al
4	44.86	2.0239	249.11	4888.23	0.0819	(200)	Al
5	47.32	1.9194	11.23	341.68	0.1269	(202)	Si
6	47.45	1.9194	5.62	170.84	0.1269	(202)	Si
7	56.17	1.6363	5.08	348.78	0.2866	(131)	Si
8	56.32	1.6363	2.54	174.39	0.2866	(131)	Si

9	65.17	1.4303	2.51	147.47	0.2456	(202)	Al
10	65.35	1.4303	1.25	73.73	0.2456	(202)	Al
11	69.14	1.3575	0.89	80.16	0.3764	(040)	Si
12	69.34	1.3575	0.44	40.08	0.3764	(040)	Si
13	76.35	1.2463	1.22	59.80	0.2047	(313)	Si
14	76.57	1.2463	0.61	29.90	0.2047	(313)	Si
15	78.42	1.2186	17.05	1839.73	0.4503	(311)	Al
16	78.65	1.2186	8.52	919.86	0.4503	(311)	Al
17	82.61	1.1670	18.44	1990.32	0.4503	(222)	Al
18	82.86	1.1670	9.22	995.16	0.4503	(222)	Al

Berdasarkan hasil identifikasi puncak difraksi XRD pada Tabel, sampel hasil perlakuan quenching dengan media CaCO_3 35% menunjukkan keberadaan dua fasa utama, yaitu aluminium (Al) dan silikon (Si). Fasa aluminium teridentifikasi pada sudut difraksi 2θ sebesar $38,60^\circ$, $44,86^\circ$, $65,17^\circ$, $78,42^\circ$, dan $82,61^\circ$ yang masing-masing berkaitan dengan bidang kristal (111), (200), (202), (311), dan (222). Sementara itu, fasa silikon terdeteksi pada sudut 2θ sebesar $28,43^\circ$, $47,32^\circ$, $56,17^\circ$, $69,14^\circ$, dan $76,35^\circ$ yang berhubungan dengan bidang kristal (111), (202), (131), (040), dan (313). Kehadiran kedua fasa tersebut menunjukkan bahwa struktur material masih didominasi oleh sistem paduan Al-Si tanpa terbentuknya fasa baru yang signifikan setelah proses perlakuan panas dan quenching.

Puncak difraksi dengan intensitas tertinggi ditemukan pada fasa aluminium dengan bidang kristal Al (111) pada sudut 2θ sebesar $38,60^\circ$, yang memiliki nilai Peak Height sebesar 500,00 dan Peak Area sebesar 9811,34. Tingginya intensitas puncak ini menunjukkan bahwa fasa aluminium merupakan fasa dominan yang membentuk matriks utama material. Selain itu, puncak Al (200) pada sudut $44,86^\circ$ juga memiliki intensitas yang relatif tinggi dengan nilai Peak Height sebesar 249,11 dan Peak Area sebesar 4888,23, yang semakin menguatkan dominasi fasa aluminium dalam sampel.

Fasa silikon terdeteksi dengan intensitas yang lebih rendah dibandingkan aluminium. Puncak tertinggi silikon terdapat pada bidang Si (111) pada sudut 2θ sebesar $28,43^\circ$, dengan nilai Peak Height sebesar 29,69 dan Peak Area sebesar 709,02. Intensitas yang lebih kecil menunjukkan bahwa silikon berperan sebagai fasa sekunder yang terdistribusi di dalam matriks aluminium. Keberadaan beberapa puncak silikon lainnya pada bidang (202), (131), (040), dan (313) mengindikasikan bahwa silikon masih mempertahankan struktur kristalnya setelah perlakuan quenching.

Berdasarkan hasil identifikasi indeks Miller, bidang Al (111) merupakan orientasi kristal yang paling dominan pada sampel karena memiliki intensitas difraksi tertinggi. Fasa aluminium mempertahankan struktur FCC yang ditunjukkan oleh kemunculan bidang (111), (200), (202), (311), dan (222). Sementara itu, fasa silikon teridentifikasi melalui bidang (111), (202), (131), (040), dan (313). Dominasi bidang (111) pada kedua fasa menunjukkan tingkat keteraturan kristal yang tinggi serta menandakan bahwa struktur dasar paduan Al–Si tetap terjaga setelah proses quenching.

Berdasarkan hasil analisis nilai FWHM (Full Width at Half Maximum), puncak Al (111) pada sudut 2θ sebesar $38,60^\circ$ dan Al (200) pada $44,86^\circ$ memiliki nilai FWHM terkecil yaitu 0,0819, yang menunjukkan bahwa kedua bidang tersebut memiliki tingkat kristalinitas paling tinggi dan ukuran kristalit yang relatif lebih besar dibandingkan bidang lainnya. Sementara itu, puncak Si (111) memiliki nilai FWHM sebesar 0,0997, diikuti oleh Si (202) sebesar 0,1269, Si (313) sebesar 0,2047, Al (202) sebesar 0,2456, Si (131) sebesar 0,2866, dan Si (040) sebesar 0,3764. Nilai FWHM terbesar ditemukan pada bidang Al (311) dan Al (222), yaitu sebesar 0,4503, yang menunjukkan pelebaran puncak paling tinggi.

