

**PENGARUH TEMPERATUR *ARTIFICIAL AGING*
TERHADAP SIFAT KEKERASAN DAN
STRUKTUR MIKRO AI-2024**

(Skripsi)

Oleh:

Okta Rianda



**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2021**

ABSTRAK

THE EFFECT OF ARTIFICIAL AGE TEMPERATURE ON THE NATURE OF VIOLENCE AND MICRO STRUCTURE Al-2024

Oleh:

Okta Rianda

This study aims to determine the effect of artificial aging temperature on the hardness and microstructure of Al-2024. This study used a specimen in the form of Aluminum 2024 series which was heat treated with a temperature of 4500C for 15 minutes, then quenched with a cooling medium in the form of water. Subsequently, they were reheated with variations in temperature, namely 1500C, 1700C and 1900C with a holding time of 5 hours. Then the specimen is slowly cooled to room temperature.

The results of the chemical composition test using Spectromax showed the percentage of Al was 90.6% and Cu was 5.90%. The results of the hardness test using the Rockwell Hardness Tester obtained a hardness value without heat treatment which has a hardness value of 60.2 (HRB), a hardness value after quenching of 54.1 (HRB). The highest hardness value is found in heating with temperature variations at 1900C with a hardness value of 74.4 (HRB) where the hardness value at 1900C has an increase of 23.59% from the hardness value of the material without heat treatment. Microstructure testing showed that the Al-Cu material after the artificial aging process at a temperature of 1900 C had a higher number of phases and the Al-Cu grain boundaries tended to be more dense and regular. This means that the material that has been treated with artificial aging has precipitated deposits or the formation of a second phase which causes the material to be harder and have better mechanical properties.

ABSTRAK

PENGARUH TEMPERATUR *ARTIFICIAL AGING* TERHADAP SIFAT KEKERASAN DAN STRUKTUR MIKRO Al-2024

Oleh:

Okta Rianda

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh temperatur *artificial aging* terhadap sifat kekerasan dan struktur mikro Al-2024. Penelitian ini menggunakan spesimen berupa Aluminium seri 2024 yang diberi perlakuan panas dengan suhu 450⁰C selama 15 menit, kemudian di *quenching* dengan media pendingin berupa air. Selanjutnya diberi perlakuan panas kembali dengan variasi temperatur yakni 150⁰C, 170⁰C dan 190⁰C dengan holding time selama 5 jam. Kemudian spesimen didinginkan secara lambat dengan suhu ruangan.

Hasil uji komposisi kimia menggunakan *Spectromax* menunjukkan persentase Al sebesar 90,6% dan Cu sebesar 5,90%. Hasil uji kekerasan menggunakan Rockwell *Hardness Tester* didapatkan nilai kekerasan tanpa perlakuan panas yang memiliki nilai kekerasan sebesar 60,2 (HRB), nilai kekerasan setelah di *quenching* sebesar 54,1 (HRB). Nilai kekerasan tertinggi terdapat pada pemanasan dengan variasi temperatur pada 190⁰C dengan nilai kekerasan sebesar 74,4 (HRB) dimana nilai kekerasan pada temperatur 190⁰C mengalami peningkatan sebesar 23,59% dari nilai kekerasan bahan tanpa perlakuan panas. Pengujian struktur mikro didapatkan hasil material Al-Cu setelah proses *artificial aging* pada temperatur 190⁰ C memiliki fase θ dengan jumlah yang lebih banyak dan batas butir Al-Cu cenderung lebih rapat dan teratur. Hal ini berarti bahwa pada bahan yang mendapat perlakuan *artificial aging* terdapat endapan presipitat atau terbentuknya fasa kedua yang menjadi penyebab bahan tersebut lebih keras dan lebih baik sifat mekanisnya.

Kata Kunci: aluminium 2024, *artificial aging*, nilai kekerasan dan struktur mikro.

**PENGARUH TEMPERATUR *ARTIFICIAL AGING*
TERHADAP SIFAT KEKERASAN DAN
STRUKTUR MIKRO AI-2024**

Oleh

OKTA RIANDA

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik**



**JURUSAN TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2021**

Judul Skripsi : **PENGARUH TEMPERATUR ARTIFICIAL AGING TERHADAP SIFAT KEKERASAN DAN STRUKTUR MIKRO AI-2024**

Nama Mahasiswa : **Okta Rianda**

Nomor Pokok Mahasiswa : **1615021012**

Jurusan : **Teknik Mesin**

Fakultas : **Teknik**



Komisi Pembimbing 1

Zulhanif, S.T., M.T.
NIP. 19730402 200003 1 002

Komisi Pembimbing 2

Harnowo Supriadi, S.T., M.T.
NIP. 19690909 199703 1 00 2

Ketua Jurusan Teknik Mesin

Dr. Amrul, S.T., M.T.
NIP. 19710331 199903 100 3

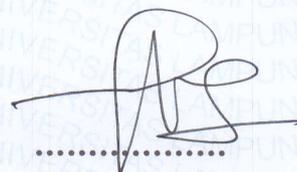
Kepala Program Studi S1
Teknik Mesin

Novri Tanti, S.T., M.T.
NIP. 19701104 199703 2 001

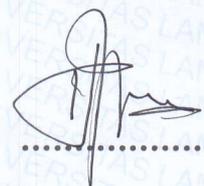
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

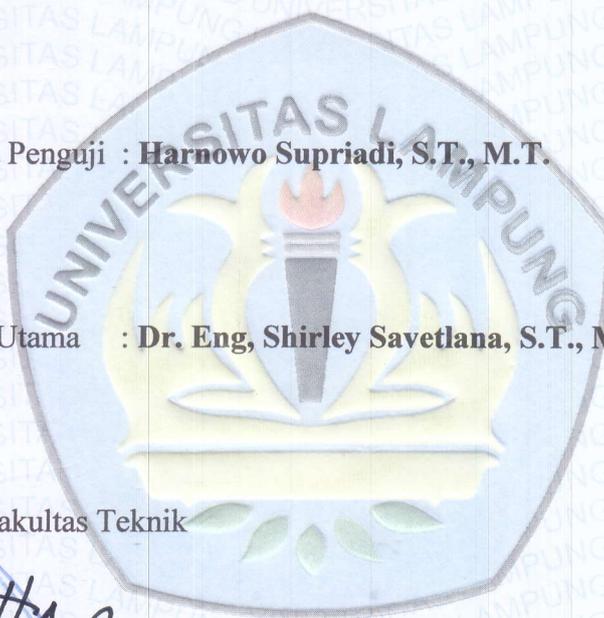
Ketua Penguji : **Zulhanif, S.T., M.T.**



Anggota Penguji : **Harnowo Supriadi, S.T., M.T.**



Penguji Utama : **Dr. Eng, Shirley Savetlana, S.T., M.Met.**



2. Dekan Fakultas Teknik



Prof. Drs. Ir. Suharno, Ph.D., IPU., ASEAN Eng.
NIP. 19620717 198703 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 13 September 2021

PERNYATAAN PENULIS

SKRIPSI INI DIBUAT SENDIRI OLEH PENULIS DAN BUKAN HASIL
PLAGIAT SEBAGAIMANA DIATUR DALAM PASAL 27 PENGATURAN
AKADEMIK UNIVERSITAS LAMPUNG DENGAN SURAT KEPUTUSAN
REKTOR No. 3187/H26/DT/2010.

