

**PENGARUH KOMPOSISI MEDIA PENDINGIN LARUTAN CaCO_3 25%
TERHADAP KEKERASAN DAN STRUKTUR MIKRO (*SCANNING
ELECTRON MICROSCOPY*) PADA PADUAN ALUMINIUM SILIKON YANG
TELAH MENGALAMI *SOLUTION TREATMENT* DAN *ARTIFICIAL AGING***

Annas Fathulloh; Masyrukan, S.T., M.T.

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

Abstrak

Paduan aluminium silikon (Al-Si) banyak digunakan pada industri otomotif dan manufaktur karena memiliki massa jenis rendah, ketahanan korosi yang baik, serta sifat mampu cor yang tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh media pendingin air dan larutan CaCO_3 25% terhadap kekerasan dan struktur mikro paduan aluminium silikon setelah proses *Solution Treatment* dan *artificial aging*. Spesimen diberi perlakuan *solution heat treatment* pada temperatur 580°C selama 20 menit, kemudian dilakukan *quenching* menggunakan media air dan larutan CaCO_3 25%, serta *artificial aging* pada temperatur 200°C selama 20 menit. Karakterisasi dilakukan melalui pengujian kekerasan mikro Vickers, *Scanning Electron Microscopy* (SEM), dan *Energy Dispersive X-Ray* (EDX). Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai kekerasan *raw material* sebesar 88,84 HV meningkat menjadi 94,02 HV setelah *quenching* menggunakan media air, sedangkan pada media CaCO_3 25% meningkat menjadi 89,32 HV. Setelah *artificial aging*, nilai kekerasan menjadi 88,82 HV pada media air dan 89,52 HV pada media CaCO_3 25%. Hasil SEM menunjukkan media air menghasilkan distribusi partikel yang lebih homogen dibandingkan media CaCO_3 25%, sedangkan hasil EDX menunjukkan aluminium dan silikon sebagai unsur dominan serta terdeteksinya unsur kalsium pada spesimen yang menggunakan media CaCO_3 25%. Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa media pendingin berpengaruh terhadap kekerasan dan struktur mikro paduan Aluminium Silikon, dengan media air menghasilkan nilai kekerasan tertinggi sebesar 94,02 HV.

Kata kunci: Aluminium Silikon (Al-Si), *Quenching*, *Artificial Aging*, CaCO_3 25%, Kekerasan, Struktur Mikro.

Abstract

Aluminium-silicon (Al-Si) alloys are widely used in the automotive and manufacturing industries due to their low density, good corrosion resistance, and high castability. This study aims to investigate the effect of water and a 25% CaCO_3 solution as *quenching* media on the hardness and microstructure of aluminium-silicon alloys after *Solution Treatment* and *artificial aging* processes. The specimens were subjected to *solution heat treatment* at 580°C for 20 minutes, followed by *quenching* using water and a 25% CaCO_3 solution, and then *artificial aging* at 200°C for 20 minutes. Characterization was carried out through Vickers microhardness testing, *Scanning Electron Microscopy* (SEM), and *Energy Dispersive X-Ray* (EDX) analysis. The results showed that the hardness value of the *raw material*, which was 88.84 HV, increased to 94.02 HV after *quenching* in water, while the hardness value increased to 89.32 HV when quenched in the 25% CaCO_3 solution. After *artificial aging*, the hardness values became 88.82 HV for the water-quenched specimen and 89.52 HV for the specimen quenched in the 25% CaCO_3 solution.

SEM observations revealed that the water *quenching* medium produced a more homogeneous particle distribution than the 25% CaCO_3 *solution*. EDX analysis indicated that aluminium and silicon were the dominant elements, while calcium was detected in the specimens quenched using the 25% CaCO_3 *solution*. Based on the results, it can be concluded that the *quenching* medium influences the hardness and microstructure of aluminium-silicon alloys, with water producing the highest hardness value of 94.02 HV.

Keywords: Aluminium-Silicon (Al-Si), Quenching, Artificial Aging, 25% CaCO_3 , Hardness, Microstructure.

1. PENDAHULUAN

Paduan aluminium silikon (Al-Si) merupakan salah satu material yang banyak digunakan pada industri otomotif, dirgantara, dan manufaktur karena memiliki sifat ringan, tahan korosi, serta mampu memiliki kekuatan mekanik yang baik. Selain itu, paduan Al-Si juga mempunyai kemampuan cor yang tinggi sehingga sering digunakan pada komponen seperti piston, velg, dan blok mesin. Akan tetapi, sifat mekanik paduan aluminium silikon masih dapat ditingkatkan melalui proses perlakuan panas (*heat treatment*), khususnya melalui proses *quenching* dan *artificial aging* (Arifin 2020).

Perlakuan panas pada paduan Al-Si umumnya dilakukan melalui tahapan *solution heat treatment*, *quenching*, dan *artificial aging*. Pada proses *solution heat treatment*, material dipanaskan hingga temperatur tertentu untuk melarutkan unsur paduan ke dalam matriks aluminium. Selanjutnya dilakukan proses *quenching* dengan media pendingin tertentu untuk memperoleh struktur mikro yang lebih halus dan meningkatkan kekerasan material. Setelah proses *quenching*, material mengalami *artificial aging* untuk membentuk presipitat yang dapat meningkatkan sifat mekanik, terutama kekerasan dan kekuatan material (Sultan dan Hamzah 2019).

pendingin pada proses *quenching* memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap laju pendinginan Media, pembentukan struktur mikro, dan sifat mekanik material. Perbedaan laju pendinginan dapat menyebabkan perubahan ukuran butir, distribusi presipitat, serta tingkat kekerasan pada paduan aluminium silikon. Media pendingin dengan laju pendinginan tinggi cenderung menghasilkan struktur mikro yang lebih halus sehingga meningkatkan kekerasan material. Sebaliknya, media pendingin dengan laju pendinginan lebih rendah dapat menghasilkan struktur mikro yang lebih kasar (Hanifi dan Dirja 2023).

Penggunaan larutan kalsium karbonat (CaCO_3) sebagai media pendingin menjadi salah satu alternatif yang menarik untuk diteliti karena kandungan mineral di dalam larutan dapat memengaruhi karakteristik perpindahan panas selama proses *quenching*. Konsentrasi larutan pendingin yang berbeda memungkinkan terjadinya variasi laju pendinginan sehingga dapat

menghasilkan perubahan pada struktur mikro dan nilai kekerasan paduan aluminium silikon. Struktur mikro hasil perlakuan panas dapat diamati menggunakan metode *Scanning Electron Microscopy* (SEM), yang mampu memberikan informasi detail mengenai morfologi permukaan, distribusi presipitat, dan ukuran butir material (Banhart dkk. 2010).

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa variasi media pendingin dan proses *artificial aging* berpengaruh terhadap sifat mekanik dan struktur mikro paduan Al-Si. Penelitian oleh Arifin (2020) menunjukkan bahwa media *quenching* berbeda menghasilkan perubahan nilai dampak dan struktur mikro pada velg berbahan Al-Si. Selain itu, Sultan dan Hamzah (2019) menyatakan bahwa perlakuan *solution treatment* dan *artificial aging* mampu meningkatkan kekerasan serta memperbaiki struktur mikro paduan aluminium A383 (Arifin 2020).

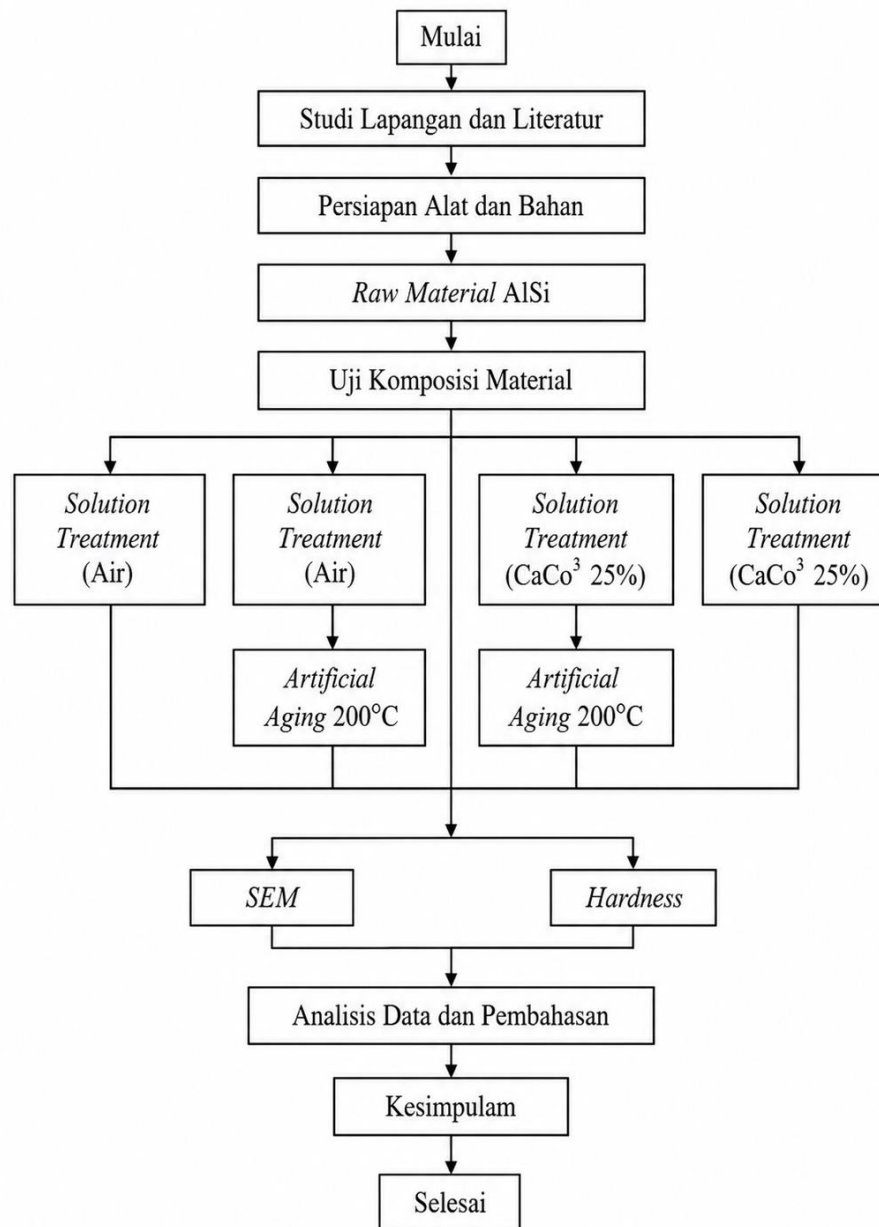
Berdasarkan penelitian terdahulu, sebagian besar penelitian masih menggunakan media pendingin berupa air, oli, dan larutan garam. Penelitian mengenai penggunaan larutan CaCO_3 sebagai media *quenching* pada paduan aluminium silikon masih sangat terbatas, khususnya yang dikombinasikan dengan proses *artificial aging*. Oleh karena itu diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui pengaruh media pendingin CaCO_3 25% terhadap perubahan struktur mikro dan kekerasan paduan Al-Si.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian mengenai pengaruh komposisi media pendingin larutan CaCO_3 25% terhadap kekerasan dan struktur mikro pada paduan aluminium silikon setelah mengalami proses *quenching* dan *artificial aging* perlu dilakukan. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai hubungan antara variasi media pendingin dengan perubahan struktur mikro dan nilai kekerasan sehingga dapat digunakan sebagai referensi dalam pengembangan proses perlakuan panas pada material aluminium silikon.

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 Penelitian

2.2.1 Bahan Penelitian

Barang-barang berikut digunakan untuk tujuan penelitian ini:

1. Spesimen uji paduan Aluminium Silikon (AlSi) dengan diameter 10 mm dan tinggi 20 mm.

Tabel 1 Komposisi Kimia Spesimen Uji Paduan Aluminium Silikon (AlSi)

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 25%).

2.2.2 Alat Penelitian

Alat – alat yang digunakan untuk menyiapkan dan menguji spesimen 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

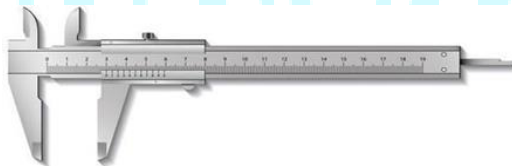
Ember berfungsi sebagai kontainer stabil untuk air, oli, atau cairan *quench* lainnya. Bahan ember harus tahan panas dan tidak gampang deformasi jika kontak dengan logam panas. Ember dalam proses *quench* adalah wadah yang digunakan untuk menampung media pendingin seperti air, oli, atau larutan tertentu. 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 secara manual untuk melakukan proses pengamplasan (*grinding*) dan pemolesan (*polishing*) pada permukaan sampel logam dalam rangka 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. *Scanning Electron Microscope (SEM)* dan *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX)*

SEM-EDX adalah kombinasi dari *Scanning Electron Microscope (SEM)* dan *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX)*. SEM digunakan untuk visualisasi morfologi permukaan sampel dengan pembesaran tinggi,

sedangkan EDX menganalisis unsur kimia berdasarkan emisi sinar-X dari permukaan material saat ditembak elektron. Kombinasi ini memberikan keunggulan dalam analisis struktur mikro dan identifikasi unsur kimia secara kuantitatif dan kualitatif, sehingga sangat penting dalam penelitian material, metalurgi, dan lingkungan.



Gambar 11 Alat Uji SEM EDX

11. 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 12 Alat Uji Kekerasan

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 25% 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 aluminium-silikon-magnesium. Instalasi terdiri atas:

1. Tungku Pemanas (*Furnace*)

Digunakan untuk memanaskan spesimen hingga suhu perlakuan tertentu sebelum dilakukan *quenching*. Suhu dipertahankan secara stabil hingga waktu penahanan (*holding time*) terpenuhi, yaitu suhu 580 °C selama 20 menit.

2. Wadah Media Pendingin Larutan CaCO₃ 25%

Wadah *quench* diisi dengan larutan CaCO₃ 25% yang telah dicampur dengan komposisi air 2 liter dan CaCO₃ 500 gram. Wadah ditempatkan dekat tungku untuk meminimalkan penurunan temperatur pada saat pemindahan spesimen panas.

3. 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 *Artificial Aging*

Setelah *quenching*, spesimen menjalani proses *artificial aging* untuk menginisiasi pembentukan presipitasi yang meningkatkan kekuatan material. Instalasi *aging* mencakup :

1. Tungku Pemanas (*Furnace*)

Diatur pada suhu *aging* 200°C, dengan kontrol suhu digital untuk menjamin kestabilan proses.

2. Rak Spesimen

Digunakan untuk menjaga posisi spesimen selama *aging* agar pemanasan merata di seluruh permukaan.

3. Sistem Pendinginan Udara

Setelah waktu *aging* tercapai, spesimen dikeluarkan dari tungku dan didinginkan pada suhu ruang.

2.3.3 Instalasi Proses Pengujian Kekerasan

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

1. Mesin Uji Kekerasan Mikro Vickers

Berfungsi memberikan beban penetrasi tertentu menggunakan *indentor* 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 *indentor*.

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).

2.3.4 Instalasi Proses Pengujian Struktur Mikro dengan *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

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

1. Mesin *Scanning Electron Microscope* (SEM)

Digunakan untuk memeriksa topografi dan karakteristik mikrostruktur dengan pembesaran tinggi.

2. Sistem Vakum dan *Elektron Beam*

Menghasilkan berkas elektron yang diarahkan ke permukaan sampel sehingga memunculkan citra mikro berdetail tinggi.

3. Meja Sampel (*Stage*)

Dapat bergerak pada sumbu X, Y, dan Z sehingga area pengamatan dapat diposisikan secara presisi.

4. Komputer dan Perangkat Lunak Citra SEM

Berfungsi untuk pengambilan gambar, penyimpanan citra, anotasi struktur, dan pengolahan data mikrostruktur.

2.4 Sampel

Sampel spesimen yang digunakan dalam penelitian ini yaitu :

1. Aluminium Silikon (AlSi)

Aluminium Silikon yang digunakan sebagai spesimen uji dalam proses penelitian ini. Ukuran spesimen untuk penelitian ini adalah $\varnothing = 10$ mm dan $T = 20$ mm. Spesimen aluminium silikon dapat dilihat pada gambar 3.14:



Gambar 13 Sampel Aluminium Silikon (AlSi)

2. Kalsium Karbonat (CaCO_3 25%)

Kalsium karbonat (CaCO_3 25%) 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.

2.5 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. 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 dilakuka mulai dengan menyiapkan peralatan *Quenching*, *specimen*, dan karbon didekoratif. Adapun yang dibutuhkan diantaranya:

1. 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 2 buah sebagai wadah pendinginan cepat (*Quenching*)
5. *Timer* digunakan untuk menghitung lama waktu proses *Quenching* dan *Artificial Aging*.