Secara keseluruhan, rentang nilai FWHM yang diperoleh berada pada 0,0819–0,4503, dengan mayoritas puncak utama aluminium memiliki nilai FWHM yang relatif kecil. Hal ini mengindikasikan bahwa fasa aluminium memiliki tingkat keteraturan kristal yang lebih baik dibandingkan fasa silikon. Dominasi puncak Al (111) yang memiliki intensitas tertinggi sekaligus nilai FWHM terkecil menunjukkan bahwa bidang tersebut merupakan orientasi kristal yang paling stabil dan dominan pada sampel hasil quenching 35%. Dengan demikian, perlakuan quenching yang dilakukan mampu mempertahankan struktur kristalin paduan Al–Si tanpa menyebabkan penurunan kristalinitas yang signifikan.

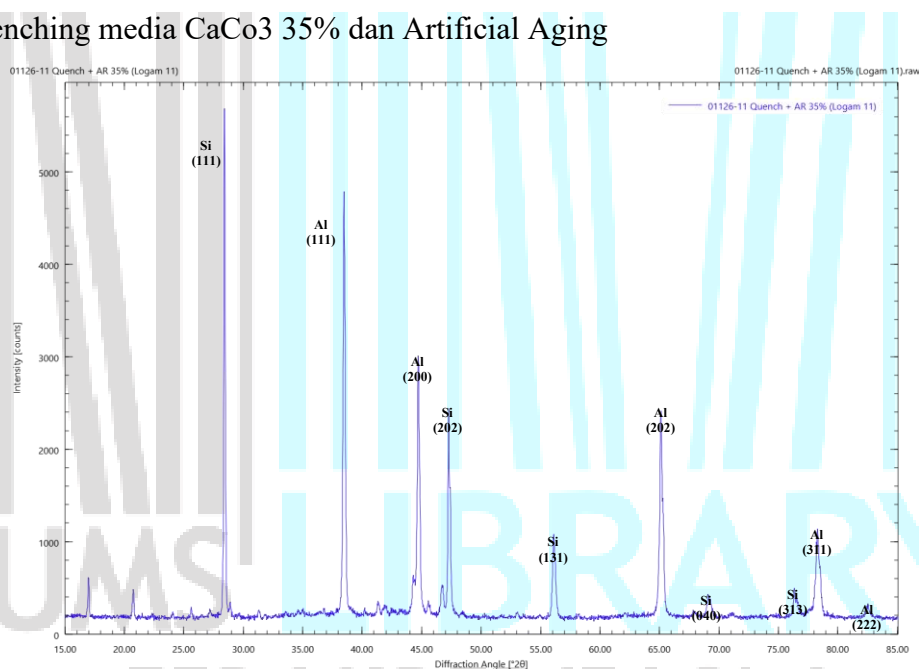
Tabel 10 Hasil Perhitungan Ukuran Kristalit Spesimen Quenching Media CaCO_3 35%

Fasa	Bidang (hkl)	2θ ($^\circ$)	FWHM ($^\circ$)	Ukuran Kristalit (nm)
Si	(111)	28,43	0,0997	82,20
Al	(111)	38,60	0,0819	102,54
Al	(200)	44,86	0,0819	104,95
Si	(202)	47,32	0,1269	67,70
Si	(131)	56,17	0,2866	32,19
Al	(202)	65,17	0,2456	37,96
Si	(040)	69,14	0,3764	24,76
Si	(313)	76,35	0,2047	46,81
Al	(311)	78,42	0,4503	21,44
Al	(222)	82,61	0,4503	22,45

Berdasarkan hasil perhitungan, ukuran kristalit sampel berada pada rentang 21,44–104,95 nm. Ukuran kristalit terbesar diperoleh pada fasa Al (200) sebesar 104,95 nm dan Al (111) sebesar 102,54 nm, yang menunjukkan bahwa fasa aluminium memiliki struktur kristal yang lebih teratur dan menjadi fasa dominan pada material. Pada fasa silikon, ukuran kristalit terbesar terdapat pada Si (111) sebesar 82,20 nm, sedangkan ukuran terkecil terdapat pada Si (040) sebesar 24,76 nm.