YANG MEMBUAT PERNYATAAN



OKTA RIANDA
NPM. 1615021012

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Lahat pada tanggal 11 Oktober 1998. Penulis merupakan anak terakhir dari pasangan Bapak Masdulhak (Alm.) dan Ibu Yohanah, S.Pd. Penulis tinggal di Jalan Mayor Ruslan RT 04 RW 01 No. 58, Kelurahan Lahat Tengah, Kecamatan Lahat, Kabupaten Lahat. Nomor handphone penulis yaitu 082373536979. Penulis mengawali pendidikan formal di TK Pertiwi Lahat (2003-2004), SD Negeri 6 Lahat (2004-2010), SMP Negeri 1 Lahat (2010-2013), SMA Negeri 2 Lahat (2013-2016).

Pada tahun 2016, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN).

Selama menjadi mahasiswa, penulis pernah mengikuti organisasi BEM Fakultas Teknik pada bagian Sekretariat dan organisasi HIMATEM ada bagian minat dan bakat. Penulis melaksanakan Kerja Praktek (KP) di PT. Bukit Asam Tarahan Lampung pada bulan Januari-Februari 2020. Penulis juga melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Nantal, Kecamatan Lahat Selatan, Kabupaten Lahat pada tahun 2021. Pada Skripsi ini penulis melaksanakan penelitian dengan judul

“Pengaruh Temperatur *Artificial Aging* Terhadap Sifat Kekerasan dan Struktur Mikro Pada Al-2024” di bawah bimbingan Bapak Zulhanif, S.T., M.T dan Bapak Harnowo, S.T., M.T. dan sebagai pembahas Ibu Dr. Eng. Shirley Savetlana, S.T., M. Met.

Bandar Lampung, 16, September 2021

OKTA RIANDA

MOTTO

“Sesungguhnya bersama kesulitan itu ada kemudahan.”
(QS. Al-Insyirah: 6)

“Barang siapa memberi kemudahan kepada orang yang kesulitan maka Allah memberi kemudahan padanya di dunia dan akhirat. Barang siapa merintis jalan mencari ilmu maka Allah akan memudahkan baginya jalan ke surga.”
(HR. Muslim)

“Dan janganlah kamu berputus asa dari rahmat ALLAH. Sesungguhnya tiada berputus dari rahmat ALLAH melainkan orang-orang yang kufur”
(QS. Yusuf: 87)

“Jadilah!” Lalu jadilah ia.
(QS. Al-Baqarah: 117, QS. Maryam: 35, QS. Ali Imran: 47)

“Jangan takut membuat sebuah kesalahan. Tapi pastikan anda tidak melakukan kesalahan yang sama untuk kedua kali”
(Akio Morita)

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dengan menyebut nama Allah Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang

PERSEMBAHAN

Alhamdulillah hirobbil 'alamin, dengan mengucap rasa syukur kepada Allah SWT atas segala limpahan rahmad, rezeki dan karunia yang Engkau berikan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.

Teriring doa, rasa syukur dan segala kerendahan hati. Dengan segala cinta dan kasih sayang ku persembahkan karya ini untuk orang-orang yang sangat berharga dalam hidupku:

Ayahku (Masdulhak (Alm)) dan Ibuku (Yohanah, S.Pd)

Kedua orangtuaku terima kasih atas segala ilmu yang telah kalian berikan dan atas segala dukungan untuk menguatkanmu yang senantiasa mencintaiku dan menyayangiku dengan penuh kasih sayang dengan penuh kesabaran dalam mendidik, merawatku sedari kecil, mendoakanku agar aku menjadi orang yang sukses, mengorbankan segalanya untuk kebahagiaanmu dan cita-citaku, menasehatiku agar aku menjadi pribadi yang lebih baik lagi dan tidak pernah menyerah.

Kakak Perempuan (Aska Yulita) dan Kakak Laki-laki (Yoki, Nofernando dan Joni Sandra)

yang selalu memberikan semangat, kasih sayang dan menghiburku ketika aku sedang merasa sedih.

Para Pendidik

Para dosen dan guru-guruku, yang telah memberikan ilmu, nasihat, bimbingan, kesabaran, waktu, dan arahan yang telah diberikan.

Almamater tercinta, Universitas Lampung

SANWANCANA

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya sehingga skripsi ini dapat diselesaikan sebagai salah satu syarat untuk meraih gelar Sarjana Teknik Pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung. Skripsi ini berjudul “Pengaruh Temperatur *Artificial Aging* Terhadap Sifat Kekerasan dan Struktur Mikro Al-2024”.

Penulis menyadari dalam penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari peranan dan bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Kedua orang tua serta kakak-kakak yang selalu memberikan doa, dukungan, motivasi serta nasihat yang baik bagi penulis;
2. Prof. Dr. Karomani, M.Si. selaku Rektor Universitas Lampung;
3. Prof. Suharno, M.Sc., Ph.D. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung beserta staff dan jajarannya.
4. Bapak Dr. Amrul, S.T., M.T. sebagai ketua jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
5. Bapak Zulhanif, S.T.,M.T. sebagai dosen pembimbing satu yang selalu memberikan pengarahan dan bimbingan dalam menyelesaikan skripsi;

6. Bapak Harnowo, ST., M.T . sebagai dosen pembimbing dua yang memberikan saran-saran perbaikan, nasihat serta motivasi hingga skripsi ini dapat terselesaikan;
7. Ibu Dr. Eng. Shirley Savetlana, S.T., M.Met. sebagai dosen pembahas yang telah memberikan nasihat, motivasi, dan kritik serta masukan positif dalam penyelesaian skripsi ini;
8. Seluruh dosen dan Staff Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik yang telah mendidik, memberikan ilmu dan nasihat selama penulis menempuh pendidikan;
9. Intan Okta Nabilla yang selalu memberikan saran-saran dukungan, semangat dan doa selama penulis menyelesaikan skripsi;
10. Dedy, Jo, Iqbal, Nang dan seluruh patner mpuh material yang memberikan dukungan dan semangat dalam menyelesaikan skripsi ini;
11. Seluruh teman-teman Teknik Mesin Angkatan 2016 yang telah mendukung penulis untuk melaksanakan skripsi sampai selesai.

Penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat bagi para pembaca pada umumnya dan khususnya teman-teman Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung. Selain itu, penulis menyadari bahwa penulisan Skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran sebagai masukan untuk penyempurnaan penulisan ini di masa mendatang.