2.6.2 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* 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 *Heat Treatment*

Berikut merupakan tahapan yang dilakukan dalam proses *heat treatment*, 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 dan larutan CaCO_3 .

2.6.4 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).
3. Setelah temperatur spesimen turun hingga mencapai kondisi aman, spesimen dibersihkan dari residu media pendingin.

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 Proses Preparasi Spesimen

Proses preparasi sampel dilakukan agar spesimen memiliki permukaan yang representatif dan siap dianalisis baik secara mikroskopis maupun mekanis. Berikut tahapan lengkapnya :

1. Spesimen dipotong menggunakan mesin pemotong metallografi untuk mendapatkan ukuran sampel yang sesuai dengan kebutuhan pengujian.
2. Setelah pemotongan, spesimen dicuci menggunakan air atau alkohol untuk menghilangkan serpihan logam, minyak, atau kotoran.
3. Pengamplasan dilakukan secara bertahap menggunakan kertas amplas dengan tingkat kekasaran (*grit*) meningkat 240, 400, 600, 800, 1000,
4. hingga 2000 grit.
5. spesimen dipoles menggunakan mesin *polishing* dengan kain bludru atau kain khusus poles.
6. Spesimen dibersihkan menggunakan alkohol atau air deionisasi untuk menghilangkan sisa abrasif yang menempel.
7. sampel selanjutnya melalui proses *etching* dengan larutan kimia tertentu (*Keller's reagent* untuk aluminium).

2.6.7 Pengujian SEM

Pengujian SEM dilakukan untuk mengamati karakteristik internal material, Berikut adalah tahapan lengkapnya:

1. Sampel yang telah melalui proses *cutting*, *grinding*, *polishing*, dan *etching* disiapkan sebagai spesimen uji.
2. Sampel ditempatkan pada meja mikroskop metalografi dengan posisi permukaan terpolish menghadap lensa objektif.
3. Mikroskop disetel menggunakan mode cahaya terpantul (*reflected light*), yang umum digunakan untuk logam.
4. Spesimen kemudian ditempatkan tepat di bawah lensa objektif mikroskop. Selanjutnya, bidang pengamatan dipusatkan pada area yang diinginkan dengan mengatur posisi spesimen pada sumbu X dan Y hingga diperoleh citra yang tajam dan jelas untuk mengamati struktur mikro.
5. Melakukan Pengamatan.
6. Gambar struktur mikro diambil menggunakan kamera digital yang terpasang pada mikroskop.
7. Mematikan Lampu mikroskop.

2.6.8 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* sesuai metode yang digunakan Mikro Vickers.
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.

2.7 Rancangan Analisis Data

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

2.7.1 Rancangan Analisis Uji *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

Pengamatan struktur mikro dilakukan menggunakan perangkat *Scanning Electron Microscope* (SEM) tipe E30. Pemeriksaan ini bertujuan untuk mengevaluasi kondisi mikrostruktur pada permukaan material setelah mengalami proses karburisasi dengan media kromium hias dan arang kapuk. Data yang diperoleh dari pengujian mikrostruktur tersebut memberikan representasi topografi permukaan dan karakteristik mikrostruktur spesimen dengan tingkat pembesaran tinggi, sehingga memungkinkan identifikasi fitur mikroskopis yang terbentuk akibat perlakuan yang diberikan.

2.7.2 Rancangan Analisis uji Kekerasan Metode Mikro Vickers

Pengujian kekerasan pada material paduan aluminium-silikon dilakukan menggunakan alat uji kekerasan tipe Mikro 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:

$$HV = \frac{1.854 \times F}{d^2} \quad (1)$$

Dimana,

HV = Kekerasan Vickers (Kgf/mm²)

F = Beban uji (Kgf)

d = Rata rata diagonal indentasi (mm)

Hasil pengujian kekerasan secara lengkap disajikan pada Tabel 2

Tabel 2 Data uji kekerasan

Hasil Uji Kekerasan						
Sampel	Kekerasan HV (100 gf)					Rata Rata HV
	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4	Titik 5	
<i>Raw Material</i>						
<i>Quenching</i>						
<i>Quenching dan Artificial Aging</i>						
Presentase Perubahan kekerasan						
<i>Quenching</i>						
<i>Quenching dan Artificial Aging</i>						

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

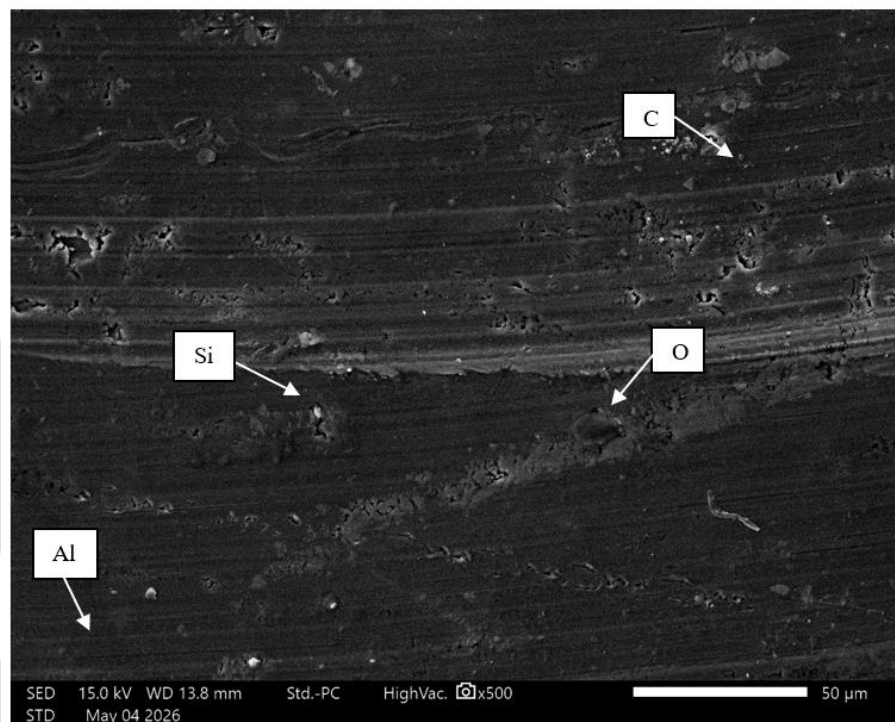
3.1 Hasil dan Analisa Uji SEM-EDX (*Scanning Electron Microscopy - Energy Dispersive X-Ray*)

SEM *Scanning Electron Microscopy* (SEM) merupakan teknik karakterisasi material yang digunakan untuk mengamati morfologi dan struktur mikro permukaan suatu material dengan menggunakan berkas elektron berenergi tinggi. Ketika berkas elektron diarahkan ke permukaan sampel, terjadi interaksi antara elektron dan atom penyusun material yang menghasilkan berbagai sinyal untuk membentuk citra dengan resolusi tinggi. Melalui pengujian SEM, dapat diperoleh informasi mengenai bentuk permukaan, ukuran dan distribusi butir, porositas, retakan, serta perubahan struktur mikro yang terjadi akibat proses manufaktur atau perlakuan panas. Oleh karena itu, SEM banyak digunakan untuk menganalisis hubungan antara struktur mikro material dengan sifat mekanik yang dihasilkan.

Energy Dispersive X-Ray (EDX) merupakan teknik analisis yang umumnya terintegrasi dengan SEM dan digunakan untuk mengidentifikasi serta menentukan komposisi unsur kimia yang terdapat dalam suatu material. Prinsip kerja EDX didasarkan pada deteksi sinar-X karakteristik yang dipancarkan oleh atom-atom dalam sampel setelah terkena tumbukan elektron berenergi tinggi. Setiap unsur memiliki energi sinar-X yang khas sehingga dapat dikenali dan dihitung kandungannya dalam bentuk persentase massa (*weight percent*) maupun persentase atom

(*atomic percent*). Dengan menggunakan EDX, peneliti dapat mengetahui unsur-unsur penyusun material, distribusi unsur pada permukaan sampel, serta perubahan komposisi yang terjadi akibat perlakuan tertentu. Kombinasi SEM dan EDX memberikan informasi yang komprehensif mengenai karakteristik mikrostruktur dan komposisi kimia material sehingga sangat penting dalam penelitian dan pengembangan material teknik.

3.1.1 Raw Material



Gambar 14 Struktur Mikro *Raw Material*

Hasil pengamatan struktur mikro menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) pada spesimen *raw material* paduan Aluminium Silikon (Al-Si) ditunjukkan pada Gambar 4.1. Pengamatan dilakukan pada pembesaran 500× untuk mengidentifikasi morfologi permukaan, distribusi partikel silikon, kondisi matriks aluminium, serta keberadaan porositas sebelum spesimen diberikan perlakuan panas.

Berdasarkan hasil pengamatan SEM, struktur mikro spesimen masih didominasi oleh matriks α -Al (alpha aluminium) sebagai fase utama penyusun material. Matriks aluminium tampak tersebar merata sebagai fase kontinu yang mengikat partikel-partikel silikon eutektik. Dominasi matriks α -Al merupakan karakteristik umum paduan Aluminium Silikon pada kondisi *as-cast*, yaitu kondisi material sebelum mengalami proses *solution heat treatment*. Pada kondisi ini distribusi unsur paduan masih dipengaruhi oleh proses solidifikasi selama pengecoran sehingga belum terjadi homogenisasi unsur secara menyeluruh. Kondisi tersebut sesuai dengan karakteristik mikrostruktur paduan Al-Si yang dijelaskan oleh Davis (1993) dan

ASM International (2018), yang menyatakan bahwa paduan Al-Si hasil pengecoran umumnya masih menunjukkan distribusi silikon eutektik yang belum homogen sebelum diberikan perlakuan panas (Davis 1993; ASM International 2018).

Selain matriks aluminium, terlihat partikel-partikel silikon (Si) yang tersebar pada beberapa area pengamatan. Berdasarkan morfologi yang terlihat pada citra SEM, silikon eutektik masih cenderung berbentuk memanjang dan tidak terdistribusi secara seragam pada seluruh matriks. Distribusi yang belum homogen ini menunjukkan bahwa spesimen belum mengalami proses *solution heat treatment* yang berfungsi melarutkan sebagian unsur paduan ke dalam matriks aluminium sehingga menghasilkan struktur yang lebih homogen. Kondisi tersebut menyebabkan hambatan terhadap pergerakan dislokasi masih relatif rendah sehingga berpengaruh terhadap sifat mekanik material, khususnya nilai kekerasan.

Pada beberapa area pengamatan juga terlihat adanya rongga atau cekungan kecil yang diindikasikan sebagai porositas. Berdasarkan bentuk dan penyebarannya, porositas tersebut diduga merupakan gas *porosity* atau *shrinkage porosity* yang umum dijumpai pada paduan aluminium hasil pengecoran. Gas *porosity* terbentuk akibat gas yang terperangkap selama proses pembekuan logam cair, sedangkan *shrinkage porosity* terjadi akibat penyusutan volume logam selama proses solidifikasi. Keberadaan porositas dapat menjadi titik konsentrasi tegangan sehingga berpotensi menurunkan sifat mekanik material apabila jumlah dan ukurannya cukup besar (Campbell 2015).

Hasil pengamatan SEM juga memperlihatkan adanya garis-garis halus pada permukaan spesimen yang berasal dari proses preparasi metalografi, khususnya proses *grinding* dan *polishing* sebelum pengujian SEM dilakukan. Oleh karena itu, garis-garis tersebut tidak diinterpretasikan sebagai bagian dari struktur mikro material, melainkan sebagai bekas preparasi permukaan.

Secara metalurgi, struktur mikro *raw material* menunjukkan bahwa material masih berada pada kondisi *as-cast* sehingga belum mengalami perubahan mikrostruktur akibat perlakuan panas. Pada kondisi ini belum terbentuk *supersaturated solid solution* karena proses *solution heat treatment* belum dilakukan. Akibatnya distribusi unsur paduan masih belum homogen dan kemampuan material dalam menghambat pergerakan dislokasi masih relatif rendah. Kondisi tersebut berkorelasi dengan hasil pengujian kekerasan yang menunjukkan bahwa *raw material* memiliki nilai kekerasan sebesar 88,84 HV, yaitu nilai terendah dibandingkan spesimen yang telah mengalami proses *quenching*.

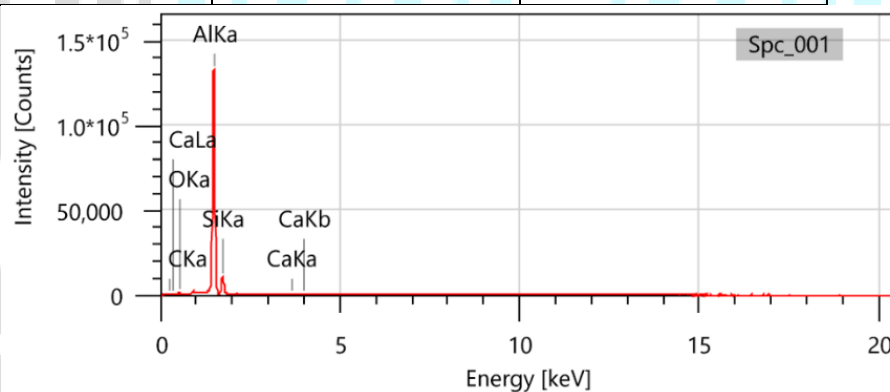
Secara keseluruhan, hasil pengamatan SEM menunjukkan bahwa struktur mikro *raw material* masih merepresentasikan karakteristik awal paduan Aluminium Silikon hasil pengecoran, yaitu

didominasi oleh matriks α -Al dengan distribusi silikon eutektik yang belum homogen serta masih ditemukannya porositas pada beberapa area pengamatan. Struktur mikro ini menjadi kondisi acuan dalam mengevaluasi perubahan yang terjadi setelah proses *solution heat treatment*, *quenching*, dan *artificial aging* pada spesimen penelitian.

3.1.2 Hasil Analisis EDX *Raw Material*

Tabel 3 Hasil Uji Komposisi *Raw Material*

Elemen	Massa %	Atom %
C	13.82 ± 0.33	26.34 ± 0.63
O	1.70 ± 0.07	2.43 ± 0.10
Al	71.55 ± 0.23	60.69 ± 0.19
Si	12.93 ± 0.15	10.54 ± 0.12
Ca	-	-
Total	100.00	100.00



Gambar 15 Analisis EDX *Raw Material*

Hasil analisis komposisi unsur menggunakan *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDX) pada spesimen *raw material* ditunjukkan pada Tabel 4.1 dan Gambar 4.2. Analisis EDX dilakukan untuk mengidentifikasi unsur-unsur yang terdeteksi pada area permukaan spesimen sebelum diberikan perlakuan panas. Data ini digunakan sebagai kondisi awal (*baseline*) untuk membandingkan perubahan komposisi permukaan setelah proses *solution heat treatment*, *quenching*, dan *artificial aging*.

Berdasarkan hasil analisis EDX, unsur aluminium (Al) merupakan unsur yang memiliki persentase tertinggi, yaitu sebesar 71,55 Massa (%) dan 60,69 Atom (%). Dominasi aluminium menunjukkan bahwa material yang digunakan merupakan paduan berbasis aluminium dengan matriks α -Al sebagai fase utama penyusun material. Tingginya persentase aluminium yang terdeteksi pada permukaan sejalan dengan hasil pengamatan SEM yang menunjukkan bahwa struktur mikro *raw material* masih didominasi oleh matriks aluminium. Kondisi ini sesuai

dengan karakteristik umum paduan Aluminium Silikon hasil pengecoran yang belum mengalami perlakuan panas (Davis 1993; ASM International 2018).

Unsur silikon (Si) terdeteksi sebesar 12,93 Massa (%) dan 10,54 Atom (%). Keberadaan silikon merupakan ciri khas paduan Aluminium Silikon yang berperan dalam meningkatkan kemampuan cor, ketahanan aus, serta sifat mekanik material. Pada kondisi *raw material*, distribusi silikon yang belum homogen menunjukkan bahwa unsur tersebut masih berada pada kondisi hasil pengecoran (*as-cast*) dan belum mengalami proses homogenisasi akibat *solution heat treatment*. Oleh karena itu, distribusi silikon yang belum merata diduga menjadi salah satu penyebab nilai kekerasan *raw material* masih relatif rendah dibandingkan spesimen yang telah mengalami proses *quenching*.