Secara umum, semakin kecil nilai FWHM maka ukuran kristalit semakin besar. Hasil ini menunjukkan bahwa sampel hasil quenching 35% masih memiliki struktur kristalin yang baik, dengan fasa aluminium (Al) memiliki ukuran kristalit yang cenderung lebih besar dibandingkan fasa silikon (Si)

3.1.5 Quenching media CaCo₃ 35% dan Artificial Aging



Gambar 18 Grafik X-Ray Diffraction dengan Quenching media CaCO₃ 35% dan Artificial Aging

Berdasarkan grafik X-Ray Diffraction (XRD) sampel aluminium silikon yang mengalami proses quenching menggunakan media pendingin CaCo₃ dan artificial aging, terlihat bahwa material tersusun atas dua fasa utama yaitu silikon (Si) dan aluminium (Al) yang ditunjukkan oleh munculnya beberapa puncak difraksi pada sudut 2θ tertentu. Puncak dengan intensitas tertinggi pada daerah sudut rendah muncul di sekitar 28,43° dan diidentifikasi sebagai fasa Si bidang (111). Tingginya intensitas puncak ini menunjukkan bahwa kristal silikon memiliki orientasi yang cukup dominan pada bidang tersebut.

Selain silikon, puncak kuat juga muncul pada sudut sekitar 38,60° yang diidentifikasi sebagai fasa Al bidang (111). Puncak ini menunjukkan bahwa aluminium merupakan salah satu

penyusun utama material dengan tingkat kristalinitas yang baik. Puncak aluminium berikutnya terdeteksi pada 44,86° bidang (200), 65,21° bidang (202), 78,38° bidang (311), dan 82,57° bidang (222) yang menunjukkan adanya beberapa orientasi pertumbuhan kristal aluminium.

Fasa silikon kembali muncul pada sudut 47,42° bidang (202), 56,23° bidang (131), 69,14° bidang (040), dan 76,37° bidang (313). Intensitas puncak-puncak tersebut lebih rendah dibandingkan puncak utama, sehingga menunjukkan bahwa orientasi kristal Si selain bidang (111) terbentuk dalam jumlah yang lebih sedikit.

Tabel 11 Hasil Identifikasi Puncak Difraksi XRD Spesimen Quenching Media Larutan CaCO₃ 35% dan Artificial Aging

No	2θ (°)	d (Å)	I/I ₀ (Peak Height)	Counts (Peak Area)	FWHM (°)	Indeks Miller	Fasa
1	28.46	3.1415	500.00	259.63	0.0819	(111)	Si
2	38.48	2.3377	791.06	742.57	0.1480	(111)	Al
3	38.58	2.3377	395.53	371.29	0.1480	(111)	Al
4	44.74	2.0291	151.02	117.63	0.1228	(200)	Al
5	47.34	1.9186	286.09	445.67	0.2456	(202)	Si
6	47.47	1.9186	143.05	222.84	0.2456	(202)	Si
7	56.14	1.6369	166.85	346.55	0.3275	(131)	Si
8	56.30	1.6369	83.42	173.27	0.3275	(131)	Si
9	65.17	1.4303	401.85	938.99	0.3685	(202)	Al
10	65.35	1.4303	200.92	469.49	0.3685	(202)	Al
11	69.14	1.3575	39.11	82.54	0.3328	(040)	Si
12	69.34	1.3575	19.55	41.27	0.3328	(040)	Si
13	76.33	1.2466	65.21	67.72	0.1638	(313)	Si
14	76.55	1.2466	32.61	33.86	0.1638	(313)	Si
15	78.31	1.2199	158.78	315.67	0.3135	(311)	Al
16	78.55	1.2199	79.39	157.84	0.3135	(311)	Al
17	82.51	1.1682	26.11	50.35	0.3041	(222)	Al
18	82.76	1.1682	13.06	25.18	0.3041	(222)	Al

Berdasarkan hasil identifikasi data X-Ray Diffraction (XRD) pada tabel, sampel menunjukkan keberadaan dua fasa utama yaitu aluminium (Al) dan silikon (Si) yang ditunjukkan oleh posisi puncak difraksi, nilai *d-spacing*, intensitas puncak (*peak height*), luas puncak (*peak area*), serta indeks Miller (hkl). Kedua fasa tersebut muncul pada beberapa orientasi kristal yang

menandakan material memiliki struktur kristal yang cukup kompleks.

Fasa silikon (Si) teridentifikasi pada sudut difraksi sekitar $28,46^\circ$, $47,34^\circ$ – $47,47^\circ$, $56,14^\circ$ – $56,30^\circ$, $69,14^\circ$ – $69,34^\circ$, dan $76,33^\circ$ – $76,55^\circ$ dengan bidang kristal (111), (202), (131), (040), dan (313). Puncak Si pada $28,46^\circ$ bidang (111) memiliki intensitas relatif tinggi (*peak height* = 500,00), yang menunjukkan bahwa orientasi tersebut cukup dominan pada fasa silikon. Puncak-puncak Si lainnya memiliki intensitas lebih rendah sehingga menunjukkan distribusi orientasi kristal yang lebih tersebar.