Bandar Lampung, 16, September 2021

Penulis

Okta Rianda

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR ISI.....	xvi
DAFTAR TABEL.....	xvii
DAFTAR GAMBAR	xviii

I PENDAHULUAN

A. Latar Belakang	1
B. Tujuan Penelitian	7
C. Batasan Masalah	7
D. Sistematika Penulisan	7

II TINJAUAN PUSTAKA

A. Perlakuan Panas (<i>Heat Treatment</i>)	9
B. <i>Precipitation Hardening</i>	10
C. Aluminium.....	13
D. Karakteristik Aluminium.....	14
E. Sifat Mekanik Aluminium	15
F. Paduan Aluminium Tembaga (Al-Cu).....	18
G. Pengujian Kekerasan / Uji <i>Hardness</i>	21
H. Struktur Mikro	27

III METODE PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat Penelitian.....	29
B. Alat dan Bahan	30
C. Prosedur Penelitian	33
D. Diagram Alir.....	37

IV HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Data dan Pembahasan Uji Komposisi Bahan Kimia	38
B. Data dan Pembahasan Uji Kekerasan	41
C. Data dan Pembahasan Stuktur Mikro	45

V SIMPULAN DAN SARAN

A. Simpulan	50
B. Saran	51

DAFTAR PUSTAKA	52
-----------------------------	----

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Sifat Mekanik Aluminium	17
2. Skala Kekerasan Metode Pengujian <i>Rockwell</i>	23
3. Skala Kekerasan dan Pemakaiannya.....	24
4. Spesifikasi Mesin <i>Furnace</i>	30
5. Spesifikasi Alat Uji Kekerasan	31
6. Data Hasil Pengujian Komposisi Bahan	39
7. Data Komposisi Bahan Kimia Aluminium	40
8. Perbandingan Nilai Kekerasan Bahan Antara Tanpa Perlakuan Panas dan Proses <i>Quenching</i>	41
9. Perbandingan Nilai Kekerasan Bahan Antara Tanpa Perlakuan, Setelah <i>Quenching</i> dan Setelah <i>Artificial Aging</i> Pada Suhu 150 ⁰ C.....	43
10. Perbandingan Nilai Kekerasan Bahan Antara Tanpa Perlakuan, Setelah <i>Quenching</i> dan Setelah <i>Artificial Aging</i> Pada Suhu 170 ⁰ C	44
11. Perbandingan Nilai Kekerasan Bahan Antara Tanpa Perlakuan, Setelah <i>Quenching</i> dan Setelah <i>Artificial Aging</i> Pada Suhu 190 ⁰ C	44

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Skema Proses Perlakuan Panas dengan Cara <i>Precipitation Hardenig</i>	11
2. Diagram Fasa Al-Cu.....	19
3. Struktur Mikro Material Awal	21
4. Struktur Mikro Material Setelah Proses Penuaan	21
5. Prinsip Kerja Metode Pengukuran Kekerasan <i>Rockwell</i>	24
6. Ilustrasi Pengujian Kekerasan dengan Metode <i>Brinell</i>	25
7. Pengujian Kekerasan dengan Metode <i>Vickers</i>	27
8. Tungku <i>Furnace</i>	30
9. Alat Uji Kekerasan	31
10. Gerinda Pemetong.....	32
11. Amplas	32
12. Aluminium 2024.....	33
13. Diagram Alir Penelitian	37
14. Potongan Bahan Pengujian Komposisi Bahan Kimia.....	38
15. Grafik Perbandingan Nilai Kekerasan Tanpa Perlakuan Dengan <i>Quenching</i>	42
16. Grafik Perbandingan Nilai Kekerasan Bahan Antara Tanpa Perlakuan, Setelah <i>Quenching</i> dan Setelah <i>Artificial Aging</i>	45
17. Struktur Mikro Al-Cu Sebelum Proses Perlakuan Panas (<i>Raw-Material</i>).....	46

18. Struktur Mikro Al-Cu Setelah Proses <i>Quenching</i>	46
19. Struktur Mikro Al-Cu Setelah Proses <i>Artificial Aging</i> Pada Temperatur 190 ⁰ C	48

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Perkebembangan industri pada abad 20 semakin berkembang pesat seiring dengan berkembangnya teknologi maupun kebutuhan manusia. Hal ini tak lepas dari pesatnya perindustrian di bidang otomotif, konstruksi dan industri lainnya yang sangat membutuhkan bahan-bahan teknik untuk menghasilkan produk-produk dengan kualitas yang baik. Bahan teknik secara umum digolongkan menjadi dua bahan yakni bahan logam dan bahan bukan logam. Bahan logam dibagi menjadi dua kelompok diantaranya adalah logam besi (*fero*) dan logam bukan besi (*non fero*). Logam *fero* merupakan logam paduan yang terdiri atas campuran unsur karbon dengan besi, seperti besi tempa, besi tuang dan baja, sedangkan logam *non fero* adalah logam yang tidak mengandung unsur besi (Fe) seperti tembaga, aluminium, timah dan lainnya. Contoh dari bahan bukan logam diantaranya adalah karet, plastik, asbes dan lainnya.

Penggunaan logam *fero* seperti besi dan baja saat ini banyak digunakan dalam perencanaan-perencanaan mesin serta dalam bidang konstruksi. Sedangkan penggunaan logam *non ferro* selalu mengalami peningkatan dari tahun ke

tahun adalah aluminium. Hal ini berdasarkan urutan penggunaan paduan aluminium yang menduduki urutan kedua setelah penggunaan logam besi atau baja dan menduduki urutan pertama untuk logam *non ferro* (Smith, 1995). Asosiasi Industri Pengecoran Logam Indonesia (Aplindo) menyatakan bahwa kebutuhan Aluminium di Indonesia saat ini mencapai 800.000 ton per tahun.

Indonesia merupakan produsen logam Aluminium terbesar pada tahun 2012 dengan produksi logam Aluminium sebesar 250.000 ton (Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2012). Produksi logam Aluminium akan memicu peningkatan penggunaan logam Aluminium di berbagai macam sektor industri. Aluminium adalah unsur logam yang paling berlimpah ke tiga yang ditemukan di kerak bumi. Logam Aluminium dan paduannya merupakan logam yang banyak digunakan dalam industri teknik maupun bidang teknik karena logam Aluminium dan paduannya memiliki sifat tahan terhadap korosi, memiliki bobot yang ringan, kekuatan tarik yang relatif tinggi, kemampuan mudah dibentuk (*formability*) yang baik dan sifat mekaniknya dapat ditingkatkan serta memiliki sifat mampu las (*weldability*) bervariasi yang tergantung dengan jenis paduannya (Mandal, 2005).

Penggunaan Aluminium dalam bidang industri otomotif mengalami peningkatan sejak tahun 1980 dan terus meningkat seiring dengan peningkatan jumlah kendaraan bermotor di Indonesia (Budinski, 2001). Komponen otomotif banyak yang berasal dari paduan Aluminium seperti piston, *cylinder head*, blok mesin, *valve* dan lainnya. Komponen otomotif yang berasal dari

paduan Aluminium dituntut untuk memiliki kekuatan yang baik. Agar memiliki kekuatan yang baik, aluminium dipadukan dengan unsur-unsur seperti: Cu, Si, Mg, Zn, Mn, Ni, dan sebagainya.