Selain aluminium dan silikon, analisis EDX juga mendeteksi unsur oksigen (O) sebesar 1,70 Massa (%) dan 2,43 Atom (%). Keberadaan oksigen pada permukaan spesimen diduga berkaitan dengan terbentuknya lapisan oksida alami (Al_2O_3) akibat reaksi aluminium dengan udara selama proses preparasi maupun penyimpanan spesimen sebelum pengujian dilakukan. Lapisan oksida tersebut merupakan fenomena yang umum terjadi pada material berbasis aluminium dan berfungsi meningkatkan ketahanan korosi permukaan (ASM International 2018).

Hasil EDX juga menunjukkan keberadaan unsur karbon (C) sebesar 13,82 Massa (%) dan 26,34 Atom (%). Persentase karbon yang relatif tinggi tidak diinterpretasikan sebagai komposisi utama paduan Aluminium Silikon karena secara metalurgi kandungan karbon pada paduan cor Al-Si umumnya sangat rendah. Tingginya persentase karbon yang terdeteksi diduga berasal dari *carbon tape*, residu proses *grinding* dan *polishing*, *coating*, maupun kontaminasi permukaan selama preparasi spesimen atau proses pengujian SEM-EDX. Oleh karena itu, unsur karbon tidak digunakan sebagai dasar dalam mengevaluasi perubahan komposisi paduan selama penelitian (Goldstein dkk. 2018).

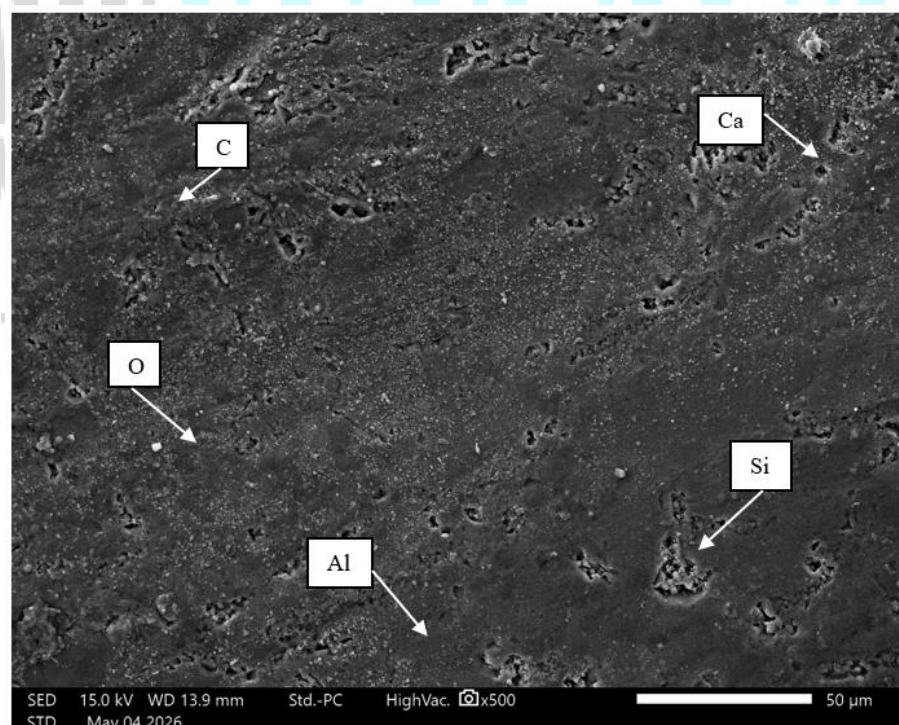
Perlu diperhatikan bahwa hasil EDX merupakan analisis komposisi unsur pada area permukaan spesimen, sehingga persentase unsur yang diperoleh tidak dapat diinterpretasikan sebagai komposisi keseluruhan material. Dengan demikian, perubahan persentase unsur yang akan dibahas pada spesimen setelah perlakuan panas menggambarkan perubahan unsur yang terdeteksi pada permukaan material, bukan perubahan komposisi kimia paduan secara keseluruhan. Interpretasi ini penting agar hasil analisis EDX tidak menimbulkan kesimpulan yang kurang tepat mengenai perubahan komposisi material (Goldstein dkk. 2018).

Apabila hasil SEM dan EDX dianalisis secara bersamaan, terlihat bahwa dominasi unsur aluminium pada hasil EDX sesuai dengan struktur mikro yang didominasi oleh matriks α -Al

pada citra SEM. Sementara itu, keberadaan silikon pada hasil EDX mendukung hasil pengamatan SEM yang menunjukkan adanya partikel silikon eutektik yang masih tersebar tidak merata pada kondisi *raw material*. Struktur mikro yang belum homogen tersebut berkorelasi dengan hasil pengujian kekerasan yang menunjukkan nilai kekerasan sebesar 88,84 HV, sehingga dapat disimpulkan bahwa kondisi awal material masih memiliki hambatan terhadap pergerakan dislokasi yang relatif rendah karena belum mengalami proses *solution heat treatment* maupun *quenching*.

Secara keseluruhan, hasil analisis EDX menunjukkan bahwa komposisi unsur yang terdeteksi pada permukaan *raw material* masih didominasi oleh aluminium dan silikon sebagai unsur utama penyusun paduan Aluminium Silikon. Keberadaan oksigen dihubungkan dengan pembentukan lapisan oksida alami, sedangkan tingginya kandungan karbon diinterpretasikan sebagai kontaminasi permukaan selama preparasi atau pengujian. Kombinasi hasil EDX, SEM, dan pengujian kekerasan menunjukkan bahwa spesimen masih berada pada kondisi awal (*as-cast*) sehingga menjadi acuan dalam mengevaluasi perubahan struktur mikro, komposisi permukaan, dan sifat mekanik setelah proses *solution heat treatment*, *quenching*, dan *artificial aging*.

3.1.3 Quenching Air



Gambar 16 Struktur mikro *Quenching* Media Air

Hasil pengamatan struktur mikro menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) pada spesimen yang telah mengalami *solution heat treatment* pada temperatur 580°C selama 20

menit kemudian dilakukan *quenching* menggunakan media air ditunjukkan pada Gambar 4.3. Pengamatan dilakukan dengan pembesaran 500× untuk mengidentifikasi perubahan morfologi permukaan, distribusi partikel silikon, kondisi matriks aluminium, serta perubahan struktur mikro akibat proses pendinginan cepat.

Berdasarkan hasil pengamatan SEM, struktur mikro spesimen masih didominasi oleh matriks α -Al (alpha aluminium) sebagai fase utama penyusun material. Akan tetapi, apabila dibandingkan dengan kondisi *raw material*, distribusi partikel silikon tampak lebih homogen pada seluruh area pengamatan. Homogenitas tersebut mengindikasikan bahwa proses *solution heat treatment* telah berhasil melarutkan sebagian unsur paduan ke dalam matriks aluminium sebelum proses pendinginan dilakukan. Setelah dilakukan *quenching* menggunakan media air, kondisi hasil homogenisasi tersebut dapat dipertahankan karena laju pendinginan yang tinggi menghambat proses difusi atom selama pendinginan (ASM International 2018).

Secara metalurgi, proses *solution heat treatment* bertujuan melarutkan unsur-unsur paduan yang sebelumnya berada pada batas butir atau fase kedua ke dalam matriks aluminium sehingga menghasilkan struktur yang lebih homogen. Ketika spesimen didinginkan secara cepat menggunakan media air, atom-atom unsur paduan tidak memiliki waktu yang cukup untuk berdifusi kembali sehingga terbentuk kondisi *supersaturated solid solution*. Kondisi tersebut merupakan tahap awal yang penting pada proses *precipitation hardening*, karena menjadi dasar terbentuknya presipitat selama proses *artificial aging* (Davis 1993; Totten 2016).

Distribusi partikel silikon yang tampak lebih merata dibandingkan *raw material* menunjukkan bahwa pendinginan cepat menggunakan media air berhasil mempertahankan kondisi homogen hasil *solution heat treatment*. Homogenitas struktur tersebut menyebabkan hambatan terhadap pergerakan dislokasi meningkat sehingga berkontribusi terhadap peningkatan nilai kekerasan material. Hasil ini sesuai dengan pengujian kekerasan yang menunjukkan bahwa spesimen *quenching* menggunakan media air memiliki nilai kekerasan sebesar 94,02 HV, lebih tinggi dibandingkan *raw material* yang hanya memiliki nilai kekerasan sebesar 88,84 HV.

Pada beberapa area pengamatan masih terlihat adanya porositas yang diduga merupakan gas *porosity* maupun *shrinkage porosity* yang berasal dari proses pengecoran material. Keberadaan porositas tersebut tidak menunjukkan perubahan yang signifikan setelah proses *solution heat treatment* dan *quenching*. Hal ini disebabkan perlakuan panas tidak menghilangkan porositas yang telah terbentuk selama proses pengecoran, melainkan lebih berpengaruh terhadap perubahan distribusi unsur paduan dan homogenitas struktur mikro (Campbell 2015).

Selain itu, morfologi silikon eutektik masih tampak pada struktur mikro, namun distribusinya menjadi lebih seragam dibandingkan kondisi awal material. Pada pembesaran 500×, perubahan

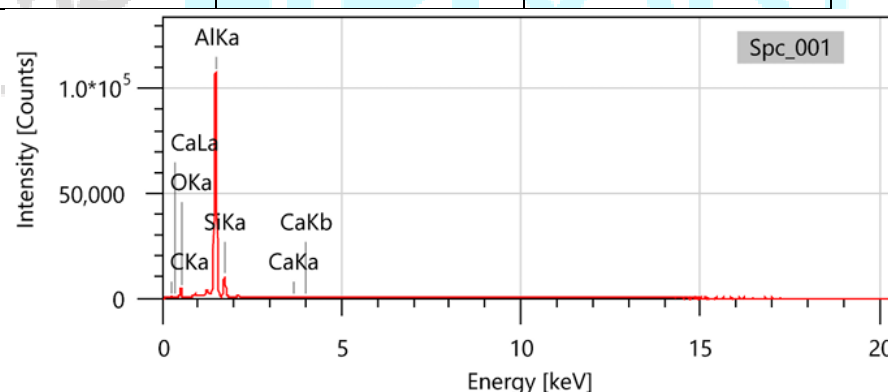
morfologi silikon maupun kemungkinan terbentuknya presipitat halus belum dapat diamati secara jelas. Oleh karena itu, hasil pengamatan SEM pada penelitian ini hanya menunjukkan perubahan homogenitas struktur mikro dan tidak digunakan sebagai dasar untuk mengidentifikasi jenis presipitat yang terbentuk secara langsung.

Secara keseluruhan, perubahan struktur mikro setelah *quenching* menggunakan media air menunjukkan bahwa proses pendinginan cepat berhasil mempertahankan kondisi *supersaturated solid solution* hasil *solution heat treatment*. Kondisi tersebut meningkatkan hambatan terhadap pergerakan dislokasi sehingga menghasilkan peningkatan nilai kekerasan dibandingkan *raw material*. Hasil penelitian ini sejalan dengan teori *precipitation hardening* yang menyatakan bahwa *quenching* merupakan tahapan penting dalam menghasilkan larutan padat lewat jenuh sebelum proses *artificial aging* dilakukan (ASM International 2018; Totten 2016).

3.1.4 Hasil Analisis EDX *Quenching* Air

Tabel 4 Komposisi Material dengan Proses *Quenching* Air

Elemen	Massa %	Atom %
C	18.17 ± 0.36	32.05 ± 0.63
O	7.82 ± 0.15	10.36 ± 0.20
Al	62.24 ± 0.22	48.87 ± 0.17
Si	11.11 ± 0.13	8.38 ± 0.10
Ca	0.66 ± 0.04	0.35 ± 0.02
Total	100.00	100.00



Gambar 17 Analisis EDX Material dengan Proses *Quenching* Air

Hasil analisis komposisi unsur menggunakan *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDX) pada spesimen yang telah mengalami *solution heat treatment* pada temperatur 580°C selama 20 menit kemudian dilakukan *quenching* menggunakan media air ditunjukkan pada Tabel 4.2 dan Gambar 4.4. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi unsur-unsur yang terdeteksi

pada area permukaan spesimen setelah proses pendinginan cepat serta membandingkannya dengan kondisi *raw material*.

Berdasarkan hasil analisis EDX, unsur aluminium (Al) masih merupakan unsur dominan yang terdeteksi pada permukaan spesimen dengan persentase sebesar 62,24 Massa (%) dan 48,87 Atom (%). Dominasi aluminium menunjukkan bahwa matriks α -Al (alpha aluminium) tetap menjadi fase utama penyusun paduan Aluminium Silikon setelah proses *solution heat treatment* dan *quenching* menggunakan media air. Dibandingkan dengan *raw material*, persentase aluminium yang terdeteksi pada permukaan mengalami perubahan. Akan tetapi, perubahan tersebut tidak menunjukkan bahwa kandungan aluminium dalam material berkurang, melainkan hanya menggambarkan perubahan distribusi unsur yang terdeteksi pada area permukaan spesimen. Hal ini disebabkan karena metode EDX hanya menganalisis komposisi unsur pada area permukaan, sehingga tidak dapat digunakan sebagai representasi komposisi keseluruhan material (Goldstein dkk. 2018).

Unsur silikon (Si) terdeteksi sebesar 11,11 Massa (%) dan 8,38 Atom (%), menunjukkan bahwa silikon tetap menjadi unsur paduan utama setelah aluminium. Apabila dikaitkan dengan hasil pengamatan SEM, partikel silikon tampak memiliki distribusi yang lebih homogen dibandingkan kondisi *raw material*. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa proses *solution heat treatment* telah melarutkan sebagian unsur paduan ke dalam matriks aluminium, kemudian proses *quenching* menggunakan media air berhasil mempertahankan kondisi tersebut sehingga terbentuk *supersaturated solid solution*. Struktur yang lebih homogen tersebut berkontribusi terhadap peningkatan hambatan pergerakan dislokasi yang selanjutnya meningkatkan nilai kekerasan material (ASM International 2018).

Selain aluminium dan silikon, hasil EDX menunjukkan keberadaan unsur oksigen (O) sebesar 7,82 Massa (%) dan 10,36 Atom (%). Persentase oksigen yang relatif rendah dibandingkan spesimen setelah *artificial aging* menunjukkan bahwa oksidasi permukaan belum berlangsung secara signifikan. Keberadaan oksigen pada penelitian ini diduga berasal dari pembentukan lapisan oksida alami (Al_2O_3) akibat kontak permukaan aluminium dengan udara selama proses preparasi maupun setelah perlakuan panas. Oleh karena itu, unsur oksigen lebih mencerminkan kondisi permukaan spesimen daripada perubahan komposisi utama material (ASM International 2018).

Hasil analisis EDX juga menunjukkan keberadaan unsur karbon (C) sebesar 18,17 Massa (%) dan 32,05 Atom (%). Persentase karbon tersebut relatif tinggi apabila dibandingkan dengan komposisi teoritis paduan Aluminium Silikon. Oleh karena itu, unsur karbon tidak digunakan sebagai dasar dalam menentukan komposisi paduan, melainkan diduga berasal dari *carbon*

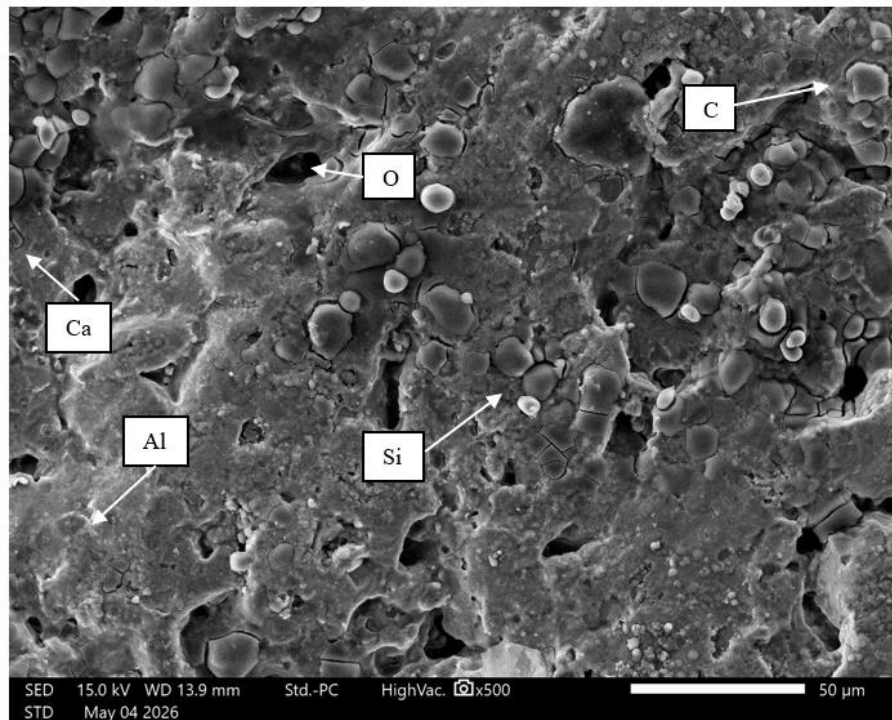
tape, residu proses *grinding* dan *polishing*, *coating*, maupun kontaminasi selama preparasi spesimen atau proses pengujian SEM-EDX. Dengan demikian, unsur karbon diinterpretasikan sebagai kontaminasi permukaan dan bukan sebagai unsur utama penyusun material (Goldstein dkk. 2018).