Fasa aluminium (Al) muncul pada sudut $38,48^\circ$ – $38,58^\circ$, $44,74^\circ$, $65,17^\circ$ – $65,35^\circ$, $78,31^\circ$ – $78,55^\circ$, dan $82,51^\circ$ – $82,76^\circ$ dengan bidang kristal (111), (200), (202), (311), dan (222). Puncak dengan intensitas tertinggi terdapat pada $38,48^\circ$ bidang (111) dengan *peak height* sebesar 791,06, yang menunjukkan bahwa aluminium merupakan fasa dominan dan memiliki orientasi utama pada bidang (111). Puncak Al juga muncul pada bidang lain sebagai refleksi tambahan dari struktur kristalnya.

Berdasarkan analisis indeks Miller, dapat disimpulkan bahwa sampel memiliki struktur polikristalin, ditunjukkan oleh munculnya banyak bidang kristal pada kedua fasa. Pada fasa Si, orientasi yang dominan adalah (111), sedangkan pada fasa Al orientasi dominan juga berada pada bidang (111) karena menghasilkan intensitas difraksi tertinggi. Keberadaan bidang lain seperti (200), (202), (131), (040), (313), dan (222) menunjukkan bahwa proses pembentukan dan perlakuan material menghasilkan variasi arah pertumbuhan kristal yang memengaruhi struktur mikro secara keseluruhan.

Nilai FWHM berada pada rentang $0,0819$ – $0,3685^\circ$. Puncak dengan FWHM lebih kecil menunjukkan kristalinitas yang lebih baik dan ukuran kristalit yang cenderung lebih besar, sedangkan FWHM yang lebih besar mengindikasikan ukuran kristalit yang lebih kecil atau adanya regangan kisi. Secara keseluruhan, hasil identifikasi menunjukkan bahwa sampel memiliki struktur polikristalin dengan dominasi fasa aluminium (Al), sementara silikon (Si) hadir sebagai fasa sekunder yang terdistribusi pada beberapa orientasi bidang kristal.

Tabel 12 Hasil Perhitungan Ukuran Kristalit Spesimen Quenching Media Larutan CaCO_3 35% dan Artificial Aging

Fasa	Bidang (hkl)	2θ ($^\circ$)	FWHM ($^\circ$)	Ukuran Kristalit (nm)
Si	(111)	28,46	0,0819	100,40
Al	(111)	38,48	0,1480	56,86
Al	(200)	44,74	0,1228	69,57
Si	(202)	47,34	0,2456	35,05
Si	(131)	56,14	0,3275	26,99
Al	(202)	65,17	0,3685	24,68

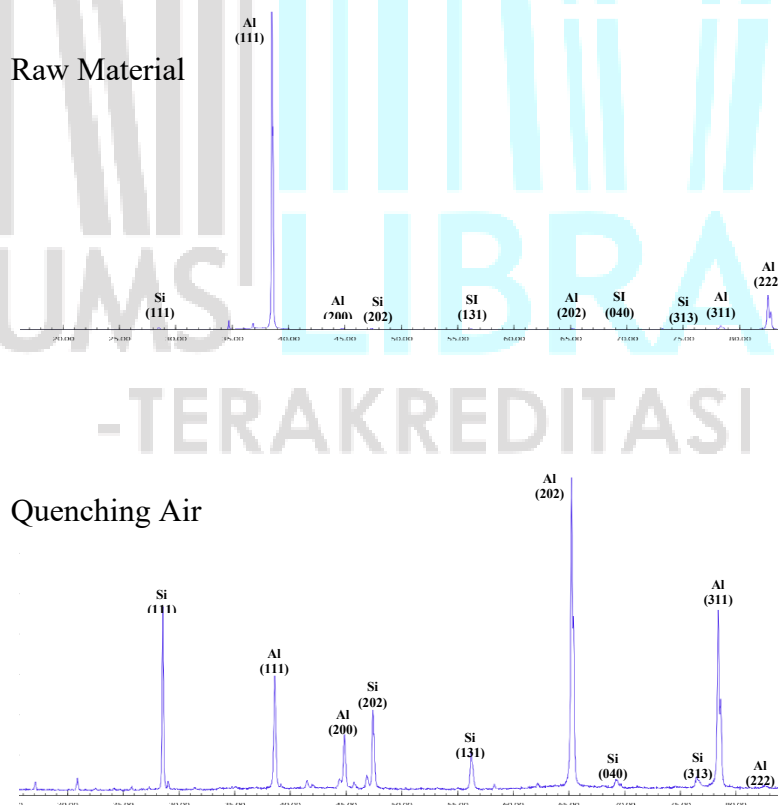
Si	(040)	69,14	0,3328	27,76
Si	(313)	76,33	0,1638	60,85
Al	(311)	78,31	0,3135	31,80
Al	(222)	82,51	0,3041	33,61

Berdasarkan pengukuran kristalit, diperoleh ukuran kristalit pada rentang 24,68–100,40 nm yang menunjukkan adanya perbedaan pertumbuhan kristal pada setiap bidang. Ukuran kristalit terbesar terdapat pada fasa Si bidang (111) sebesar 100,40 nm, yang menunjukkan kristalinitas lebih baik karena memiliki nilai FWHM lebih kecil sehingga puncak difraksi lebih tajam.