Paduan Aluminium-Tembaga (Al-Cu) banyak digunakan dalam komponen otomotif seperti pada komponen mesin yang bekerja pada temperatur tinggi, misalnya pada piston dan silinder *head* motor bakar. Kekerasan, kekuatan dan tahan terhadap deformasi pada suhu tinggi merupakan karakteristik sifat mekanik yang dibutuhkan untuk bahan dasar pembuatan piston sebuah *engine*. Sifat mekanik tersebut sangat dibutuhkan oleh piston sendiri karena kerja dari piston sangatlah berat. Kerja dari piston yaitu harus tahan terhadap beban *impact* akibat ledakan pembakaran bahan bakar yang bercampur udara pada ruang bakar, serta harus tahan terhadap keausan karena terus bergesekan dengan silinder *engine* dan harus memiliki nilai kekuatan yang tinggi agar tidak mudah terdeformasi (rusak atau pecah) saat beroperasi pada temperatur yang tinggi dan waktu operasi yang lama.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Santoso dan Nafi (2019) menyatakan bahwa paduan Aluminium-Tembaga (Al-Cu) sering digunakan karena dapat meningkatkan sifat mekanik seperti tingkat kekerasan maupun tarik serta dapat meningkatkan kemampuan pemesinan sampai kira-kira 12%. Diatas tingkat ini, campuran dasar Aluminium (Al-Cu) terlalu rapuh untuk keperluan teknik. Dibawah kondisi keseimbangan, sampai 5,65% Cu dapat larut dalam aluminium pada suhu padatan (Al-Cu) biner (549°C).

Berkurangnya pelarut padat ini merupakan akibat dari kelarutan padat yang turun sampai kurang dari 0,1% pada suhu ruang yang menghasilkan penerangan endapan yang baik sekali padauan Al-Cu untuk perlakuan panas.

Suhariyanto dalam jurnal Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan III 2015 Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya menyatakan bahwa paduan Al-Cu dalam jumlah tertentu akan menambah nilai kekerasan dan kekuatan serta dapat menurunkan daya terhadap korosi. Nilai kekerasan dan kekuatan tarik ini dipengaruhi oleh unsur tembaga (Cu). Aluminium dengan kandungan Cu 0,15 % didapat nilai UTS 34,26 kg/mm², *hardness* 93,72 Hv, *Elongation* 7,82 % dan IS 6,02 J/cm². Unsur paduan Al-Cu akan memperbaiki sifat-sifat mekanik dari Aluminium.

Subagyo (2017) melakukan penelitian mengenai proses *artificial aging* terhadap Aluminium seri 6061 dengan memberikan perlakuan panas pada temperatur 450⁰C selama 15 menit, kemudian *diquenching* dengan menggunakan oli sebagai media pendingin. Selanjutnya diberi perlakuan panas kembali pada suhu 190⁰C dengan variasi *holding time* 1 jam, 5 jam, dan 11 jam, lalu didinginkan secara lambat dengan suhu ruangan.. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai kekerasan tertinggi pada bahan dengan variasi *holding time* 5 jam sebesar 79,6 (HRB), dan mengalami penurunan nilai kekerasan pada bahan dengan variasi *holding time* 11 jam sebesar 50,4 (HRB), dikarenakan pada bahan tersebut sudah mengalami *over aging*. Hasil SEM EDX menunjukkan bahwa persentase unsur Al pada bahan dengan variasi

holding time 5 jam menurun dari persentase unsur Al pada bahan lainnya karena dihasilkan bahan yang lebih keras dan lebih baik sifat mekanisnya akibat mendapat perlakuan *artificial aging* dihasilkan endapan presipitat atau terbentuknya fasa kedua. Hasil penelitian uji kekerasan dan SEM EDX menunjukkan bahwa adanya pengaruh proses *artificial aging* terhadap bahan aluminium seri 6061, dimana bahan tersebut mengalami perubahan sifat mekanis yang lebih baik.

Angga (2018) mengemukakan bahwa perlakuan *aging* pada proses perlakuan panas dengan suhu 200⁰ C dapat meningkatkan kekerasan. Nilai kekerasan maksimum terjadi pada waktu 6 jam, namun nilai kekerasan akan menurun jika melewati waktu 6 jam tersebut. Dalam hal ini, waktu sangat berpengaruh terhadap kekerasan Al-Cu hasil *remelting* pada proses *aging*.

Sifat mekanis dari Al-Cu sangat dibutuhkan dan dipenuhi dalam komponen otomotif, maka dari itu diperlukan suatu peningkatan sifat mekanis dari paduan Aluminium-Tembaga (Al-Cu) tersebut. Peningkatan sifat mekanik dari logam paduan Aluminium-Tembaga (Al-Cu) dapat dilakukan dengan proses perlakuan panas. Proses perlakuan panas (*heat treatment*) merupakan proses perlakuan panas hingga temperatur tertentu kemudian didinginkan dengan menggunakan cara tertentu untuk memberikan sifat yang lebih baik (Sumpena dan Wardoyo, 2018).

Precipitation hardening adalah mekanisme perlakuan panas pada paduan aluminium yang bertujuan untuk meningkatkan nilai kekuatan dan kekerasan dari paduan aluminium tersebut. Kenaikan kekuatan ini dikarenakan terhambatnya pergerakan dislokasi yang merupakan akibat dari munculnya partikel-partikel kecil dalam skala nano yang tersebar rata pada matriks. Partikel – partikel kecil tersebut, pada umumnya disebut presipitat, timbul setelah paduan aluminium diberi perlakuan panas (Gede, 2016).

Penelitian yang dilakukan oleh Utama (2010) yang menyatakan bahwa penambahan Cu pada Al setelah diberi perlakuan panas dapat meningkatkan nilai kekerasan. Proses perlakuan panas *precipitation hardening* yang diterapkan pada Aluminium-Tembaga (Al-Cu) bertujuan agar dapat meningkatkan nilai kekerasan dan ketangguhan dari logam paduan aluminium tersebut secara signifikan.

Berdasarkan uraian teori di atas maka proses perlakuan panas (proses penuaan atau *aging*) telah biasa dilakukan pada paduan aluminium untuk meningkatkan kekuatannya. Pada penelitian ini akan dilakukan dengan menggunakan aluminium paduan Al-Cu dengan seri 2024 yang akan mendapat perlakuan panas pada temperatur 450°C dengan metode pendinginan *quenching* dan kemudian mendapat perlakuan *artificial aging* dengan variasi temperatur 150°C , 170°C dan 190°C . Dari penelitian diatas maka akan diketahui perbandingan kekerasan dan struktur mikro pada aluminium sebelum dan sesudah mendapat perlakuan *artificial aging*.

B. Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh temperatur *artificial aging* terhadap sifat kekerasan dan struktur mikro Al-2024.

C. Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bahan penelitian ini menggunakan paduan Aluminium-Tembaga seri 2024.
2. Proses perlakuan panas yang dilakukan adalah *artificial aging* .
3. Variasi temperatur *artificial aging* yang digunakan adalah 150⁰ C, 170⁰ C dan 190⁰ C
4. Pengujian yang dilakukan adalah uji komposisi kimia, uji *hardness* dan uji struktur mikro.

D. Sistematika Penulisan

Tugas akhir ini disusun atas beberapa bab dengan garis besar sebagai berikut:

BAB I : PENDAHULUAN

Pada bab ini berisikan latar belakang, tujuan penelitian, batasan masalah dan sistematika penulisan.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini berisikan landasan teori diantaranya mengenai perlakuan panas *precipitation hardening*, Aluminium (Al), paduan Aluminium-Tembaga (Al-Cu), sifat mekanik Al-Cu, pengujian kekerasan (*hardness*) dan uji struktur mikro .

BAB III : METODE PENELITIAN

Pada bab ini berisikan urutan dan tata cara penelitian dimulai dari tempat penelitian, alat dan bahan penelitian, prosedur penelitian dan diagram alir penelitian.

BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisikan penyajian data-data hasil dari penelitian.

BAB V : SIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisikan kesimpulan dari hasil yang didapatkan pada penelitian dan saran untuk pengembangan penelitian yang lebih lanjut.

DAFTAR PUSTAKA

Pada bagian ini berisikan literatur yang digunakan dalam penelitian dan penyusunan laporan.

LAMPIRAN

Pada bagian ini berisikan lampiran-lampiran dan data-data sebagai sumber yang diambil dari laporan ini.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Perlakuan Panas (*Heat Treatment*)

Perlakuan panas atau *heat treatment* adalah suatu metode yang digunakan untuk meningkatkan kekuatan pada Aluminium paduan (Pranata, 2014). Perlakuan panas merupakan suatu proses memanaskan hingga temperatur tertentu kemudian didinginkan menggunakan cara tertentu untuk menghasilkan sifat yang lebih baik (Sumpena, 2018). *Heat Treatment* bertujuan untuk mengubah struktur logam dengan cara memanaskan spesimen uji hingga mencapai suhu tertentu pada dapur *furnace* (tanur). Pemanasan dilakukan pada temperatur rekristalisasi yang dimiliki oleh masing-masing logam. Kemudian, spesimen uji didinginkan dalam media pendingin seperti air, air garam, udara, oli dan solar dimana setiap media pendingin tersebut memiliki kerapatan pendinginan yang berbeda-beda.

Sifat-sifat logam dipengaruhi oleh komposisi penyusunnya. Selain itu, sifat logam terutama sifat mekanik juga dipengaruhi oleh struktur mikro logam. Jika struktur mikronya dirubah, maka logam atau paduan akan memiliki sifat mekanis yang berbeda-beda. Perlakuan pemanasan atau pendinginan dengan kecepatan yang berbeda dapat mengakibatkan struktur dari logam dan paduan

berubah. Perlakuan panas dapat dilakukan untuk mengubah struktur logam. Sifat material logam yang diinginkan sesuai kebutuhan manusia dapat dilakukan dengan melakukan pengaturan kecepatan proses pendinginan dan batas temperatur yang digunakan selama proses pengujian (Nurlina, 2019).

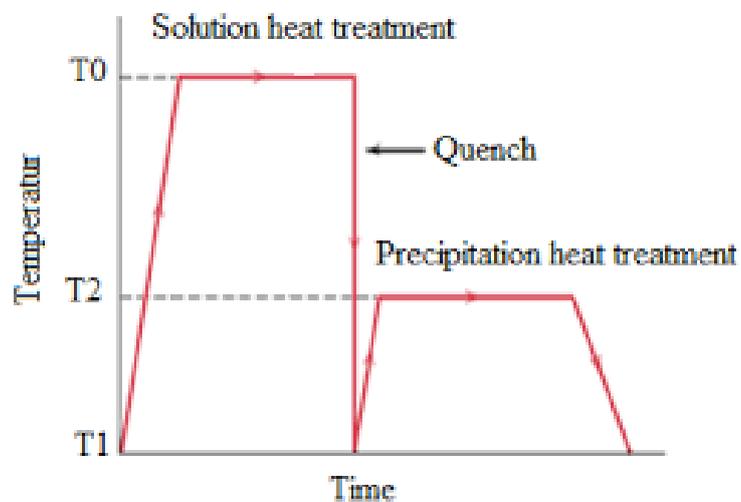
Proses perlakuan panas pada Aluminium paduan dilakukan dengan melakukan pemanasan sampai terjadi fase tunggal, kemudian dilakukan penahanan beberapa saat yang selanjutnya dilakukan pendinginan cepat sampai mengalami perubahan ke fase lain. Perubahan yang terjadi adalah pengendapan fase kedua atau presipitasi yang diawali dengan proses nukleasi dan munculnya kluster atom yang menjadi awal dari terbentuknya presipitat. Presipitat dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasannya. Proses ini merupakan proses *age hardening* yang disebut natural aging (Permatasari, 2020).

B. *Precipitation Hardening*

Hardening adalah memanaskan logam hingga mencapai temperatur tertentu dengan tidak merubah bentuk logam dan dilakukan penahanan dalam waktu beberapa lama pada temperatur tersebut. Kemudian, dilakukan pendinginan secara cepat (*quenching*), sehingga menimbulkan susunan yang keras. Perlakuan panas dengan cara ini bertujuan untuk meningkatkan kekerasan, ketahanan aus dan ketangguhan dengan kombinasi kekerasan. Proses

hardening ini menyebabkan pada susunan atom– atom yang teratur sehingga menimbulkan tegangan dan logam itu menjadi keras (Sumpena, 2018).

Precipitation hardening (penguatan presipitasi) adalah suatu proses dimana paduan aluminium atau baja diberi perlakuan panas. Tujuan dari proses ini pada Aluminium adalah untuk meningkatkan kekuatan dan kekerasan material tersebut (Rochman, 2010). Kenaikan kekuatan terjadi karena terjadi hambatan pergerakan dislokasi akibat dari timbulnya partikel-partikel kecil dalam skala nano yang tersebar rata pada matriks. Partikel-partikel kecil tersebut, pada umumnya disebut presipitat, timbul setelah paduan aluminium diberi perlakuan panas (Gede, 2016).



Gambar 1. Skema Proses Perlakuan Panas dengan Cara *Precipitation Hardening*
(Sumber: Callister, 2007).

Tahap pertama dalam proses *precipitation hardening* adalah *solution heat treatment*. Tahapan proses ini merupakan pemanasan logam paduan aluminium dalam dapur pemanas dengan temperatur kurang dari 577°C atau hingga

mencapai zona satu fasa kemudian dilakukan penahanan atau *holding time* sesuai dengan jenis dan ukuran benda kerja. Pada tahaan ini terjadi pelarutan fasa-fasa yang ada menjadi larutan padat. Tujuan dari proses ini yaitu untuk mendapatkan larutan padat yang mendekati homogen (fasa tunggal) (Gede, 2016).

Tahap kedua adalah *quenching*, tahap ini merupakan tahap yang paling kritis dalam proses perlakuan panas, yaitu dengan cara mendinginkan logam yang telah dipanaskan dalam dapur pemanas kedalam media pendingin biasanya digunakan air. Tujuan dilakukan *quenching* adalah agar larutan padat homogen yang terbentuk pada *solution heat treatment* dan kekosongan atom dalam keseimbangan termal pada temperatur tinggi tetap pada tempatnya (Paryono, 2011).

Tahapan yang ketiga adalah penuaan (*aging*) pada paduan aluminium yang dibagi menjadi dua jenis yaitu yaitu penuaan alami (*natural aging*) dan penuaan buatan (*artificial aging*). Tahap ketiga ini merupakan tahapan dimana α jenuh dan α_{SS} dipanaskan di bawah suhu *solvus* untuk menghasilkan endapan halus terdispersi. Atom berdifusi hanya pada jarak pendek di temperatur *aging*. Karena α jenuh tidak stabil, atom tembaga tambahan berdifusi ke nukleasi dan presipitat tumbuh. Tujuan dari *precipitation hardening* adalah pembentukan endapan terdispersi halus. Dalam proses *precipitation hardening* paduan Al – Si – Cu, dikenali 3 struktur yaitu yang

pertama adalah GP – 1 zona, GP – 2 zona (juga disebut θ''), fasa θ' , dan fasa θ - (CuAl₂) (Gede, 2016).