Selain unsur-unsur tersebut, analisis EDX mendeteksi keberadaan unsur kalsium (Ca) sebesar 0,66 Massa (%) dan 0,35 Atom (%). Mengingat spesimen ini menggunakan media *quenching* air, keberadaan unsur Ca tidak diinterpretasikan sebagai akibat proses *quenching* maupun difusi unsur ke dalam matriks aluminium. Persentase Ca yang sangat kecil diduga berasal dari kontaminasi lokal selama proses preparasi spesimen, lingkungan pengujian, atau variasi area analisis EDX. Oleh karena itu, unsur Ca tidak digunakan sebagai dasar dalam menarik kesimpulan mengenai perubahan komposisi material.

Perlu dipahami bahwa EDX merupakan metode karakterisasi permukaan, sehingga hasil analisis hanya menggambarkan unsur-unsur yang terdeteksi pada area pengamatan. Oleh sebab itu, perubahan persentase unsur yang diperoleh tidak dapat digunakan untuk menyatakan bahwa komposisi kimia material telah berubah secara keseluruhan, melainkan hanya menunjukkan adanya variasi distribusi unsur pada permukaan spesimen (Goldstein dkk. 2018). Apabila hasil analisis EDX dikaitkan dengan hasil pengamatan SEM dan pengujian kekerasan, terlihat bahwa distribusi unsur yang lebih homogen pada permukaan sejalan dengan homogenitas struktur mikro yang diamati melalui SEM. Struktur mikro yang lebih homogen tersebut menyebabkan hambatan terhadap pergerakan dislokasi meningkat sehingga nilai kekerasan spesimen setelah proses *quenching* menggunakan media air meningkat menjadi 94,02 HV, lebih tinggi dibandingkan *raw material* yang memiliki nilai kekerasan sebesar 88,84 HV. Dengan demikian, peningkatan kekerasan pada spesimen *quenching* menggunakan media air lebih dipengaruhi oleh perubahan struktur mikro akibat proses perlakuan panas dibandingkan perubahan komposisi unsur material.

Secara keseluruhan, hasil analisis EDX menunjukkan bahwa proses *solution heat treatment* dan *quenching* menggunakan media air tidak mengubah komposisi dasar paduan Aluminium Silikon, tetapi menghasilkan distribusi unsur yang lebih homogen pada area permukaan spesimen. Hasil tersebut konsisten dengan pengamatan SEM dan peningkatan nilai kekerasan, sehingga menunjukkan bahwa proses pendinginan cepat menggunakan media air berhasil mempertahankan kondisi *supersaturated solid solution* yang berperan dalam meningkatkan sifat mekanik material sebelum dilakukan proses *artificial aging*.

3.1.5 Quenching Media Air dan Artificial Aging



Gambar 18 Struktur Mikro *Quenching* Media Air dan *Artificial Aging*

Hasil pengamatan struktur mikro menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) pada spesimen yang telah mengalami *solution heat treatment* pada temperatur 580°C selama 20 menit, dilanjutkan dengan *quenching* menggunakan media air, kemudian diberikan perlakuan *artificial aging* pada temperatur 200°C selama 20 menit, ditunjukkan pada Gambar 4.5. Pengamatan dilakukan menggunakan pembesaran 500× untuk mengidentifikasi perubahan morfologi permukaan, distribusi partikel silikon, dan perubahan struktur mikro setelah proses *artificial aging*.

Berdasarkan hasil pengamatan SEM, struktur mikro spesimen masih didominasi oleh matriks α -Al (alpha aluminium) sebagai fase utama penyusun material. Distribusi partikel silikon tampak relatif homogen pada matriks aluminium dan menunjukkan perubahan dibandingkan kondisi *raw material*. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa struktur homogen yang terbentuk selama proses *solution heat treatment* masih dapat dipertahankan setelah proses *quenching* dan *artificial aging*.

Secara metalurgi, setelah proses *solution heat treatment*, sebagian unsur paduan larut ke dalam matriks aluminium sehingga menghasilkan struktur yang lebih homogen. Proses *quenching* menggunakan media air kemudian mempertahankan kondisi tersebut dengan membentuk *supersaturated solid solution*, yaitu kondisi ketika atom-atom unsur paduan berada dalam matriks aluminium melebihi batas kelarutan pada temperatur ruang. Kondisi *supersaturated*

solid *solution* merupakan tahap awal yang diperlukan sebelum terjadinya proses presipitasi selama *artificial aging* (ASM International 2018).

Selama proses *artificial aging* pada temperatur 200°C, atom-atom unsur paduan mulai berdifusi dan secara teoritis mengalami tahapan pembentukan *Guinier–Preston* (GP) *Zone*, kemudian berkembang menjadi presipitat metastabil β'' , dilanjutkan menjadi β' , dan akhirnya berubah menjadi fase β yang lebih stabil apabila proses aging berlangsung lebih lama atau pada temperatur yang lebih tinggi. Presipitat metastabil tersebut berperan sebagai penghambat pergerakan dislokasi sehingga dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan material (Marioara dkk. 2003; ASM International 2018).

Namun demikian, pada penelitian ini identifikasi GP *Zone* maupun presipitat β'' , β' , dan β tidak dapat dilakukan secara langsung, karena pengamatan SEM hanya menggunakan pembesaran 500 $\times$. Oleh karena itu, keberadaan presipitat tidak dapat dipastikan, melainkan diindikasikan dari perubahan morfologi permukaan dan harus dikonfirmasi menggunakan metode karakterisasi lain seperti *Transmission Electron Microscopy* (TEM) atau *X-Ray Diffraction* (XRD).

Apabila hasil pengamatan SEM dikaitkan dengan hasil pengujian kekerasan, terlihat bahwa nilai kekerasan spesimen setelah *artificial aging* mengalami penurunan dari 94,02 HV menjadi 88,82 HV. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa perlakuan *artificial aging* yang digunakan pada penelitian ini belum menghasilkan peningkatan kekerasan dibandingkan kondisi setelah *quenching*. Kondisi tersebut diduga berkaitan dengan proses pertumbuhan presipitat (*coarsening*) sehingga kemampuan presipitat dalam menghambat pergerakan dislokasi menjadi berkurang. Fenomena tersebut dikenal sebagai over-aging, yaitu kondisi ketika presipitat mengalami pertumbuhan sehingga efektivitas mekanisme *precipitation hardening* menurun (Totten 2016).

Selain itu, porositas yang terlihat pada beberapa area pengamatan masih memiliki karakteristik yang relatif sama dengan spesimen sebelum aging. Hal ini menunjukkan bahwa proses *artificial aging* tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap keberadaan porositas karena cacat tersebut telah terbentuk sejak proses pengecoran material.

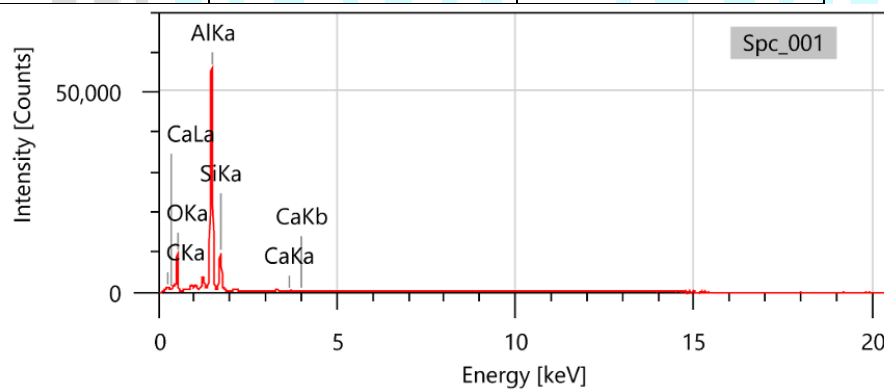
Secara keseluruhan, hasil pengamatan SEM menunjukkan bahwa proses *artificial aging* menghasilkan perubahan struktur mikro yang diindikasikan melalui distribusi partikel yang lebih homogen. Akan tetapi, berdasarkan hasil pengujian kekerasan, perlakuan aging pada kondisi penelitian ini belum menghasilkan peningkatan sifat mekanik dibandingkan spesimen *quenching*. Dengan demikian, perubahan struktur mikro yang diamati diduga berkaitan dengan

proses presipitasi, namun identifikasi jenis presipitat memerlukan karakterisasi lanjutan menggunakan TEM atau XRD.

3.1.6 Hasil Analisis EDX *Quenching* Media Air dan *Artificial Aging*

Tabel 5 Komposisi Material dengan Proses *Quenching* media Air dan *Artificial Aging*

Elemen	Massa %	Atom %
C	26.95 ± 0.40	41.12 ± 0.60
O	20.26 ± 0.27	23.66 ± 0.31
Al	41.07 ± 0.20	27.90 ± 0.14
Si	10.96 ± 0.13	7.15 ± 0.09
Ca	0.37 ± 0.03	0.17 ± 0.01
Total	100.00	100.00



Gambar 19 Analisis EDX Material dengan Proses *Quenching* Media Air dan *Artificial Aging*

Hasil analisis komposisi unsur menggunakan *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDX) pada spesimen yang telah mengalami *solution heat treatment*, *quenching* menggunakan media air, dan *artificial aging* ditunjukkan pada Tabel 4.3 dan Gambar 4.6. Analisis ini dilakukan untuk mengetahui unsur-unsur yang terdeteksi pada area permukaan spesimen setelah seluruh tahapan perlakuan panas serta membandingkannya dengan kondisi *raw material* maupun spesimen yang hanya mengalami proses *quenching* menggunakan media air.

Berdasarkan hasil analisis EDX, unsur aluminium (Al) masih merupakan unsur dominan yang terdeteksi pada permukaan spesimen dengan persentase sebesar 41,07 Massa (%) dan 27,90 Atom (%). Meskipun persentase aluminium yang terdeteksi pada permukaan lebih rendah dibandingkan spesimen sebelum aging, hal tersebut tidak menunjukkan bahwa kandungan aluminium dalam material berkurang. Perubahan tersebut hanya menggambarkan perubahan persentase unsur yang terdeteksi pada area permukaan spesimen karena metode EDX hanya menganalisis komposisi unsur pada volume kecil di sekitar permukaan material, bukan

komposisi keseluruhan paduan (Goldstein dkk. 2018). Dengan demikian, perubahan persentase aluminium lebih tepat diinterpretasikan sebagai perubahan distribusi unsur pada permukaan setelah proses *artificial aging*.

Unsur silikon (Si) terdeteksi sebesar 10,96 Massa (%) dan 7,15 Atom (%). Persentase tersebut relatif tidak mengalami perubahan yang signifikan dibandingkan spesimen sebelum *artificial aging*. Hasil ini menunjukkan bahwa silikon tetap menjadi unsur utama penyusun paduan Aluminium Silikon. Apabila dikaitkan dengan hasil pengamatan SEM, distribusi partikel silikon tampak lebih homogen dibandingkan kondisi *raw material*, yang mengindikasikan bahwa proses *solution heat treatment* dan *quenching* telah menghasilkan distribusi unsur yang lebih merata pada matriks aluminium. Namun demikian, berdasarkan pengamatan SEM pada pembesaran 500×, perubahan tersebut belum dapat digunakan untuk mengidentifikasi jenis presipitat yang terbentuk secara langsung.

Analisis EDX juga menunjukkan keberadaan unsur oksigen (O) sebesar 20,26 Massa (%) dan 23,66 Atom (%). Persentase oksigen yang relatif tinggi diduga berkaitan dengan pembentukan lapisan oksida alami (Al_2O_3) pada permukaan aluminium akibat kontak dengan udara selama proses preparasi maupun setelah perlakuan panas berlangsung. Selain itu, oksigen yang terdeteksi juga dapat berasal dari proses oksidasi permukaan selama pemanasan pada tahap *artificial aging*. Oleh karena itu, unsur oksigen lebih mencerminkan kondisi permukaan spesimen daripada perubahan komposisi utama paduan Aluminium Silikon (ASM International 2018).

Hasil analisis EDX juga menunjukkan kandungan karbon (C) sebesar 26,95 Massa (%) dan 41,12 Atom (%). Persentase karbon yang cukup tinggi tersebut tidak digunakan sebagai dasar dalam menentukan komposisi paduan Aluminium Silikon, karena secara metalurgi kandungan karbon pada paduan Al-Si sangat rendah. Tingginya kandungan karbon diduga berasal dari *carbon tape*, residu proses *grinding* dan *polishing*, *coating*, maupun kontaminasi selama preparasi spesimen dan pengujian SEM-EDX. Oleh karena itu, unsur karbon diinterpretasikan sebagai kontaminasi permukaan dan bukan sebagai unsur penyusun utama material (Goldstein dkk. 2018).

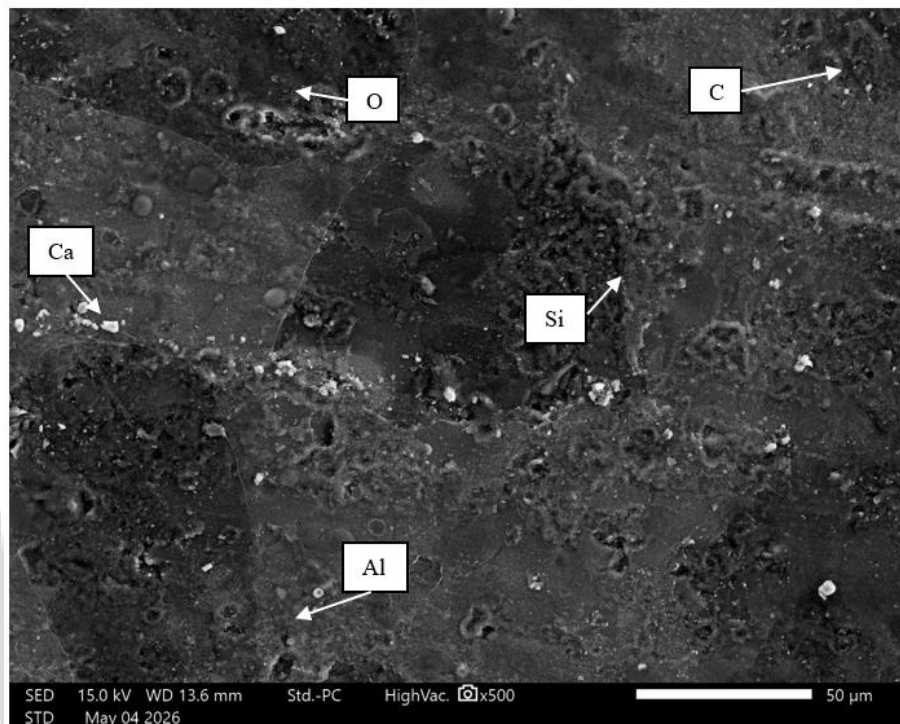
Selain unsur-unsur utama tersebut, EDX juga mendeteksi keberadaan unsur kalsium (Ca) sebesar 0,37 Massa (%) dan 0,17 Atom (%). Keberadaan Ca pada spesimen yang menggunakan media pendingin air diduga berasal dari kontaminasi lokal selama proses preparasi, lingkungan pengujian, maupun material pendukung analisis, karena spesimen ini tidak menggunakan media *quenching* CaCO_3 . Mengingat persentasenya sangat kecil dan EDX hanya menganalisis

area permukaan, keberadaan Ca tidak dapat diinterpretasikan sebagai unsur yang berdifusi ke dalam matriks aluminium maupun sebagai perubahan komposisi material.

Perlu diperhatikan bahwa metode EDX merupakan teknik karakterisasi permukaan, sehingga perubahan persentase unsur yang diperoleh tidak dapat digunakan sebagai dasar untuk menyatakan perubahan komposisi keseluruhan material. Oleh karena itu, hasil EDX pada penelitian ini lebih tepat digunakan sebagai informasi mengenai distribusi unsur pada area permukaan spesimen setelah perlakuan panas daripada sebagai dasar identifikasi fase atau presipitat.