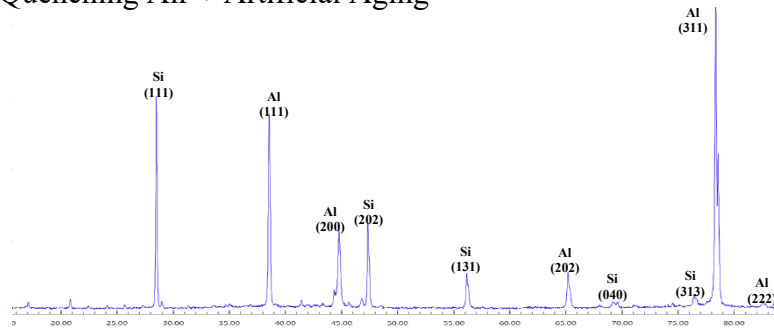
Sebaliknya, ukuran kristalit terkecil terdapat pada fasa Al bidang (202) sebesar 24,68 nm dengan nilai FWHM lebih besar, yang mengindikasikan ukuran kristal lebih kecil atau adanya regangan kisi.

Secara umum, hasil ini menunjukkan bahwa sampel memiliki struktur polikristalin dengan ukuran kristalit yang bervariasi, di mana fasa Si cenderung memiliki kristalit lebih besar dibanding beberapa orientasi pada fasa Al.

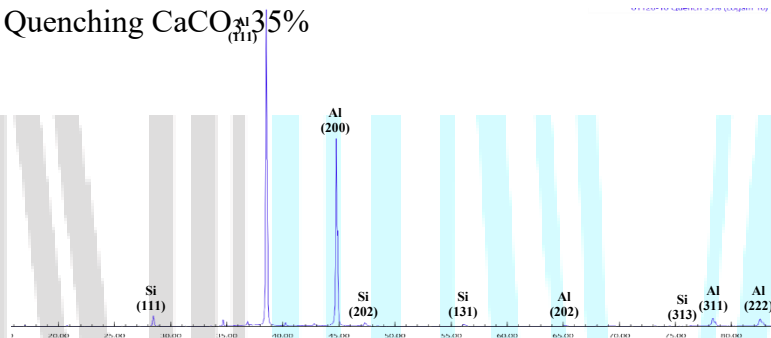
3.1.6 Perbandingan Grafik Pengujian XRD



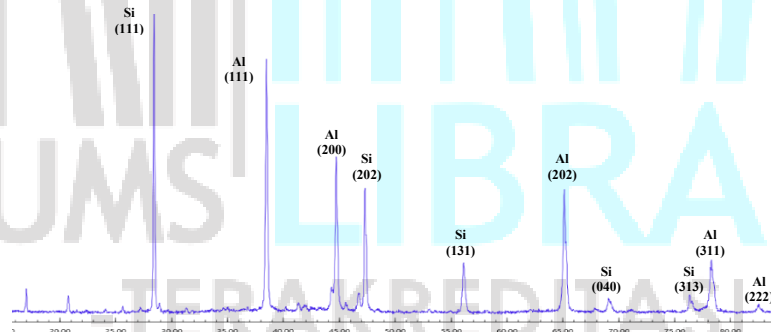
Quenching Air + Artificial Aging



Quenching CaCO_3 35%



Quenching CaCO_3 35% + Artificial Aging



3.2 Hasil dan Analisa Uji Kekerasan Mikrovikers

3.2.1 Hasil Uji Kekerasan media pendingin Air

Tabel 13 Hasil Uji Kekerasan media pendingin Air

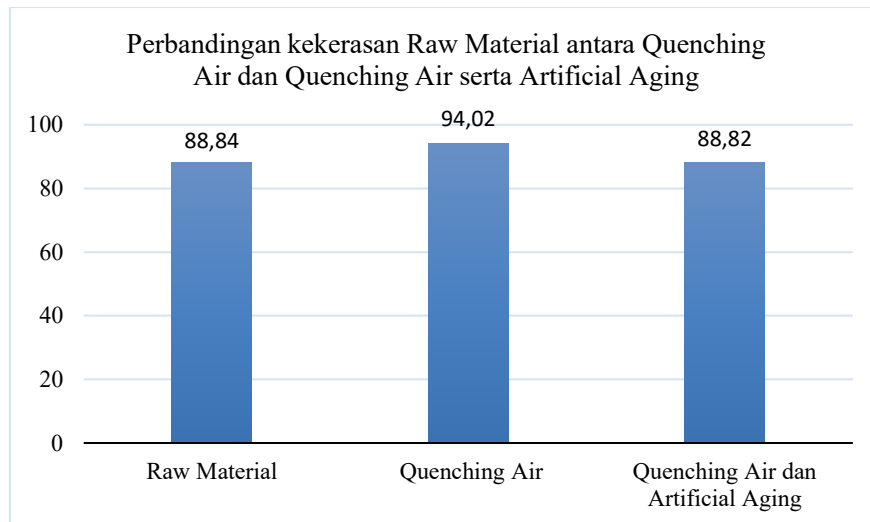
Hasil Uji Kekerasan media pendingin Air						
Sampel	Kekerasan HV (100 Kgf)					Rata Rata HV
	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4	Titik 5	
Raw Material	89,80	90,30	89,30	87,40	87,40	88,84
Quenching Air	95,50	91,30	94,40	95,30	93,60	94,02