C. Aluminium

Aluminium pertama kali ditemukan oleh Sir Humphrey Davy pada tahun 1809 sebagai suatu unsur dan direduksi pertama kali sebagai logam oleh H. C. Oersted pada tahun 1825. Pada tahun 1886, Paul Heroul di Prancis dan C. M. Hall di Amerika Serikat secara terpisah sudah mendapatkan logam aluminium dari alumina dengan cara elektrolisa dari garam yang terfusi. Penggunaan aluminium sebagai logam mendapat pada urutan yang kedua setelah baja dan besi yang tertinggi diantara logam non *ferro* (Utama, 2009).

Aluminium merupakan logam ringan yang mempunyai ketahanan korosi yang baik dan hantaran listrik yang baik. Aluminium memiliki kelebihan yaitu memiliki massa jenis yang rendah, harga yang relatif murah, konduktor listrik dan panas yang baik, kemampuan menahan korosi, serta ketahanan oksidasi (Aziz, 2017). Kekuatan mekanik pada Aluminium dapat ditingkatkan dengan penambahan unsur padu, seperti Cu, Mg, Zn, Mn dan Ni (Santoso, 2018). Peningkatan kekuatan mekanik Aluminium dapat dilakukan dengan menambahkan unsur Cu, Mg, Si, Mn, Zn, Ni dan sebagainya dengan cara satu persatu atau bersama-sama yang dapat memberikan sifat-sifat baik lainnya seperti ketahanan korosi, tahan terhadap aus, memiliki koefisien pemuaian rendah dan sebagainya. Penggunaannya material ini bukan hanya digunakan untuk peralatan rumah tangga, tetapi dapat digunakan juga sebagai keperluan

material pesawat terbang, mobil, kapal laut, konstruksi dan sebagainya (Utama, 2009).

D. Karakteristik Aluminium

Aluminium dalam pemakaiannya saat ini semakin meluas karena Aluminium memiliki sifat-sifat yang sangat baik dan jika dipadukan dengan logam lain dapat mendapatkan sifat-sifat yang tidak bisa ditemui pada logam lain. Adapun sifat-sifat dari Aluminium adalah ringan, tahan korosi, penghantar panas dan listrik yang baik. Aluminium memiliki berat jenisnya hanya sebesar 2,7 sehingga meskipun memiliki kekuatan yang rendah tetapi strength to weight rasionya lebih tinggi dari baja, hal inilah yang mengakibatkan Aluminium banyak digunakan pada konstruksi yang menuntut sifat ringan seperti alat-alat transport terutama pesawat terbang (Saefulloh, 2018).

Aluminium memiliki sifat tahan korosi karena terbentuknya lapisan oksid Aluminium pada permukaan Aluminium. Lapisan oksid ini menempel pada bagian permukaan dengan kuat dan rapat serta sangat stabil (tidak bereaksi dengan lingkungannya) sehingga dapat melindungi bagian yang lebih dalam. Lapisan oksid ini menyebabkan tahan korosi tetapi namun juga dapat mengakibatkan Aluminium menjadi sulit dilas dan disolder (titik leburnya lebih dari 2000°C).

Aluminium komersial mengandung beberapa *impurity* (0,8%), seperti besi, silicon, tembaga dan lainnya. *Impurity* dapat menurunkan sifat hantar listrik dan sifat tahan korosi (walaupun tidak begitu besar) tetapi juga dapat menaikkan kekuatan hampir dua kali lipat dari aluminium murni. Kekuatan dan kekerasan dari aluminium tidak terlalu tinggi, namun sifat ini dapat diperbaiki dengan pemaduan dan proses perlakuan panas. Kelemahan yang paling serius dapat dilihat dari segi teknik yakni sifat elastisitasnya yang sangat rendah dan hampir tidak dapat diperbaiki baik dengan pemaduan, maupun dengan proses perlakuan panas (Rhandiko,2014).

E. Sifat Mekanik Aluminium

Adapun sifat-sifat mekanik dari aluminium adalah sebagai berikut:

1. Kekuatan Tarik

Kekuatan tarik adalah besar tegangan yang didapat ketika dilakukan pengujian tarik. Kekuatan tarik dilihat dari nilai tertinggi dari tegangan pada kurva tegangan-regangan hasil dari pengujian dan pada saat terjadinya *necking*. Kekuatan tarik bukanlah suatu ukuran kekuatan yang dapat terjadi di lapangan, tetapi kekuatan tarik dapat dijadikan suatu acuan terhadap kekuatan bahan. Aluminium murni memiliki kekuatan tarik yang sangat rendah yakni sekitar 90 MPa, sehingga dalam penggunaan yang membutuhkan kekuatan tarik yang tinggi aluminium perlu dipadukan. Aluminium yang dipadukan dengan logam lain yang diberi berbagai

perlakuan termal dapat mengakibatkan aluminium paduan akan memiliki kekuatan tarik sampai dengan 600 Mpa (paduan 7075)

2. Kekerasan

Kekerasan merupakan kumpulan dari berbagai sifat bahan yang mencegah terjadinya deformasi terhadap bahan tersebut ketika diaplikasikan suatu gaya. Kekerasan suatu bahan dipengaruhi oleh plastisitas, elastisitas, kekuatan tarik, *ductility*, viskoelastisitas dan lain sebagainya. Kekerasan dapat diukur dan diuji menggunakan berbagai metode. Metode yang umum digunakan untuk menguji kekerasan adalah metode *Brinell*, *Vickers*, *Mohs* dan *Rockwell*. Aluminium murni memiliki nilai kekerasan sangat kecil, yakni sekitar 20 skala Brinell, sehingga dengan adanya sedikit gaya dapat mengakibatkan perubahan bentuk pada logam. Untuk aplikasi yang membutuhkan kekerasan, diperlukan pepaduan aluminium dengan logam lain dan atau diberi perlakuan termal atau fisik. Paduan Aluminium yang memiliki kandungan Cu sebesar 4,4% lalu dilakukan *quenching* dan kemudian disimpan pada temperatur yang tinggi dapat menghasilkan tingkat kekerasan Brinell sebesar 160.

3. *Ductility* (kelenturan)

Ductility merupakan sifat mekanis dari suatu bahan untuk menjelaskan seberapa jauh bahan dapat diubah bentuk secara plastis tanpa mengalami retakan. Pada pengujian tarik, *ductility* ditunjukkan dengan bentuk *neckingnya*. Material yang memiliki *ductility* tinggi akan mengalami

necking yang sangat sempit, sedangkan bahan yang memiliki *ductility* rendah maka hampir tidak akan mengalami *necking*. Pada pengujian tarik, *ductility* diukur menggunakan skala yang disebut elongasi. Elongasi merupakan seberapa besar pertambahan panjang suatu bahan pada saat dilakukan pengujian kekuatan tarik. Elongasi ditunjukkan dalam persentase pertambahan panjang per panjang awal bahan yang diujikan.

4. *Recyclability* (daya untuk didaur ulang)

Aluminium merupakan salah satu bahan yang dapat didaur ulang tanpa menurunkan kualitas awalnya. Peleburan aluminium hanya memerlukan sedikit energi yaitu sekitar 5% dari energi yang diperlukan untuk diperlukan untuk memproduksi logam utama yang diperlukan dalam proses daur ulang.