Apabila hasil EDX dikaitkan dengan hasil pengamatan SEM dan pengujian kekerasan, terlihat bahwa spesimen setelah proses *artificial aging* mengalami perubahan distribusi unsur pada permukaan, namun nilai kekerasannya justru mengalami penurunan dari 94,02 HV menjadi 88,82 HV. Secara teoritis, selama proses *artificial aging* atom-atom unsur paduan akan berdifusi membentuk *Guinier–Preston* (GP) *Zone*, kemudian berkembang menjadi presipitat metastabil β'' , β' , hingga akhirnya menjadi fase β yang lebih stabil. Presipitat metastabil tersebut berfungsi menghambat pergerakan dislokasi sehingga mampu meningkatkan kekuatan material (Marioara dkk. 2003). Akan tetapi, berdasarkan hasil penelitian ini peningkatan kekerasan tidak terjadi. Kondisi tersebut diduga menunjukkan bahwa parameter *artificial aging* yang digunakan belum menghasilkan kondisi presipitasi yang optimum atau telah terjadi pertumbuhan presipitat (*coarsening*) sehingga kemampuan presipitat dalam menghambat pergerakan dislokasi berkurang. Fenomena tersebut dikenal sebagai over-aging (Totten 2016). Secara keseluruhan, hasil analisis EDX menunjukkan bahwa perlakuan *artificial aging* tidak mengubah komposisi dasar paduan Aluminium Silikon, tetapi memengaruhi distribusi unsur yang terdeteksi pada area permukaan spesimen. Apabila dikombinasikan dengan hasil pengamatan SEM dan pengujian kekerasan, dapat disimpulkan bahwa perubahan sifat mekanik material pada penelitian ini lebih dipengaruhi oleh mekanisme difusi dan evolusi struktur mikro selama perlakuan panas daripada perubahan komposisi kimia material. Dengan demikian, identifikasi presipitat pada penelitian ini hanya dapat diindikasikan berdasarkan teori *precipitation hardening* serta perubahan sifat mekanik, sedangkan konfirmasi jenis presipitat memerlukan karakterisasi lanjutan menggunakan *Transmission Electron Microscopy* (TEM) atau *X-Ray Diffraction* (XRD).

3.1.7 Quenching Media CaCO_3 25%



Gambar 20 Struktur Mikro Material dengan Proses *Quenching* Media CaCO_3 25% Hasil pengamatan struktur mikro menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) pada spesimen yang telah mengalami *solution heat treatment* pada temperatur 580°C selama 20 menit, kemudian dilakukan *quenching* menggunakan larutan CaCO_3 25%, ditunjukkan pada Gambar 4.7. Pengamatan dilakukan pada pembesaran $500\times$ untuk mengidentifikasi perubahan morfologi permukaan, distribusi partikel silikon, kondisi matriks aluminium, serta pengaruh media pendingin terhadap struktur mikro paduan Aluminium Silikon.

Berdasarkan hasil pengamatan SEM, struktur mikro spesimen masih didominasi oleh matriks $\alpha\text{-Al}$ (alpha aluminium) sebagai fase utama penyusun material. Dibandingkan dengan kondisi *raw material*, distribusi partikel silikon tampak mengalami perubahan menjadi lebih merata, meskipun homogenitasnya belum sebaik spesimen yang menggunakan media pendingin air. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa proses *solution heat treatment* telah menghasilkan struktur yang lebih homogen sebelum proses pendinginan dilakukan, sedangkan media pendingin CaCO_3 25% mempertahankan sebagian kondisi tersebut selama proses *quenching*. Secara metalurgi, proses *solution heat treatment* bertujuan melarutkan sebagian unsur paduan ke dalam matriks aluminium sehingga terbentuk struktur yang lebih homogen. Setelah dilakukan pendinginan menggunakan media CaCO_3 25%, laju pendinginan diduga lebih rendah dibandingkan media air karena keberadaan partikel CaCO_3 dalam larutan dapat memengaruhi kemampuan perpindahan panas media pendingin. Akibatnya, proses difusi atom masih

memiliki peluang berlangsung selama pendinginan sehingga kondisi *supersaturated solid solution* yang terbentuk diperkirakan tidak setinggi pada media air (ASM International 2018; Totten 2016).

Pada beberapa area pengamatan terlihat adanya partikel berwarna lebih terang yang ditandai sebagai unsur Ca. Akan tetapi, berdasarkan hasil pengamatan SEM saja tidak dapat disimpulkan bahwa unsur Ca telah berdifusi ke dalam matriks aluminium. Keberadaan partikel tersebut lebih tepat diinterpretasikan sebagai indikasi adanya residu CaCO_3 yang masih menempel pada permukaan spesimen setelah proses *quenching*. Untuk memastikan apakah unsur Ca benar-benar berdifusi ke dalam material diperlukan pengujian lanjutan menggunakan teknik karakterisasi dengan resolusi yang lebih tinggi, seperti *Transmission Electron Microscopy* (TEM) atau analisis pemetaan unsur (*elemental mapping*) (Goldstein dkk. 2018). Selain itu, pada struktur mikro masih terlihat adanya porositas yang diduga merupakan gas *porosity* maupun *shrinkage porosity* akibat proses pengecoran material. Keberadaan porositas tersebut tidak menunjukkan perubahan yang signifikan setelah proses *quenching* karena perlakuan panas tidak mampu menghilangkan cacat pengecoran yang telah terbentuk sebelumnya. Pengaruh utama perlakuan panas lebih ditunjukkan oleh perubahan homogenitas distribusi unsur paduan dibandingkan perubahan jumlah porositas (Campbell 2015).

Partikel silikon eutektik masih dapat diamati pada beberapa area pengamatan, namun distribusinya tampak lebih homogen dibandingkan kondisi *raw material*. Pada pembesaran 500 $\times$, perubahan morfologi silikon maupun kemungkinan terbentuknya presipitat halus belum dapat diamati secara langsung. Oleh karena itu, apabila terdapat perubahan struktur mikro akibat proses *quenching*, perubahan tersebut hanya dapat diindikasikan berdasarkan perubahan morfologi permukaan, sedangkan identifikasi jenis presipitat memerlukan karakterisasi lanjutan menggunakan TEM atau XRD.

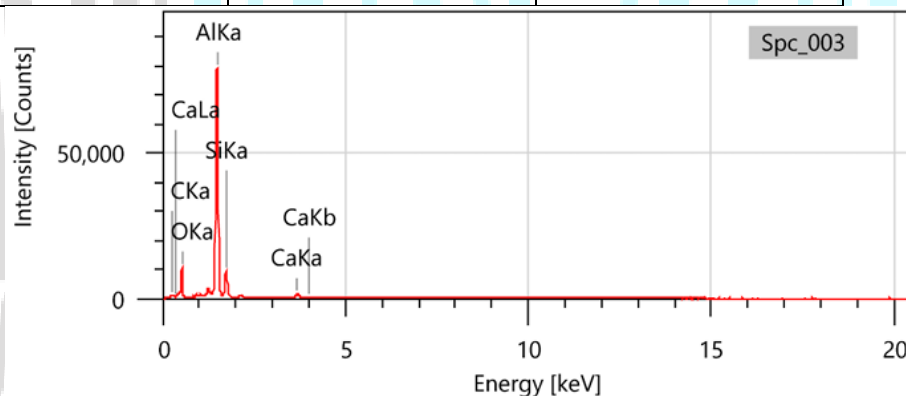
Apabila hasil pengamatan SEM dikaitkan dengan hasil pengujian kekerasan, spesimen *quenching* menggunakan media CaCO_3 25% memiliki nilai kekerasan rata-rata sebesar 89,32 HV, sedikit lebih tinggi dibandingkan *raw material* (88,84 HV), namun lebih rendah dibandingkan spesimen yang didinginkan menggunakan media air (94,02 HV). Hal ini menunjukkan bahwa media pendingin CaCO_3 25% masih mampu meningkatkan kekerasan material, namun efektivitasnya lebih rendah dibandingkan air. Kondisi tersebut diduga disebabkan oleh laju pendinginan yang lebih lambat, sehingga proses difusi atom masih berlangsung selama pendinginan dan jumlah *supersaturated solid solution* yang dipertahankan menjadi lebih sedikit. Akibatnya, hambatan terhadap pergerakan dislokasi tidak sebesar yang terjadi pada spesimen *quenching* menggunakan media air (Totten 2016).

Secara keseluruhan, hasil pengamatan SEM menunjukkan bahwa media pendingin CaCO_3 25% mampu menghasilkan struktur mikro yang relatif homogen dibandingkan kondisi awal material, namun homogenitas tersebut masih lebih rendah dibandingkan media pendingin air. Perbedaan tersebut berkorelasi dengan hasil pengujian kekerasan yang menunjukkan peningkatan nilai kekerasan yang lebih kecil pada media CaCO_3 25%.

3.1.8 Hasil Analisis EDX *Quenching* Larutan CaCO_3 25%

Tabel 6 Komposisi Material dengan Proses *Quenching* CaCO_3 25%

Elemen	Massa %	Atom %
C	18.35 ± 0.33	30.56 ± 0.55
O	19.18 ± 0.24	23.98 ± 0.30
Al	49.98 ± 0.21	37.06 ± 0.15
Si	10.19 ± 0.12	7.26 ± 0.09
Ca	2.30 ± 0.06	1.15 ± 0.03
Total	100.00	100.00



Gambar 21 Analisis EDX Material dengan Proses *Quenching* CaCO_3 25%

Hasil analisis komposisi unsur menggunakan *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDX) pada spesimen yang telah mengalami *solution heat treatment* kemudian dilakukan *quenching* menggunakan media CaCO_3 25% ditunjukkan pada Tabel 4.4 dan Gambar 4.8. Analisis ini dilakukan untuk mengetahui unsur-unsur yang terdeteksi pada area permukaan spesimen setelah proses pendinginan serta membandingkannya dengan kondisi *raw material* maupun spesimen yang didinginkan menggunakan media air.

Berdasarkan hasil analisis EDX, unsur aluminium (Al) masih merupakan unsur dominan dengan persentase sebesar 49,98 Massa (%) dan 37,06 Atom (%). Dominasi aluminium menunjukkan bahwa matriks α -Al tetap menjadi fase utama penyusun material setelah proses *solution heat treatment* dan *quenching* menggunakan media CaCO_3 25%. Apabila dibandingkan dengan kondisi *raw material*, persentase aluminium yang terdeteksi pada

permukaan mengalami perubahan. Namun demikian, perubahan tersebut tidak menunjukkan bahwa kandungan aluminium dalam material berkurang, melainkan hanya menggambarkan perubahan persentase unsur yang terdeteksi pada area permukaan spesimen. Hal ini disebabkan karena metode EDX hanya menganalisis unsur pada volume kecil di sekitar permukaan material dan tidak mewakili komposisi keseluruhan paduan (Goldstein dkk. 2018).

Unsur silikon (Si) terdeteksi sebesar 10,19 Massa (%) dan 7,26 Atom (%). Persentase silikon yang masih cukup tinggi menunjukkan bahwa unsur tersebut tetap menjadi komponen utama penyusun paduan Aluminium Silikon. Hasil ini sejalan dengan pengamatan SEM yang memperlihatkan keberadaan partikel silikon yang tersebar pada matriks aluminium. Distribusi silikon yang relatif lebih homogen dibandingkan kondisi *raw material* mengindikasikan bahwa proses *solution heat treatment* telah meningkatkan homogenitas struktur mikro sebelum proses pendinginan dilakukan. Akan tetapi, homogenitas tersebut diperkirakan belum sebaik spesimen yang menggunakan media pendingin air karena laju pendinginan media CaCO_3 25% diduga lebih rendah sehingga proses difusi atom masih berlangsung selama pendinginan (ASM International 2018).

Selain unsur aluminium dan silikon, hasil analisis EDX menunjukkan keberadaan unsur oksigen (O) sebesar 19,18 Massa (%) dan 23,98 Atom (%). Persentase oksigen yang relatif tinggi diduga berkaitan dengan terbentuknya lapisan oksida alami (Al_2O_3) pada permukaan aluminium akibat kontak dengan udara selama proses preparasi maupun setelah perlakuan panas. Selain itu, keberadaan oksigen juga kemungkinan berkaitan dengan residu media pendingin yang masih melekat pada permukaan spesimen setelah proses *quenching*. Oleh karena itu, unsur oksigen yang terdeteksi lebih mencerminkan kondisi permukaan spesimen dibandingkan perubahan komposisi material secara keseluruhan (ASM International 2018).

Hasil EDX juga menunjukkan keberadaan unsur karbon (C) sebesar 18,35 Massa (%) dan 30,56 Atom (%). Persentase karbon tersebut relatif tinggi apabila dibandingkan dengan komposisi paduan Aluminium Silikon secara umum. Oleh karena itu, kandungan karbon tidak diinterpretasikan sebagai komponen utama paduan, melainkan diduga berasal dari *carbon tape*, residu proses *grinding* dan *polishing*, *coating*, maupun kontaminasi selama preparasi spesimen atau pengujian SEM-EDX. Dengan demikian, unsur karbon tidak digunakan sebagai dasar dalam mengevaluasi perubahan komposisi material selama penelitian (Goldstein dkk. 2018).

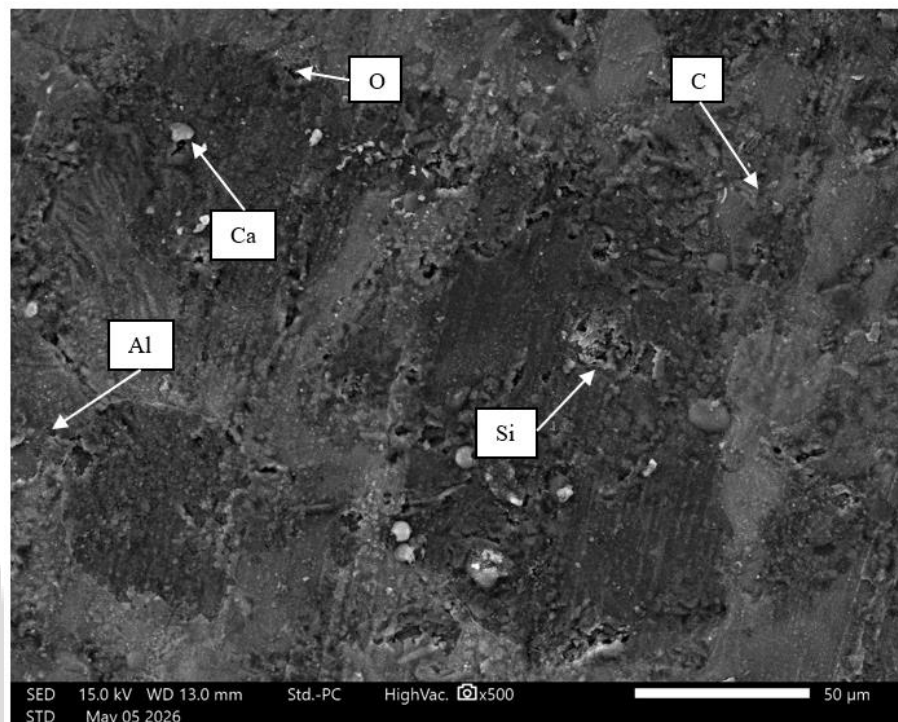
Keberadaan unsur kalsium (Ca) sebesar 2,30 Massa (%) dan 1,15 Atom (%) merupakan perbedaan utama apabila dibandingkan dengan spesimen yang didinginkan menggunakan media air. Kehadiran unsur Ca diindikasikan berasal dari residu larutan CaCO_3 yang masih menempel pada permukaan spesimen setelah proses *quenching*. Namun demikian, hasil EDX

belum dapat digunakan sebagai bukti bahwa atom Ca telah berdifusi ke dalam matriks aluminium, karena EDX hanya menganalisis komposisi unsur pada area permukaan spesimen. Oleh sebab itu, interpretasi yang lebih tepat adalah bahwa keberadaan Ca menunjukkan adanya pengaruh media pendingin terhadap kondisi permukaan spesimen, bukan perubahan komposisi paduan Aluminium Silikon secara keseluruhan (Goldstein dkk. 2018).

Apabila hasil analisis EDX dikaitkan dengan hasil pengamatan SEM, terlihat bahwa keberadaan unsur Ca pada permukaan spesimen sejalan dengan ditemukannya partikel-partikel terang pada citra SEM yang diduga merupakan residu media pendingin. Di sisi lain, hasil pengujian kekerasan menunjukkan bahwa spesimen *quenching* menggunakan media CaCO_3 25% memiliki nilai kekerasan sebesar 89,32 HV, sedikit lebih tinggi dibandingkan *raw material* (88,84 HV) namun lebih rendah dibandingkan spesimen *quenching* menggunakan media air (94,02 HV). Kondisi tersebut menunjukkan bahwa media pendingin CaCO_3 25% masih mampu meningkatkan sifat mekanik material, tetapi efektivitasnya lebih rendah dibandingkan media air. Perbedaan tersebut diduga disebabkan oleh laju pendinginan yang lebih lambat, sehingga jumlah *supersaturated solid solution* yang berhasil dipertahankan lebih sedikit dibandingkan media pendingin air. Akibatnya, hambatan terhadap pergerakan dislokasi menjadi lebih rendah sehingga peningkatan kekerasan yang diperoleh juga tidak sebesar spesimen *quenching* menggunakan media air (Totten 2016).