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 %					

Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode Vickers dengan beban 100 Kgf pada lima titik pengukuran setiap sampel. Pada sampel *raw material*, diperoleh nilai rata-rata kekerasan sebesar 88,84 HV dengan distribusi antar titik yang relatif seragam, sehingga kondisi ini dijadikan acuan (*baseline*) dalam mengevaluasi pengaruh perlakuan panas selanjutnya.

Setelah proses *quenching* dengan media air, kekerasan meningkat menjadi rata-rata 94,02 HV atau naik sebesar 5,83% dibandingkan *raw material*. Peningkatan ini terjadi karena laju pendinginan yang sangat cepat menyebabkan atom silikon terperangkap di dalam matriks aluminium membentuk larutan padat lewat jenuh (*supersaturated solid solution*), yang mengakibatkan distorsi kisi kristal dan terhambatnya pergerakan dislokasi sehingga kekerasan meningkat secara signifikan.

Pada sampel yang mendapatkan perlakuan *quenching* dilanjutkan *artificial aging*, nilai kekerasan justru turun menjadi rata-rata 88,82 HV, hampir kembali ke nilai *raw material* dengan perubahan hanya sebesar -0,02%. Penurunan ini mengindikasikan terjadinya fenomena *over-aging*, di mana partikel presipitat telah tumbuh melampaui ukuran optimal akibat pemberian energi termal berlebih, sehingga mekanisme penguatan presipitasi tidak dapat bekerja secara efektif. Hasil ini menunjukkan perlunya evaluasi lebih lanjut terhadap parameter *artificial aging*, khususnya temperatur dan waktu tahan, agar material dapat mencapai kondisi *peak aging* yang optimal.



Gambar 19 Perbandingan kekerasan Raw Material antara Quenching Air dan Quenching Air serta Artificial Aging

3.2.2 Hasil Uji Kekerasan media pendingin larutan CaCO_3 35%

Tabel 14 Hasil Uji Kekerasan media pendingin larutan CaCO_3 35%

Hasil Uji Kekerasan media pendingin Air						
Sampel	Kekerasan HV (100 Kgf)					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 35%	112,40	114,80	111,50	113,50	110,90	112,62
Quenching CaCO_3 35% dan Artificial Aging	106,40	106,50	106,70	105,50	108,50	106,72
Presentase Perubahan kekerasan						
Quenching CaCO_3	+ 26,76 %					

Quenching	+ 20,12 %
Air dan	
Artificial	
Aging	

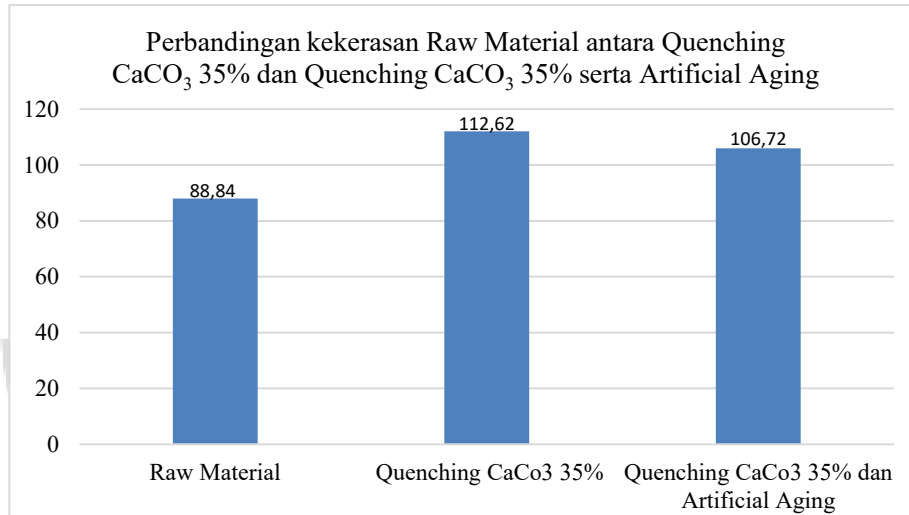
Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode Vickers dengan beban 100 Kgf pada lima titik pengukuran setiap sampel. Pada sampel *raw material*, diperoleh nilai rata-rata kekerasan sebesar 88,84 HV dengan distribusi antar titik yang relatif seragam, sehingga kondisi ini dijadikan acuan (*baseline*) dalam mengevaluasi pengaruh perlakuan panas menggunakan media pendingin larutan CaCO_3 35%.