5. *Reflectivity* (daya pemantulan)

Aluminium merupakan reflektor baik yang berasal dari cahaya dan panas serta bobot yang ringan, sehingga Aluminium menjadikan ideal untuk bahan reflektor seperti atap.

Tabel 1. Sifat Mekanik Aluminium

Sifat-Sifat	Kemurnian			
	99.996		>99.0	
	Dianil	75% Dirol Dingin	Dianil	H18
Kekuatan tarik (kg/mm ²)	4.9	11.6	9.3	16.9
Kekuatan mulur (0.2%) (kg/mm ²)	1.3	11.0	3.5	14.8
Perpanjangan (%)	48.8	5.5	35	5
Kekerasan <i>Brinell</i>	17	27	23	44

(Sumber: Surdia, 1985).

F. Paduan Aluminium-Tembaga (Al-Cu)

Secara umum penambahan logan paduan hingga konsentrasi tertentu akan meningkatkan kekuatan tensil dan kekerasan serta menurunkan titik lebur., Kekuatan Alumunium paduan tidak hanya bergantung pada paduannya saja, tetapi juga bergantung ada proses-proses perlakuan Aluminium paduan dengan cara perlakuan panas, penempaan dan sebagainya hingga siap untuk digunakan. Paduan Aluminium diklasifikasikan oleh berbagai negara di dunia. *Aluminium Association America* (AA) merupakan standae Aluminium yang terkenal dan sempurna yang didasarkan atas standar dari Alcoa (*Aluminium Company of America*).

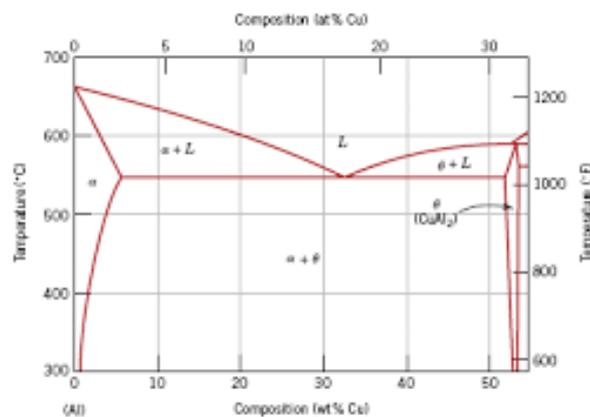
Tembaga termasuk salah satu logam penting sebagai bahan teknik yang banyak digunakan dalam keadaan murni maupun dalam bentuk paduan (Haryanto, 2018). Tembaga (Cu) adalah salah satu logan *non fero* yang banyak digunakan sebagai paduan Aluminium. Tembaga merupakan logam yang memiliki sifat penghantar panas dan listrik yang baik, lunak dan liat, memiliki kesiapan membentuk campuran-campuran, lebih merata pada waktu pendinginan, dapat dikerjakan dalam waktu dingin maupun panas, memiliki ketahanan terhadap korosi-korosi serta memiliki kekuatan tarik yang lebih besar pada suhu yang lebih rendah (Angga, 2018).

Unsur Cu sebagai paduan akan meningkatkan kekuatan dan ketahanan lelah (*fatigue*). Tembaga yang dipadukan dengan Aluminium akan meningkatkan

kekuatan dan kekerasan serta meningkatkan kemampuan permesinan sampai kira-kira 12%Cu. Jika persentase Cu yang ditambahkan melebihi dari 12%, maka campuran dasar aluminium (Al-Cu) terlalu rapuh untuk keperluan teknik. Di bawah kondisi keseimbangan, sampai 5.65% Cu dapat larut dalam aluminium pada suhu padatan (Al-Cu) biner (549°C). Kelarutan padat berkurang akibat dari turunnya kelarutan padat hingga kurang dari 0.1% pada suhu ruang dan hal ini menghasilkan endapan yang baik sekali untuk paduan Al-Cu dalam perlakuan panas. Kadar Cu yang meningkat menghasilkan ketahanan yang rendah terhadap korosi (Santoso, 2019).

Peningkatan kekuatan logam dapat dilakukan dengan cara mengusahakan agar fasa kedua yang terjadi berbentuk halus dan tersebar merata. Penambahan unsur Cu pada Aluminium dengan jumlah tertentu akan menghasilkan dua kemungkinan yaitu:

1. Atom-atom Cu dapat larut dalam sel satuan aluminium (α).
2. Atom-atom Cu akan membentuk senyawa CuAl_2 (θ) yang merupakan fasa kedua.



Gambar 2. Diagram Fasa Al-Cu
(Sumber: *Metals Handbook*, 1973).

Berdasarkan diagram fasa Al-Cu di atas dapat dilihat bahwa pada temperatur 547°C terjadi kelarutan Cu dalam logam Al maksimum 5,7% (berat) dan mengalami penurunan pada temperatur kamar menjadi 0,05%. Khusus untuk paduan Al-Cu dengan kadar Cu 2,5%, maka ketika berada pada suhu kamar fasanya adalah α dan CuAl_2 . Jika dipanaskan melewati garis kelarutan (*solvus line*), maka hal ini mengakibatkan perubahan fasa menjadi α . Pada pemanasan ini, fasa kedua CuAl_2 akan terurai dan atom-atom Cu akan larut padat semuanya dalam α . Jika setelah pemanasan dilakukan *quenching*, maka hal ini akan mengakibatkan maka atom-atom Cu yang larut padat tersebut tidak sempat berdifusi keluar dari fasa α dengan demikian maka fasa kedua CuAl_2 tidak akan terbentuk.

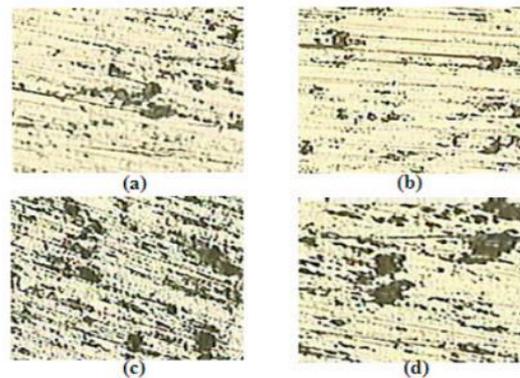
Quenching akan menghasilkan fasa α yang kelarutan Cu-nya lewat jenuh (*super saturated solid solution*). Keadaan *super saturated solid solution* (ssss) ini tidak stabil, sehingga ketika sampai pada suhu kamar atom-atom Cu yang larut “terpaksa” akan berdifusi keluar dari α dan membentuk endapan (*precipitation*) pada suhu kamar. Partikel endapan yang terbentuk memiliki ukuran yang sangat kecil dan menyebar secara rata sehingga diperoleh fasa $\alpha + \theta'$ (GP1-Zone). Karena pengendapan partikel tersebut ditentukan oleh laju difusi, maka ukuran endapan sangat ditentukan oleh temperatur dan waktu dimana difusi tersebut berlangsung. Jika endapan dilakukan ketika suhu tinggi, maka terjadi proses yang dikenal dengan istilah “*artificial aging*”. Ukuran partikel endapan lebih besar jika dibandingkan dengan pengendapan yang terjadi pada suhu kamar sehingga terbentuk fasa $\alpha + \theta''$ (GP2-Zone). Proses

artificial aging berlangsung pada temperatur $\pm 200^{\circ}\text{C}$ yaitu pada temperatur *rekristalisasi*. Pada proses *precipitation hardening* dapat dicapai kekerasan dan kekuatan maksimum dalam keadaan *artificial aging*.