Secara keseluruhan, hasil analisis EDX menunjukkan bahwa proses *quenching* menggunakan media CaCO_3 25% tidak mengubah komposisi dasar paduan Aluminium Silikon, tetapi memengaruhi kondisi permukaan spesimen yang ditunjukkan oleh terdeteksinya unsur Ca serta perubahan distribusi unsur pada area pengamatan. Apabila dikombinasikan dengan hasil SEM dan pengujian kekerasan, dapat disimpulkan bahwa media pendingin CaCO_3 25% menghasilkan struktur mikro yang relatif homogen, namun laju pendinginannya diduga lebih rendah dibandingkan media air sehingga peningkatan sifat mekanik yang diperoleh tidak sebesar pada spesimen *quenching* menggunakan media air.

3.1.9 Quenching Larutan CaCO_3 25% dan Artificial Aging



Gambar 22 Struktur Mikro Material dengan Proses *Quenching* Media CaCO_3 25% dan *Artificial Aging*

Hasil pengamatan struktur mikro menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) pada spesimen yang telah mengalami *solution heat treatment* pada temperatur 580°C selama 20 menit, kemudian dilakukan *quenching* menggunakan media CaCO_3 25% dan dilanjutkan dengan *artificial aging* pada temperatur 200°C selama 20 menit ditunjukkan pada Gambar 4.9. Pengamatan dilakukan pada pembesaran $500\times$ untuk mengevaluasi perubahan morfologi permukaan, distribusi partikel silikon, kondisi matriks aluminium, serta pengaruh kombinasi perlakuan panas terhadap struktur mikro paduan Aluminium Silikon.

Berdasarkan hasil pengamatan SEM, struktur mikro masih didominasi oleh matriks $\alpha\text{-Al}$ (alpha aluminium) sebagai fase utama penyusun material. Dibandingkan dengan spesimen yang hanya mengalami *quenching* menggunakan media CaCO_3 25%, distribusi partikel silikon tampak lebih merata pada matriks aluminium. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa perlakuan *artificial aging* memberikan pengaruh terhadap evolusi struktur mikro setelah proses *quenching*.

Secara metalurgi, setelah proses *solution heat treatment* dan *quenching*, material berada pada kondisi *supersaturated solid solution*, yaitu keadaan ketika atom-atom unsur paduan masih terlarut di dalam matriks aluminium melebihi batas kelarutannya pada temperatur ruang. Selama proses *artificial aging*, atom-atom tersebut mulai berdifusi dan secara teoritis

membentuk tahapan presipitasi yang diawali oleh *Guinier–Preston (GP) Zone*, kemudian berkembang menjadi presipitat metastabil β'' , β' , hingga akhirnya menjadi fase β yang lebih stabil apabila proses aging berlangsung lebih lama atau pada temperatur yang lebih tinggi (ASM International 2018; Marioara dkk. 2003).

Namun demikian, pada penelitian ini keberadaan *GP Zone* maupun presipitat β'' , β' , dan β tidak dapat diamati secara langsung, karena pengamatan SEM hanya dilakukan pada pembesaran 500 $\times$. Oleh karena itu, perubahan morfologi yang tampak pada permukaan spesimen hanya diindikasikan sebagai kemungkinan terjadinya proses presipitasi, sedangkan identifikasi jenis presipitat memerlukan metode karakterisasi dengan resolusi lebih tinggi, seperti *Transmission Electron Microscopy* (TEM) atau *X-Ray Diffraction* (XRD).

Keberadaan partikel yang ditandai sebagai unsur Ca masih terlihat pada beberapa area pengamatan, namun jumlahnya tampak lebih sedikit dibandingkan spesimen sebelum proses *artificial aging*. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa sebagian residu media pendingin kemungkinan telah berkurang selama proses perlakuan panas maupun preparasi spesimen. Akan tetapi, hasil SEM tidak dapat digunakan untuk menyatakan bahwa unsur Ca telah berdifusi ke dalam matriks aluminium, sehingga interpretasi yang lebih tepat adalah bahwa keberadaan Ca masih berkaitan dengan kondisi permukaan spesimen.

Selain itu, porositas masih dapat diamati pada beberapa area pengamatan. Porositas tersebut diduga merupakan gas *porosity* maupun *shrinkage porosity* yang telah terbentuk selama proses pengecoran material. Perlakuan panas tidak menghilangkan porositas tersebut, namun lebih berpengaruh terhadap perubahan distribusi unsur paduan dan evolusi struktur mikro selama proses aging (Campbell 2015).

Apabila hasil pengamatan SEM dikaitkan dengan hasil pengujian kekerasan, spesimen yang mengalami *quenching* menggunakan media CaCO_3 25% dan *artificial aging* memiliki nilai kekerasan sebesar 89,52 HV, sedikit lebih tinggi dibandingkan spesimen yang hanya mengalami *quenching* menggunakan media CaCO_3 25% (89,32 HV). Peningkatan tersebut mengindikasikan bahwa proses *artificial aging* memberikan kontribusi terhadap peningkatan sifat mekanik material. Kondisi ini diduga berkaitan dengan terbentuknya presipitat metastabil dalam jumlah terbatas yang masih mampu menghambat pergerakan dislokasi. Namun demikian, identifikasi presipitat tersebut belum dapat dipastikan hanya berdasarkan hasil SEM pembesaran 500 $\times$.

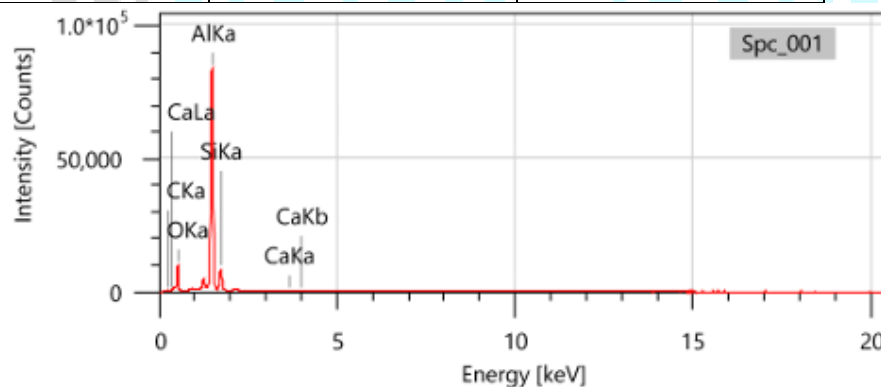
Secara keseluruhan, hasil pengamatan SEM menunjukkan bahwa kombinasi *quenching* menggunakan media CaCO_3 25% dan *artificial aging* menghasilkan distribusi partikel yang lebih homogen dibandingkan spesimen sebelum aging. Akan tetapi, perubahan tersebut

diindikasikan sebagai akibat evolusi struktur mikro selama proses aging dan belum dapat digunakan sebagai bukti langsung terbentuknya presipitat, sehingga diperlukan karakterisasi lanjutan menggunakan TEM atau XRD.

3.1.10 Hasil Analisis EDX *Quenching* Larutan CaCO_3 25% dan *Artificial Aging*

Tabel 7 Komposisi Material dengan Proses *Quenching* CaCO_3 25% dan *Artificial Aging*

Elemen	Mass %	Atom %
C	15.16 ± 0.33	26.04 ± 0.56
O	18.16 ± 0.23	23.41 ± 0.30
Al	56.17 ± 0.23	42.93 ± 0.17
Si	10.10 ± 0.13	7.42 ± 0.10
Ca	0.414 ± 0.03	0.21 ± 0.02
Total	100.00	100.00



Gambar 23 Analisis EDX Material dengan Proses *Quenching* CaCO_3 25% dan *Artificial Aging*

Hasil analisis *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDX) pada spesimen yang telah mengalami *solution heat treatment*, *quenching* menggunakan media CaCO_3 25%, dan *artificial aging* ditunjukkan pada Tabel 4.5 dan Gambar 4.10. Analisis dilakukan untuk mengevaluasi perubahan unsur yang terdeteksi pada area permukaan spesimen setelah seluruh tahapan perlakuan panas.

Berdasarkan hasil analisis EDX, unsur aluminium (Al) masih merupakan unsur dominan dengan persentase sebesar 56,17 Massa (%) dan 42,93 Atom (%), menunjukkan bahwa matriks α -Al tetap menjadi fase utama penyusun material. Dibandingkan spesimen sebelum aging, persentase aluminium yang terdeteksi pada permukaan mengalami peningkatan. Namun demikian, perubahan tersebut tidak menunjukkan bertambahnya kandungan aluminium dalam material, melainkan hanya perubahan distribusi unsur yang terdeteksi pada area permukaan spesimen, karena EDX merupakan teknik analisis permukaan (Goldstein dkk. 2018).

Unsur silikon (Si) terdeteksi sebesar 10,10 Massa (%) dan 7,42 Atom (%). Persentase tersebut relatif tidak jauh berbeda dibandingkan spesimen sebelum aging, sehingga menunjukkan bahwa silikon tetap menjadi unsur utama penyusun paduan. Hasil ini sejalan dengan pengamatan SEM yang memperlihatkan distribusi partikel silikon relatif lebih homogen setelah proses *artificial aging*.

Persentase oksigen (O) sebesar 18,16 Massa (%) diduga berkaitan dengan lapisan oksida alami pada permukaan aluminium maupun sisa oksida yang terbentuk selama proses perlakuan panas. Sementara itu, persentase karbon (C) sebesar 15,16 Massa (%) tidak digunakan sebagai dasar dalam menentukan komposisi paduan karena diduga berasal dari *carbon tape*, residu *polishing*, *coating*, maupun kontaminasi selama preparasi spesimen (Goldstein dkk. 2018).

Keberadaan unsur Ca mengalami penurunan yang cukup signifikan dari 2,30 Massa (%) sebelum aging menjadi 0,414 Massa (%) setelah proses *artificial aging*. Penurunan tersebut diindikasikan menunjukkan berkurangnya residu CaCO_3 pada permukaan spesimen setelah perlakuan panas dan proses preparasi. Namun demikian, hasil ini tidak dapat diinterpretasikan sebagai difusi maupun hilangnya unsur Ca dari dalam material, karena EDX hanya menganalisis unsur pada area permukaan.

Apabila hasil EDX dikaitkan dengan hasil SEM dan pengujian kekerasan, terlihat bahwa penurunan residu Ca pada permukaan tidak diikuti oleh perubahan komposisi utama paduan. Nilai kekerasan meningkat dari 89,32 HV menjadi 89,52 HV, yang menunjukkan bahwa proses *artificial aging* memberikan peningkatan kekerasan meskipun relatif kecil. Peningkatan tersebut diduga berkaitan dengan terbentuknya presipitat metastabil yang mulai menghambat pergerakan dislokasi, namun keberadaan presipitat tersebut belum dapat dipastikan melalui SEM 500 $\times$ maupun EDX, sehingga diperlukan karakterisasi lanjutan menggunakan TEM atau XRD.

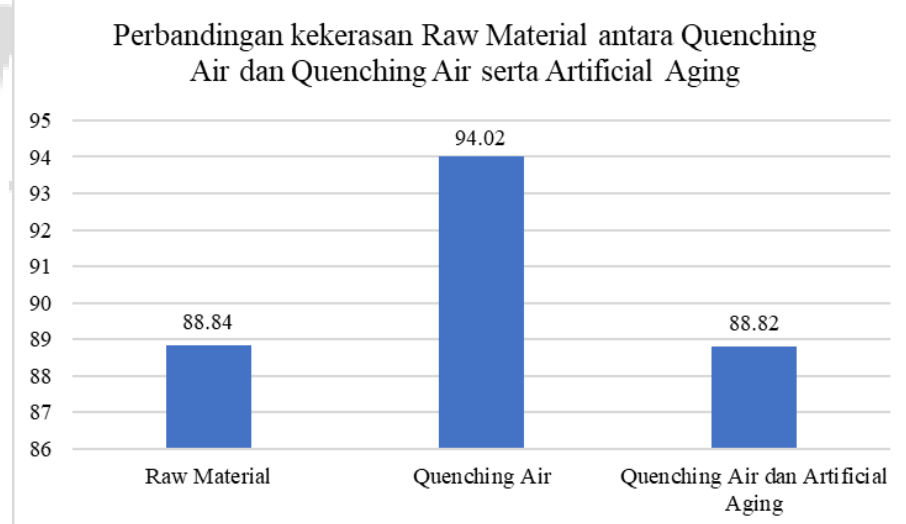
Secara keseluruhan, hasil analisis EDX menunjukkan bahwa kombinasi *quenching* menggunakan media CaCO_3 25% dan *artificial aging* tidak mengubah komposisi dasar paduan Aluminium Silikon, tetapi memengaruhi distribusi unsur yang terdeteksi pada area permukaan. Perubahan tersebut, apabila dikaitkan dengan hasil SEM dan pengujian kekerasan, menunjukkan bahwa perlakuan panas menghasilkan perubahan struktur mikro yang berkontribusi terhadap peningkatan sifat mekanik material, meskipun peningkatannya lebih rendah dibandingkan spesimen yang menggunakan media pendingin air.

3.2 Hasil Pengujian Kekerasan Mikro Vickers

3.2.1 Hasil Uji Kekerasan media pendingin Air

Tabel 8 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	
<i>Raw Material</i>	89,8 0	90,3 0	89,3 0	87,4 0	87,4 0	88,84
<i>Quenching Air</i>	95,5 0	91,3 0	94,4 0	95,3 0	93,6 0	94,02
<i>Quenching Air dan Artificial Aging</i>	88,8 0	88,5 0	88,7 0	88,6 0	89,5 0	88,82
Presentase Perubahan kekerasan						
<i>Quenching Air</i>	+ 5,83 %					
<i>Quenching Air dan Artificial Aging</i>	- 0,02 %					



Gambar 24 Perbandingan kekerasan *Raw Material* antara *Quenching Air* dan *Quenching Air* serta *Artificial Aging*

Hasil pengujian kekerasan menggunakan metode Micro Vickers Hardness Test pada spesimen yang menggunakan media pendingin air ditunjukkan pada Tabel 4.6. Pengujian dilakukan

untuk mengetahui pengaruh proses *solution heat treatment*, *quenching* menggunakan media air, dan *artificial aging* terhadap sifat mekanik paduan Aluminium Silikon (Al-Si).

Berdasarkan hasil pengujian, *raw material* memiliki nilai kekerasan rata-rata sebesar 88,84 HV. Setelah dilakukan *solution heat treatment* pada temperatur 580°C selama 20 menit kemudian *quenching* menggunakan media air, nilai kekerasan meningkat menjadi 94,02 HV, atau mengalami peningkatan sebesar 5,83% dibandingkan kondisi awal. Peningkatan ini menunjukkan bahwa pendinginan cepat menggunakan media air mampu meningkatkan kekerasan paduan Aluminium Silikon secara signifikan.

Secara metalurgi, peningkatan kekerasan tersebut diawali oleh proses *solution heat treatment* yang melarutkan sebagian unsur paduan ke dalam matriks α -Al, sehingga menghasilkan struktur yang lebih homogen. Selanjutnya, proses *quenching* menggunakan media air menghasilkan laju pendinginan yang tinggi sehingga atom-atom unsur paduan tidak memiliki waktu yang cukup untuk berdifusi kembali menuju kondisi kesetimbangan. Kondisi tersebut menghasilkan *supersaturated solid solution*, yaitu larutan padat lewat jenuh yang menjadi dasar peningkatan kekerasan pada paduan aluminium hasil perlakuan panas (ASM International 2018; Totten 2016).

Hasil tersebut didukung oleh pengamatan SEM, yang menunjukkan bahwa distribusi partikel silikon pada spesimen *quenching* menggunakan media air tampak lebih homogen dibandingkan *raw material*. Homogenitas struktur mikro tersebut mengindikasikan bahwa proses *solution heat treatment* berhasil mengurangi segregasi unsur akibat proses pengecoran, sedangkan pendinginan cepat mempertahankan kondisi homogen tersebut. Struktur mikro yang lebih homogen menyebabkan hambatan terhadap pergerakan dislokasi meningkat sehingga nilai kekerasan material juga mengalami peningkatan.