Setelah proses *quenching* dengan media larutan CaCO_3 35%, kekerasan meningkat signifikan menjadi rata-rata 112,62 HV atau naik sebesar 26,76% dibandingkan *raw material*. Peningkatan yang jauh lebih besar dibandingkan media air ini disebabkan oleh kemampuan larutan CaCO_3 dalam menghasilkan laju pendinginan yang lebih intensif melalui efek *nucleate boiling* yang lebih agresif, sehingga atom silikon lebih banyak terperangkap di dalam matriks aluminium membentuk larutan padat lewat jenuh yang lebih jenuh. Kondisi ini menghasilkan distorsi kisi kristal yang lebih besar dan penghambatan pergerakan dislokasi yang lebih kuat, sehingga nilai kekerasan yang dicapai jauh lebih tinggi. Distribusi nilai antar titik juga cukup seragam berkisar antara 110,90 HV hingga 114,80 HV, menunjukkan pendinginan yang merata pada seluruh permukaan spesimen.

Pada sampel yang mendapatkan perlakuan *quenching* CaCO_3 35% dilanjutkan dengan *artificial aging*, nilai kekerasan turun menjadi rata-rata 106,72 HV, namun masih jauh di atas nilai *raw material* dengan persentase perubahan sebesar +20,12%. Penurunan kekerasan dari kondisi *quenching* saja sebesar 5,84 HV mengindikasikan adanya relaksasi tegangan kisi dan presipitasi fasa silikon selama proses aging, namun tidak separah yang terjadi pada media pendingin air. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun terjadi sedikit *over-aging*, mekanisme penguatan presipitasi masih cukup berperan karena kepadatan larutan padat lewat jenuh yang terbentuk setelah *quenching* CaCO_3 jauh lebih tinggi, sehingga masih menyisakan kontribusi penguatan yang signifikan setelah proses aging berlangsung. Distribusi nilai kekerasan antar titik pada kondisi ini sangat seragam berkisar antara 105,50 HV hingga 108,50 HV, mengindikasikan struktur mikro yang homogen setelah proses aging.

Secara keseluruhan, penggunaan media pendingin larutan CaCO_3 35% terbukti menghasilkan nilai kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan media air, baik pada kondisi *quenching* saja maupun setelah *artificial aging*. Hasil ini menunjukkan bahwa larutan CaCO_3 35% merupakan

media pendingin yang lebih efektif dalam meningkatkan kekerasan material aluminium silikon, dan perlakuan *artificial aging* setelahnya masih mampu mempertahankan peningkatan kekerasan yang substansial meskipun terjadi sedikit penurunan dari nilai puncak setelah *quenching*.



Gambar 20 Perbandingan kekerasan Raw Material antara Quenching CaCO₃ 35% dan Quenching CaCO₃ 35% serta Artificial Aging

4. PENUTUP

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan mengenai pengaruh komposisi media pendingin larutan CaCO₃ 35% terhadap kekerasan dan *X-Ray Diffraction* pada proses *quenching* dan *artificial aging* paduan aluminium silikon, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Proses *quenching* menggunakan media air menghasilkan perubahan orientasi kristal dominan dari bidang Al (111) pada *raw material* menjadi bidang Al (202) pada sudut $2\theta = 65,29^\circ$. Ukuran kristalit mengalami penurunan pada sebagian besar bidang kristal dibandingkan *raw material*, yang mengindikasikan adanya peningkatan tegangan kisi akibat proses pendinginan cepat dan terbentuknya larutan padat lewat jenuh di dalam matriks aluminium.
2. Perlakuan *quenching* air yang dilanjutkan dengan *artificial aging* menghasilkan pergeseran orientasi kristal dominan kembali ke bidang Al (311) pada sudut $2\theta = 78,38^\circ$. Ukuran kristalit Si (111) meningkat menjadi 100,45 nm yang mengindikasikan terjadinya pertumbuhan kristalit akibat proses difusi atom selama *aging*, serta mengindikasikan terjadinya fenomena *over-aging* pada kondisi perlakuan yang diterapkan.