Hasil analisis EDX menunjukkan bahwa unsur aluminium masih mendominasi komposisi permukaan spesimen, sedangkan silikon tetap terdistribusi sebagai unsur paduan utama. Keberadaan unsur-unsur tersebut menunjukkan bahwa perlakuan panas tidak mengubah komposisi dasar paduan Aluminium Silikon, melainkan memengaruhi distribusi unsur pada permukaan material. Oleh karena itu, peningkatan kekerasan yang diperoleh lebih dipengaruhi oleh perubahan struktur mikro akibat perlakuan panas dibandingkan perubahan komposisi unsur material (Goldstein dkk. 2018).

Setelah dilakukan *artificial aging* pada temperatur 200°C selama 20 menit, nilai kekerasan mengalami penurunan menjadi 88,82 HV, atau sekitar 0,02% lebih rendah dibandingkan *raw material*. Secara teoritis, selama proses *artificial aging* atom-atom unsur paduan akan berdifusi membentuk *Guinier–Preston (GP) Zone*, kemudian berkembang menjadi presipitat metastabil

β'' , dilanjutkan menjadi β' , hingga akhirnya menjadi fase β apabila proses aging berlangsung lebih lama. Presipitat metastabil tersebut seharusnya mampu menghambat pergerakan dislokasi sehingga meningkatkan kekerasan material (Marioara dkk. 2003).

Namun demikian, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa proses *artificial aging* justru menyebabkan penurunan kekerasan dibandingkan spesimen setelah *quenching*. Kondisi tersebut diduga menunjukkan bahwa parameter *artificial aging* yang digunakan belum menghasilkan kondisi presipitasi yang optimum, atau telah terjadi pertumbuhan presipitat (*coarsening*) sehingga efektivitas presipitat dalam menghambat pergerakan dislokasi berkurang. Fenomena tersebut dikenal sebagai over-aging, yaitu kondisi ketika ukuran presipitat menjadi lebih besar sehingga kemampuan memperkuat material menurun (Totten 2016).

Interpretasi tersebut juga didukung oleh hasil pengamatan SEM. Meskipun distribusi partikel tampak relatif homogen setelah proses *artificial aging*, pengamatan menggunakan pembesaran $500\times$ belum mampu mengidentifikasi presipitat metastabil seperti GP Zone, β'' , maupun β' secara langsung. Oleh karena itu, keberadaan presipitat pada penelitian ini hanya diindikasikan berdasarkan teori *precipitation hardening*, perubahan morfologi permukaan, dan perubahan nilai kekerasan, sedangkan identifikasi jenis presipitat memerlukan metode karakterisasi dengan resolusi yang lebih tinggi, seperti *Transmission Electron Microscopy* (TEM) atau *X-Ray Diffraction* (XRD).

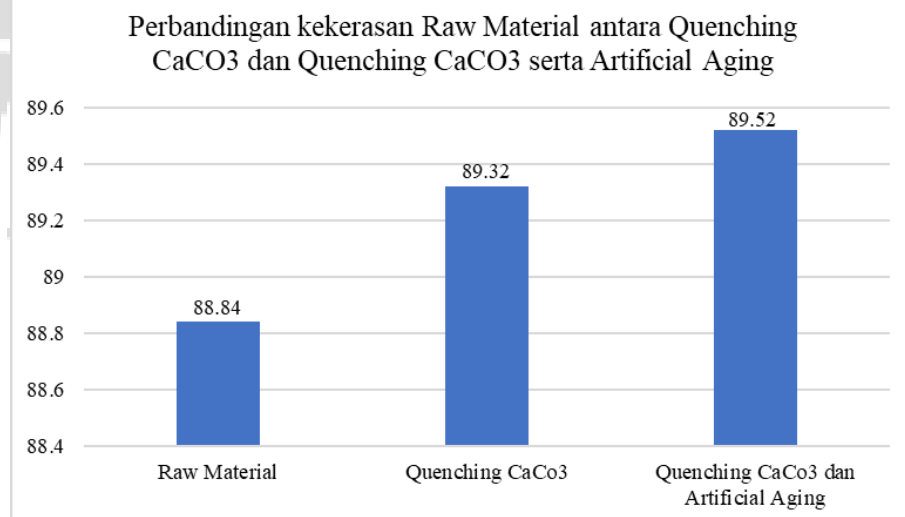
Apabila seluruh hasil pada media pendingin air dianalisis secara terpadu, terlihat adanya hubungan yang konsisten antara hasil SEM, EDX, dan pengujian kekerasan. Proses *solution heat treatment* menghasilkan struktur mikro yang lebih homogen, kemudian *quenching* menggunakan media air mempertahankan kondisi *supersaturated solid solution* sehingga hambatan terhadap pergerakan dislokasi meningkat dan menghasilkan nilai kekerasan tertinggi pada penelitian ini. Sebaliknya, setelah proses *artificial aging*, nilai kekerasan mengalami penurunan yang diduga berkaitan dengan evolusi presipitat selama proses aging, sehingga mekanisme penguatan yang diharapkan belum berlangsung secara optimum pada parameter perlakuan panas yang digunakan.

Perlu diperhatikan bahwa nilai kekerasan setelah *artificial aging* hanya berbeda 0,02% dibandingkan *raw material*. Oleh karena itu, untuk memastikan apakah perbedaan tersebut signifikan secara ilmiah, diperlukan analisis statistik, seperti standar deviasi, error bar, atau uji ANOVA. Pada penelitian ini analisis statistik tersebut belum dilakukan sehingga interpretasi hasil didasarkan pada kecenderungan nilai rata-rata yang diperoleh dari pengujian.

3.2.2 Hasil Uji Kekerasan pada Media Pendingin Larutan CaCO_3 25%

Tabel 9 Hasil Uji Kekerasan Media Pendingin Larutan CaCO_3 25%

Hasil Uji Kekerasan media pendingin Air						
Sampel	Kekerasan HV (100 gf)					Rata Rata HV
	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4	Titik 5	
<i>Raw Material</i>	89,8 0	90,3 0	89,3 0	87,4 0	87,4 0	88,84
<i>Quenching CaCO_3</i>	88.1 0	89.0 0	89.8 0	90.7 0	89.0 0	89,32
<i>Quenching CaCO_3 dan Artificial Aging</i>	88.9 0	91.2 0	89.5 0	90.0 0	88.0 0	89.52
Presentase Perubahan kekerasan						
<i>Quenching CaCO_3</i>	+ 0,54 %					
<i>Quenching Air dan Artificial Aging</i>	+ 0,76 %					



Gambar 25 Perbandingan Kekerasan *Raw Material* antara *Quenching CaCO_3* dan *Quenching CaCO_3 serta Artificial Aging*

Hasil pengujian kekerasan menggunakan metode Micro Vickers Hardness Test pada spesimen yang menggunakan media pendingin larutan CaCO_3 25% ditunjukkan pada Tabel 4.7. Pengujian dilakukan untuk mengetahui pengaruh proses *solution heat treatment*, *quenching*

menggunakan media CaCO_3 25%, serta *artificial aging* terhadap sifat mekanik paduan Aluminium Silikon (Al-Si).

Berdasarkan hasil pengujian, *raw material* memiliki nilai kekerasan rata-rata sebesar 88,84 HV. Setelah dilakukan *solution heat treatment* pada temperatur 580°C selama 20 menit kemudian *quenching* menggunakan media CaCO_3 25%, nilai kekerasan meningkat menjadi 89,32 HV, atau mengalami peningkatan sebesar 0,54% dibandingkan kondisi awal. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa media pendingin CaCO_3 25% masih mampu meningkatkan kekerasan material, meskipun peningkatannya lebih rendah dibandingkan media pendingin air.

Secara metalurgi, selama proses *solution heat treatment*, sebagian unsur paduan larut ke dalam matriks $\alpha\text{-Al}$ sehingga menghasilkan struktur mikro yang lebih homogen. Setelah dilakukan proses *quenching*, kondisi tersebut dipertahankan dalam bentuk *supersaturated solid solution*, yaitu larutan padat lewat jenuh yang terbentuk akibat pendinginan cepat. Akan tetapi, efektivitas pembentukan kondisi tersebut sangat dipengaruhi oleh laju pendinginan (*cooling rate*) media *quenching*. Dibandingkan media air, larutan CaCO_3 25% diduga memiliki kemampuan perpindahan panas yang lebih rendah sehingga laju pendinginannya lebih lambat. Akibatnya, atom-atom unsur paduan masih memiliki kesempatan untuk berdifusi selama proses pendinginan sehingga jumlah *supersaturated solid solution* yang dipertahankan menjadi lebih sedikit (Totten 2016).

Interpretasi tersebut didukung oleh hasil pengamatan SEM, yang menunjukkan bahwa struktur mikro spesimen setelah *quenching* menggunakan media CaCO_3 25% mengalami homogenisasi dibandingkan *raw material*, namun distribusi partikel silikon belum sehomogen spesimen yang menggunakan media air. Struktur mikro yang kurang homogen tersebut menyebabkan hambatan terhadap pergerakan dislokasi tidak sebesar pada spesimen *quenching* menggunakan media air, sehingga peningkatan kekerasan yang diperoleh juga lebih rendah.

Hasil analisis EDX juga menunjukkan bahwa unsur aluminium tetap mendominasi komposisi permukaan spesimen, sedangkan silikon masih terdistribusi sebagai unsur paduan utama. Selain itu, terdeteksi unsur Ca sebesar 2,30 Massa (%). Keberadaan unsur Ca diindikasikan berasal dari residu larutan CaCO_3 yang masih menempel pada permukaan spesimen setelah proses *quenching*, bukan sebagai bukti bahwa unsur Ca telah berdifusi ke dalam matriks aluminium. Hal tersebut sesuai dengan karakteristik metode EDX yang hanya memberikan informasi mengenai komposisi unsur pada area permukaan material (Goldstein dkk. 2018).

Setelah dilakukan *artificial aging* pada temperatur 200°C selama 20 menit, nilai kekerasan meningkat dari 89,32 HV menjadi 89,52 HV, atau mengalami peningkatan sekitar 0,76%.

Secara teoritis, selama proses *artificial aging* atom-atom unsur paduan akan berdifusi dan membentuk tahapan presipitasi yang diawali oleh *Guinier–Preston (GP) Zone*, kemudian berkembang menjadi presipitat metastabil β'' , β' , hingga akhirnya menjadi fase β yang stabil apabila proses aging berlangsung lebih lama. Presipitat metastabil tersebut berfungsi sebagai penghambat pergerakan dislokasi sehingga dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan material (Marioara dkk. 2003).

Pada penelitian ini, peningkatan kekerasan setelah proses *artificial aging* relatif kecil, yaitu hanya sekitar 0,20 HV. Oleh karena itu, peningkatan tersebut diduga menunjukkan bahwa proses presipitasi mulai berlangsung, tetapi belum mencapai kondisi optimum. Mengingat pengamatan SEM hanya dilakukan pada pembesaran 500 $\times$, keberadaan presipitat β'' , β' , maupun β belum dapat diamati secara langsung, sehingga pembentukan presipitat hanya diindikasikan berdasarkan teori *precipitation hardening*, perubahan struktur mikro, dan kecenderungan peningkatan nilai kekerasan. Konfirmasi mengenai jenis presipitat memerlukan metode karakterisasi dengan resolusi lebih tinggi, seperti *Transmission Electron Microscopy (TEM)* atau *X-Ray Diffraction (XRD)*.

Apabila dibandingkan dengan spesimen yang menggunakan media pendingin air, terlihat bahwa media CaCO_3 25% menghasilkan peningkatan kekerasan yang lebih rendah setelah proses *quenching*. Kondisi ini menunjukkan bahwa laju pendinginan merupakan faktor yang sangat berpengaruh terhadap pembentukan *supersaturated solid solution*. Pendinginan yang lebih cepat menggunakan media air mampu mempertahankan lebih banyak atom unsur paduan di dalam matriks aluminium sehingga menghasilkan hambatan terhadap pergerakan dislokasi yang lebih besar. Sebaliknya, pendinginan menggunakan CaCO_3 25% memberikan kesempatan difusi yang lebih besar sehingga peningkatan kekerasannya tidak sebesar media air.

Apabila seluruh hasil penelitian dianalisis secara terpadu, terlihat adanya hubungan yang konsisten antara hasil SEM, EDX, dan pengujian kekerasan. Hasil SEM menunjukkan struktur mikro yang relatif lebih homogen dibandingkan *raw material*, sedangkan hasil EDX menunjukkan bahwa komposisi dasar paduan tetap didominasi oleh aluminium dan silikon dengan keberadaan unsur Ca yang hanya terdeteksi pada permukaan. Kondisi tersebut berkorelasi dengan peningkatan nilai kekerasan setelah proses *quenching* dan *artificial aging*. Dengan demikian, perubahan sifat mekanik pada penelitian ini lebih dipengaruhi oleh perubahan struktur mikro akibat perlakuan panas daripada perubahan komposisi kimia material.

Perlu diperhatikan bahwa peningkatan kekerasan setelah *artificial aging* hanya sebesar 0,20 HV. Oleh karena itu, untuk memastikan apakah perbedaan tersebut benar-benar signifikan

secara ilmiah, diperlukan analisis statistik seperti standar deviasi, *error bar*, atau uji ANOVA. Pada penelitian ini analisis statistik tersebut belum dilakukan sehingga pembahasan didasarkan pada kecenderungan nilai rata-rata hasil pengujian.

3.3 Pengaruh Media *Quenching* terhadap Mikrostruktur dan Kekerasan

Berdasarkan hasil pengujian *Scanning Electron Microscopy* (SEM), *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDX), dan Micro Vickers Hardness Test, terlihat bahwa media *quenching* memberikan pengaruh terhadap perkembangan struktur mikro dan sifat mekanik paduan Aluminium Silikon (Al-Si). Perbedaan laju pendinginan antara media air dan larutan CaCO₃ 25% menyebabkan perubahan pada proses difusi atom selama pendinginan, yang selanjutnya memengaruhi homogenitas struktur mikro, distribusi unsur pada permukaan material, serta nilai kekerasan yang dihasilkan.

Proses perlakuan panas diawali dengan *solution heat treatment* pada temperatur 580°C selama 20 menit. Pada tahap ini sebagian unsur paduan, terutama silikon dan unsur paduan lainnya, larut ke dalam matriks α -Al sehingga menghasilkan struktur yang lebih homogen dibandingkan kondisi *raw material*. Tujuan utama proses ini adalah menghilangkan segregasi unsur akibat proses pengecoran sehingga atom-atom paduan terdistribusi lebih merata di dalam matriks aluminium. Kondisi homogen tersebut merupakan syarat awal untuk memperoleh peningkatan sifat mekanik melalui proses *precipitation hardening* (ASM International 2018).

Setelah proses *solution heat treatment*, spesimen didinginkan secara cepat menggunakan media *quenching*. Pada media air, laju pendinginan yang tinggi menyebabkan atom-atom unsur paduan tidak memiliki waktu yang cukup untuk berdifusi kembali menuju kondisi kesetimbangan. Akibatnya terbentuk kondisi *supersaturated solid solution*, yaitu larutan padat lewat jenuh yang mengandung atom-atom paduan dalam jumlah lebih besar dibandingkan kelarutan normal pada temperatur ruang. Kondisi ini meningkatkan hambatan terhadap pergerakan dislokasi sehingga nilai kekerasan material meningkat secara signifikan (Totten 2016).

Sebaliknya, pada media CaCO₃ 25%, proses pendinginan diduga berlangsung lebih lambat dibandingkan media air. Laju pendinginan yang lebih rendah memberikan kesempatan bagi atom-atom unsur paduan untuk berdifusi selama proses pendinginan, sehingga jumlah *supersaturated solid solution* yang berhasil dipertahankan menjadi lebih sedikit. Kondisi tersebut menyebabkan peningkatan kekerasan yang diperoleh lebih rendah dibandingkan media air. Hasil penelitian menunjukkan bahwa spesimen *quenching* menggunakan media air memiliki nilai kekerasan sebesar 94,02 HV, sedangkan spesimen *quenching* menggunakan media CaCO₃ 25% hanya mencapai 89,32 HV. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa

cooling rate merupakan salah satu faktor utama yang memengaruhi keberhasilan proses penguatan pada paduan Aluminium Silikon.

Hasil pengamatan SEM mendukung hasil pengujian kekerasan tersebut. Pada spesimen yang mengalami *quenching* menggunakan media air, distribusi partikel silikon tampak lebih homogen dibandingkan kondisi *raw material*. Sebaliknya, pada media CaCO_3 25%, distribusi partikel silikon juga mengalami homogenisasi, namun tingkat homogenitasnya masih lebih rendah dibandingkan media air. Selain itu, porositas yang tampak pada seluruh spesimen diduga merupakan gas *porosity* maupun *shrinkage porosity* yang berasal dari proses pengecoran. Perlakuan panas tidak menghilangkan porositas tersebut, tetapi lebih berpengaruh terhadap perubahan distribusi unsur paduan dan homogenitas struktur mikro (Campbell 2015).

Hasil analisis EDX menunjukkan bahwa unsur aluminium tetap mendominasi seluruh spesimen, sedangkan silikon tetap menjadi unsur paduan utama. Perubahan persentase unsur yang terdeteksi pada setiap spesimen tidak menunjukkan perubahan komposisi keseluruhan material, melainkan hanya menggambarkan distribusi unsur pada area permukaan karena EDX merupakan metode analisis permukaan (Goldstein dkk. 2018). Pada spesimen yang menggunakan media CaCO_3 25%, terdeteksi unsur Ca pada permukaan spesimen. Keberadaan unsur tersebut diindikasikan sebagai residu media pendingin yang masih menempel pada permukaan, bukan sebagai bukti bahwa atom Ca telah berdifusi ke dalam matriks aluminium. Hal ini diperkuat oleh fakta bahwa metode EDX tidak mampu membedakan apakah unsur tersebut berada di permukaan atau telah menjadi bagian dari struktur internal material.

Setelah proses *artificial aging* pada temperatur 200°C selama 20 menit, secara teoritis atom-atom unsur paduan mulai berdifusi membentuk tahapan presipitasi yang diawali oleh *Guinier–Preston* (GP) Zone, kemudian berkembang menjadi presipitat metastabil β'' , dilanjutkan menjadi β' , dan akhirnya menjadi fase β apabila proses aging berlangsung lebih lama atau pada temperatur yang lebih tinggi. Presipitat metastabil tersebut berfungsi menghambat pergerakan dislokasi sehingga meningkatkan kekuatan material (Marioara dkk. 2003). Akan tetapi, pada penelitian ini keberadaan presipitat tersebut tidak dapat diamati secara langsung, karena pengamatan SEM hanya menggunakan pembesaran $500\times$ dan EDX tidak mampu mengidentifikasi jenis fase. Oleh karena itu, pembentukan presipitat pada penelitian ini hanya diindikasikan berdasarkan teori *precipitation hardening*, perubahan struktur mikro, dan perubahan nilai kekerasan, sehingga masih memerlukan karakterisasi lanjutan menggunakan *Transmission Electron Microscopy* (TEM) atau *X-Ray Diffraction* (XRD).

Respon material terhadap proses *artificial aging* menunjukkan perbedaan antara kedua media pendingin. Pada spesimen yang menggunakan media air, nilai kekerasan menurun dari 94,02

HV menjadi 88,82 HV. Kondisi tersebut diduga menunjukkan bahwa parameter *artificial aging* yang digunakan belum menghasilkan kondisi presipitasi yang optimum atau telah terjadi pertumbuhan presipitat (*coarsening*) sehingga kemampuan presipitat dalam menghambat pergerakan dislokasi berkurang. Fenomena ini dikenal sebagai *over-aging*. Sebaliknya, pada spesimen yang menggunakan media CaCO_3 25%, nilai kekerasan meningkat dari 89,32 HV menjadi 89,52 HV. Walaupun peningkatan tersebut relatif kecil, hasil tersebut mengindikasikan bahwa proses aging masih memberikan kontribusi terhadap mekanisme penguatan material, meskipun efektivitasnya belum optimum.

Apabila seluruh hasil penelitian dianalisis secara terpadu, terlihat hubungan yang jelas antara mekanisme pendinginan, struktur mikro, distribusi unsur, dan sifat mekanik material. Proses *solution heat treatment* menghasilkan struktur mikro yang lebih homogen, sedangkan *quenching* mempertahankan kondisi tersebut dalam bentuk *supersaturated solid solution*. Laju pendinginan yang tinggi pada media air menghasilkan hambatan pergerakan dislokasi yang lebih besar sehingga memberikan nilai kekerasan tertinggi. Sebaliknya, media CaCO_3 25% memberikan laju pendinginan yang lebih rendah sehingga proses difusi masih berlangsung selama pendinginan dan peningkatan kekerasan yang dihasilkan lebih kecil. Hasil SEM, EDX, dan pengujian kekerasan saling mendukung dalam menjelaskan mekanisme tersebut, sehingga menunjukkan bahwa perubahan sifat mekanik pada penelitian ini lebih dipengaruhi oleh evolusi struktur mikro akibat perlakuan panas daripada perubahan komposisi kimia material. Berdasarkan hasil penelitian ini, masing-masing media pendingin memiliki karakteristik yang berbeda. Media air memiliki kelebihan berupa laju pendinginan yang tinggi sehingga mampu menghasilkan nilai kekerasan paling besar melalui pembentukan *supersaturated solid solution* yang lebih efektif. Namun demikian, setelah proses *artificial aging*, spesimen dengan media air menunjukkan penurunan kekerasan yang mengindikasikan kemungkinan terjadinya *over-aging* pada parameter perlakuan panas yang digunakan. Sementara itu, media CaCO_3 25% menghasilkan peningkatan kekerasan yang lebih rendah pada tahap *quenching*, tetapi menunjukkan respons yang lebih stabil setelah proses *artificial aging*. Selain itu, penggunaan media CaCO_3 25% berpotensi menjadi alternatif media pendingin apabila diperlukan laju pendinginan yang tidak terlalu ekstrem sehingga dapat mengurangi risiko tegangan sisa dan distorsi pada komponen, meskipun efektivitasnya dalam meningkatkan kekerasan masih berada di bawah media air.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa media *quenching* berpengaruh terhadap perkembangan struktur mikro dan sifat mekanik paduan Aluminium Silikon melalui mekanisme perubahan laju pendinginan, difusi atom, dan evolusi struktur mikro selama

perlakuan panas. Interpretasi tersebut didukung oleh hasil pengamatan SEM, analisis EDX, serta pengujian kekerasan yang saling berkorelasi. Namun demikian, identifikasi jenis presipitat pada penelitian ini masih bersifat indikatif, sehingga penelitian selanjutnya disarankan menggunakan metode karakterisasi dengan resolusi lebih tinggi, seperti TEM atau XRD, untuk mengonfirmasi mekanisme presipitasi yang terjadi.

4. PENUTUP

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

1. Pengaruh Media Pendingin terhadap Kekerasan Paduan Al-Si

Berdasarkan hasil pengujian kekerasan Vickers, media pendingin memberikan pengaruh terhadap nilai kekerasan paduan Aluminium Silikon (Al-Si) setelah proses *solution heat treatment*, *quenching*, dan *artificial aging*. Nilai kekerasan *raw material* sebesar 88,84 HV meningkat menjadi 94,02 HV setelah dilakukan *quenching* menggunakan media air. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa media air memiliki kemampuan pendinginan yang lebih cepat sehingga mampu mempertahankan kondisi larutan padat lewat jenuh (*supersaturated solid solution*) yang terbentuk selama proses *solution heat treatment*. Pada sampel yang menggunakan media pendingin CaCO_3 25%, nilai kekerasan meningkat menjadi 89,32 HV. Nilai ini lebih rendah dibandingkan sampel *quenching* air, yang menunjukkan bahwa laju pendinginan media CaCO_3 25% lebih lambat dibandingkan air. Setelah diberikan perlakuan *artificial aging* pada suhu 200°C selama 20 menit, sampel *quenching* air mengalami penurunan kekerasan menjadi 88,82 HV, sedangkan sampel *quenching* CaCO_3 25% mengalami peningkatan kekerasan menjadi 89,52 HV. Dengan demikian, media air menghasilkan nilai kekerasan tertinggi, sedangkan kombinasi *quenching* CaCO_3 25% dan *artificial aging* memberikan peningkatan kekerasan yang lebih baik dibandingkan *quenching* CaCO_3 tanpa aging.

2. Pengaruh Media Pendingin terhadap Struktur Mikro Paduan Al-Si

Hasil pengamatan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) menunjukkan bahwa seluruh spesimen didominasi oleh matriks aluminium (Al) dan partikel silikon (Si). Pada sampel *raw material*, distribusi partikel silikon masih terlihat tidak merata dan masih ditemukan porositas serta jejak preparasi permukaan.

Setelah proses *quenching* menggunakan media air, distribusi partikel silikon tampak lebih homogen dibandingkan *raw material*. Kondisi ini menunjukkan bahwa pendinginan cepat

menggunakan media air mampu mempertahankan hasil homogenisasi yang terbentuk selama *solution heat treatment*. Sementara itu, pada sampel *quenching* CaCO₃ 25%, distribusi partikel masih terlihat kurang homogen dibandingkan media air, yang menunjukkan bahwa laju pendinginan yang lebih lambat memberikan kesempatan terjadinya difusi selama proses pendinginan.

Pada sampel yang mengalami *artificial aging*, baik pada media air maupun CaCO₃ 25%, terlihat peningkatan jumlah partikel halus yang tersebar pada matriks aluminium. Keberadaan partikel tersebut mengindikasikan adanya fase kedua yang diduga terbentuk selama proses aging. Namun demikian, identifikasi jenis presipitat secara pasti tidak dapat dilakukan hanya berdasarkan hasil SEM pada perbesaran 500× sehingga diperlukan karakterisasi lanjutan untuk memastikan fase yang terbentuk.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdillah, F. 2010. *Perlakuan Panas Paduan AL-SI Pada Prototipe Piston Berbasis Material Piston Bekas*. Thesis, Universitas Diponegoro Semarang.
- Ardian, F.D.A.D. dan Sakti, A.M. 2023. Efek Perlakuan Panas Artificial Aging Pada Paduan AL6061 Terhadap Tingkat Kekerasan Dan Kekuatan Tarik. *Jurnal Teknik Mesin* 11(02), hlm. 23–28.
- Arifin, F. 2020. *Analisis Pengaruh Artificial Aging dengan Variasi Media Quenching (Air Sumur, Oli SAE 140, Air Es <10°C) terhadap Nilai Impak pada Velg OEM (Al-Si)*. Undergraduate Thesis, Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- ASM International. 2018. ASM Handbook Volume 2A: Aluminum Science and Technology. doi: 10.31399/asm.hb.v02a.9781627082075.
- Banhart, J., Chang, C.S.T., Liang, Z., Wanderka, N., Lay, M.D.H. dan Hill, A.J. 2010. Natural aging in Al-Mg-Si alloys—a process of unexpected complexity. *Advanced engineering materials* 12(7), hlm. 559–571. doi: 10.1002/adem.201000041.
- Basori, I., Masitah, I., Susetyo, F.B. dan Nanto, D. 2024. The effect of *quenching* process on the microstructure and hardness of AISI 4140 steel. Dalam: *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, hlm. 012020. doi: 10.1088/1742-6596/2866/1/012020.
- Campbell, J. 2015. *Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design*. 2 ed. Elsevier. doi: 10.1016/C2013-0-16355-3.
- Darmawan, A.S. dan Masyrukan. 2019. *Struktur dan Sifat Material*. Muhammadiyah University Press.
- Davis, J.R. 1993. *Aluminum and Aluminum Alloys*. ASM international. doi: 10.31399/asm.ash.aaa.t66100003.
- Elbar, W. dan Tampubolon, K. 2020. Pengaruh Campuran Silikon Pada Aluminium Terhadap Kekerasan Dan Tingkat Keausannya. *Journal Of Mechanical Engineering Manufactures Materials and Energy* 4(2), hlm. 183–196. doi: 10.31289/jmemme.v4i2.4070.
- Goldstein, J.I., Newbury, D.E., Michael, J.R., Ritchie, N.W.M., Scott, J.H.J. dan Joy, D.C. 2018. *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*. 4 ed. Springer. doi: 10.1007/978-1-4939-6676-9.
- Gunawan, S. 2024. Pengaruh Perlakuan Panas Quenching terhadap Ketangguhan Impak pada

- Paduan Aluminium AC7A. *Jurnal Penelitian Inovatif* 4(2), hlm. 483–490. doi: 10.54082/jupin.345.
- Hanifi, R. dan Dirja, I. 2023. Analisa Pengaruh Variasi Tipe Media Pendinginan Pada Pengecoran Piston Terhadap Kekerasan Dan Struktur Mikro. *JURNAL KAJIAN TEKNIK MESIN* 8(2), hlm. 201–210.
- Haris, E. dan Iswanto, P.T. 2012. Pengaruh Natural dan Artificial Aging Pada Velg Bahan A356. 0 Centrifugal Casting Dengan Variasi Putaran Terhadap Sifat Fisis dan Mekanis. Dalam: *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar*. hlm. 87–94.
- Kurniawan, I., Budiarto, U. dan Mulyatno, I.P. 2019. Analisa Kekuatan Puntir, Kekuatan Tarik, Kekerasan dan Uji Metalografi Baja S45C Sebagai Bahan Poros Baling-Baling Kapal (Propeller Shaft) Setelah Proses Tempering. *Jurnal Teknik Perkapalan* 7(4), hlm. 313–322. Tersedia pada: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval/article/view/24444>.
- Marioara, C.D., Andersen, S.J., Jansen, J. dan Zandbergen, H.W. 2003. The influence of temperature and storage time at RT on nucleation of the β "phase in a 6082 Al–Mg–Si alloy. *Acta Materialia* 51(3), hlm. 789–796. doi: 10.1016/S1359-6454(02)00470-6.
- Mihdar, U.H. dan Muttaqin, A.N. 2023. Sifat Mekanis & Struktur Mikro Aluminium Paduan (Al-Si) Pada Pengecoran Dengan Menggunakan Cetakan Berputar. *SINERGI* 21(1), hlm. 44–50.
- Mohammed, A. dan Abdullah, A. 2018. Scanning electron microscopy (SEM): A review. Dalam: *Proceedings of the 2018 international conference on hydraulics and pneumatics—HERVEX, Băile Govora, Romania*. hlm. 7–9.
- Nafi, M., Hartanti, L.P.S., Aziz, M.N.A., Wahid, I. dan Setiawan, A. 2025. Analysis of T5 Heat Treatment Parameters on the Hardness and Microstructure of Aluminum-Silicon Alloy. *Widya Teknik* 24(2), hlm. 85–90. doi: 10.33508/wt.v24i2.6108.
- Nanda, I.P. dan Afrinaldi, A. 2012. Pengaruh Penambahan Modifier Strontium (Sr) Terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro Master Alloy Al-7% Si. Dalam: *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XI (SNTTM XI) & Thermofluid IV*. hlm. 1508–1511.
- Nugroho, A.D. dan 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. *Approach: Jurnal Teknologi Penerbangan* 4(2), hlm. 95–102.
- Permatasari, D., Zuhaimi dan Jannifar, A. 2020. Analisa Sifat Mekanik Aluminium Alloy 6151 Setelah Mengalami Perlakuan Panas. *Jurnal Mesin Sains Terapan* 4(1), hlm. 1–5.
- Shieddieque, A.D. 2024. Pengaruh Variasi Media Quenching Terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro Material Paduan Al-Si-Cu-Fe. *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin* 13(2), hlm. 277–283.
- Sujatno, A., Salam, R., Bandriyana, B. dan Dimyati, A. 2015. Studi scanning electron microscopy (SEM) untuk karakterisasi proses oksidasi paduan zirkonium. *Jurnal Forum Nuklir (JFN)* 9(1), hlm. 44–50. doi: 10.17146/jfn.2015.9.1.3563.
- Sultan, A.Z. dan Hamzah, N. 2019. Pengaruh Solution Treatment Dan Artificial Aging Terhadap Sifat Mekanis Dan Struktur Mikro Paduan Aluminium A383. Dalam: *Prosiding Seminar Nasional Penelitian & Pengabdian Kepada Masyarakat*. hlm. 68–77.
- Sultan, A.Z., Tangkemanda, A., Djafar, I.A. dan Rantepadang, R.T. 2019. Pengaruh Perlakuan Panas Terhadap Sifat Mekanis dan Struktur Mikro Paduan Aluminium Silikon. *Jurnal SINERGI* 17(2), hlm. 203–210. doi: 10.31963/sinergi.v17i2.2083.
- Syahrudin, R., Muas, M., Ferdian, R. dan Nursyam, M. 2021. Analisis Struktur Mikro dan Kekerasan Paduan Aluminium ADC 12 Hasil Proses Pengecoran Semi Solid dengan Proses Perlakuan Panas. *Sinergi* 19(2), hlm. 146. doi: 10.31963/sinergi.v19i2.3019.
- Totten, G.E. 2016. Heat Treatment Practices of Age-Hardenable Aluminum Alloys. Dalam:

ASM Handbook Volume 4E. doi: 10.31399/asm.hb.v04e.9781627081696.
Zulhanif, Z. dan Hasymi, Z. 2023. Pengaruh Variasi Temperatur Artificial Aging Pada Aluminium 6061 Terhadap Sifat Kekerasan Dan Strukur Mikro. *MECHANICAL* 14(2), hlm. 184. doi: 10.23960/mech.v14i2.3662.