3. Proses *quenching* menggunakan larutan CaCO_3 35% mempertahankan dominasi puncak difraksi pada bidang Al (111) dengan ukuran kristalit yang lebih besar dibandingkan *quenching* air, yaitu Al (111) sebesar 102,54 nm dan Al (200) sebesar 104,95 nm. Hal ini menunjukkan bahwa media CaCO_3 35% menghasilkan struktur kristal yang lebih teratur dan kristalinitas yang lebih baik dibandingkan media air.
4. Perlakuan *quenching* CaCO_3 35% yang dilanjutkan dengan *artificial aging* menunjukkan bahwa ukuran kristalit Si (111) tetap besar yaitu 100,40 nm, sedangkan fasa Al mengalami penurunan ukuran kristalit pada beberapa orientasi. Pola ini menunjukkan adanya redistribusi atom selama proses *aging* yang menghasilkan struktur mikro yang lebih beragam namun masih mempertahankan kestabilan fasa yang baik.
5. Hasil uji kekerasan menunjukkan bahwa penggunaan media pendingin larutan CaCO_3 35% menghasilkan peningkatan kekerasan yang jauh lebih signifikan dibandingkan media air. *Quenching* menggunakan air meningkatkan kekerasan sebesar 5,83% dari 88,84 HV menjadi 94,02 HV, sedangkan *quenching* menggunakan larutan CaCO_3 35% meningkatkan kekerasan sebesar 26,76% menjadi 112,62 HV. Setelah proses *artificial aging*, kekerasan pada sampel *quenching* air turun kembali mendekati nilai *raw material* menjadi 88,82 HV (-0,02%), sedangkan sampel *quenching* CaCO_3 35% masih mempertahankan kekerasan tinggi sebesar 106,72 HV (+20,12%). Hal ini membuktikan bahwa larutan CaCO_3 35% merupakan media pendingin yang lebih efektif dalam meningkatkan dan mempertahankan kekerasan paduan aluminium silikon.

DAFTAR PUSTAKA

- Aji, W., & Supriyanto, A. (2021). *STUDI EKSPERIMEN UJI KEKERASAN DAN FOTO MIKRO MATERIAL KOMPOSIT ALUMINIUM-SILIKON METODE METALURGI SERBUK*.
- Fatimah, S., Ragadhita, R., Husaeni, D. F. Al, & Nandiyanto, A. B. D. (2021). *How to Calculate Crystallite Size from X-Ray Diffraction (XRD) using Scherrer Method*. <https://doi.org/10.17509/ijost.v6ix>
- Gujar, A. (2025). *Hardness Testing of Metals: Techniques, Applications, and Insights into Material Properties*.
- Iloabachie, I. (2018). *Effect of Water Quenching Temperatures on the Hardness of Al-4.5%Cu*.
- Joseph, O. O., Olubambi, P. A., Joseph, O. O., Edun, B. M., Okeniyi, J. O., & Abioye, O. P. (2021). Effects of Alloying on Aluminium-Silicon Alloys – A Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1107(1), 012116. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1107/1/012116>
- Muas M, Anwar, & Rasyid, S. (2020). *ANALISIS KEKERASAN DAN STRUKTUR MIKRO ADC12 HASIL PENGECORAN SEMI SOLID DENGAN PRECIPITATION HARDENING*. Teknologi Pertahanan.

- Naafila, A., Purnowidodo, A., & Hadi Setyarini, P. (2024). *PENGARUH WAKTU SOLUTION TREATMENT DAN AGING TERHADAP KEKERASAN DAN KEKUATAN TARIK ALUMINIUM PADUAN AA 7075-T6*. 1–12. <https://doi.org/10.21776/jrm.v15i3.862>
- Novianti, Jasruddin, & Sujiono, E. H. (2015). *KARAKTERISASI KALSIUM KARBONAT (Ca(CO₃)) DARI BATU KAPUR KELURAHAN TELLU LIMPOE KECAMATAN SUPPA*.
- Nugroho, A. D., Junipitoyo, B., & Winiasri, L. (2020). *PENGARUH VARIASI SUHU DAN WAKTU HEAT TREATMENT ALUMINIUM ALLOY TERHADAP SIFAT KEKERASAN DAN STRUKTUR MIKRO DENGAN MEDIA PENDINGINAN OLI THE EFFECT OF TEMPERATURE AND TIME VARIATION HEAT TREATMENT OF ALUMINUM ALLOY TO THE HARDNESS AND MICROSTRUCTURE WITH OIL MEDIA QUENCHING*.
- Pratika, I. D., Rasyid, A. H. A., & Irfā'i, M. (2021). *Perbandingan Metode Sand Casting dengan Centrifugal Casting Terhadap Kekuatan Bending dan Porositas Al-Si PERBANDINGAN METODE SAND CASTING DENGAN METODE CENTRIFUGAL CASTING TERHADAP KEKUATAN BENDING DAN POROSITAS PADUAN ALUMINIUM SILIKON* Mochammad Arif Irfā'i.
- Shieddieque, A. D., Candra, A., Heryadi, Y., & Rosman. (2024). *PENGARUH VARIASI MEDIA QUENCHING TERHADAP KEKERASAN DAN STRUKTUR MIKRO MATERIAL PADUAN Al-Si-Cu-Fe*. *Turbo : Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 13(2). <https://doi.org/10.24127/trb.v13i2.3383>
- Suheni S, Firmansyah, D., & Ainur Rosidah, A. (2021). *Analisis Pengaruh Temperatur dan Waktu Tuang terhadap Kekerasan*.

UMS LIBRARY
-TERAKREDITASI A-