Penelitian yang dilakukan oleh Rohman (2010) diperoleh hasil pengamatan mikroskop optik mengenai struktur mikro Al-Cu yang ada pada material awal maupun yang telah mengalami perlakuan penuaan. Pada Gambar 6 menunjukkan struktur mikro material aluminium yang belum mengalami perlakuan panas dan pada gambar 7 diperoleh hasil mengenai aluminium yang diberi perlakuan *artificial aging*. Pembesaran yang diambil adalah 200 x dengan etsa keller's reagent. Hasil metalografi menunjukkan adanya fasa alpha dan fasa θ .



Gambar 3. Struktur mikro material awal menunjukkan adanya daerah gelap yang merupakan daerah fasa kedua (θ°), dan daerah terang yang merupakan larutan padat alpha, pembesaran 200 x etsa *keller's reagent*



Gambar 4. Struktur mikro paduan Al 2024-T81 setelah mengalami proses penuaan dengan variasi lama pemanasan (a) 5 jam (b) 6 jam, (c) selama 7 jam dan (d) 8 jam dengan spesifikasi pengambilan gambar pembesaran 200 x etsa *keller's reagent*

(Sumber: Rohman, 2010)

G. Pengujian Kekerasan / Uji *Hardness*

Kekerasan merupakan kemampuan bahan untuk tahan terhadap indentasi/ penetrasi atau abrasi. Kekerasan suatu bahan boleh jadi merupakan sifat mekanik yang paling penting, karena pengujian sifat ini dapat digunakan untuk menguji homogenitas suatu material, selain itu dapat digunakan untuk mengetahui sifat-sifat mekanik yang lainnya (Sidi, 2015). Kekerasan merupakan ukuran ketahanan material terhadap deformasi tekan. Deformasi yang terjadi yakni berupa kombinasi elastis dan plastis. Deformasi atau plastis dapat terjadi karena permukaan dari dua komponen mengalami persinggungan dan bergerak satu terhadap lainnya. Deformasi elastis terjadi pada permukaan yang keras, sedangkan deformasi plastis terjadi pada bagian permukaan yang lebih lunak (Dahlan, 2000).

Pengujian kekerasan atau *hardness* dilakukan dengan cara memberikan penekanan pada bidang benda uji dengan menggunakan indentor dan beban tertentu. Indentor yang digunakan berasal dari material yang lebih keras dari benda uji. Tujuan dari dilakukannya pengujian kekerasan adalah untuk mengetahui karakteristik suatu material baru dan untuk melihat mutu serta memastikan suatu material memiliki kualitas dengan spesifikasi tertentu (Angga, 2018).

Dalam dunia teknik terdapat 3 macam metode pengujian kekerasan yaitu pengujian kekerasan *Rockwell*, Pengujian kekerasan *Brinell* dan pengujian kekerasan *Vickers*. Pengujian kekerasan metode *Rockwell* bertujuan untuk

menentukan kekerasan suatu material dalam bentuk daya tahan material terhadap indentor yang berupa bola baja atau kerucut yang ditekan pada permukaan material uji. Standar skala kekerasan metode pengujian *Rockwell* ditunjukkan pada tabel di bawah ini:

Tabel 2. Skala Kekerasan Metode Pengujian *Rockwell* (Callister, 2007)

Skala	Penekan	Beban			Skala Kekerasan	Warna Angka
		Awal	Utama	Jumlah		
A	Kerucut intan 120°	10	50	60	100	Hitam
B	Bola baja 1,558 mm (1/16")	10	90	100	130	Merah
C	Kerucut intan 120°	10	140	150	100	Hitam
D	Kerucut intan 120°	10	90	100	100	Hitam
E	Bola baja 3,175 mm (1/8")	10	90	100	130	Merah
F	Bola baja 1,558 mm	10	50	60	130	Merah
G	Bola baja 1,558 mm	10	140	150	130	Merah
H	Bola baja 3,175 mm	10	50	60	130	Merah
K	Bola baja 3,175 mm	10	140	150	130	Merah
L	Bola baja 6,35 mm (1/4")	10	50	60	130	Merah
M	Bola baja 6,35 mm	10	90	100	130	Merah
P	Bola baja 6,35 mm	10	140	150	130	Merah
R	Bola baja 12,7 mm (1/2")	10	50	60	130	Merah
S	Bola baja 12,7 mm	10	90	100	130	Merah
V	Bola baja 12,7 mm	10	140	150	130	Merah

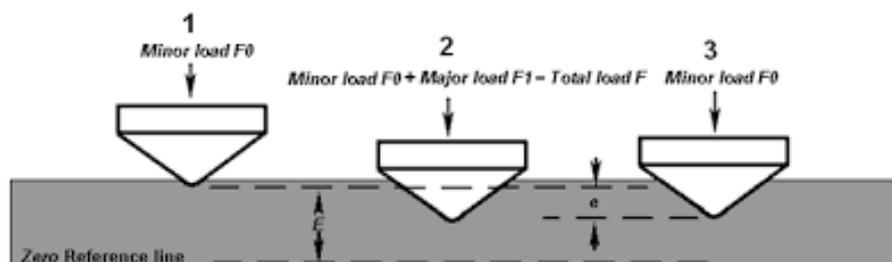
Untuk cara pemakaian skala diatas, terlebih dahulu menentukan dan memilih ketentuan angka kekerasan maksimum yang boleh digunakan oleh skala tertentu. Jika tidak tercapai angka kekerasan yang akurat pada skala tertentu, maka langkah selanjutnya yaitu menentukan skala lainnya yang dapat menunjukkan angka kekerasan yang jelas. Berdasarkan rumus tertentu, skala ini memiliki standar atau acuan, dimana acuan dalam menentukan dan memilih

skala kekerasan dapat diketahui melalui tabel 8 dibawah ini yang merupakan skala kekerasan dan pemakaiannya dalam proses uji kekerasan metode *rockwell* yang digunakan untuk setiap bahan tertentu, seperti berikut ini :

Tabel 3. Skala Kekerasan dan Pemakaiannya (Callister, 2007)

Skala	Pemakaiannya
A	Untuk <i>carbide cementite</i> , baja tipis, dan baja dengan lapisan keras yang tipis
B	Untuk paduan tembaga, baja lunak, paduan alumunium, dan besi tempa
C	Untuk baja, besi tuang keras, besi tempa peritik, titanium, baja dengan lapisan keras yang dalam, dan bahan-bahan lain yang lebih keras daripada skala B-100
D	Untuk baja tipis, baja dengan lapisan keras yang sedang, dan besi tempa peritik
E	Untuk besi tuang, paduan alumunium, magnesium, dan logam-logam bantalan
F	Untuk paduan tembaga yang dilunakkan dan pelat lunak yang tipis
G	Untuk besi tempa, paduan tembaga, nikel-seng, dan tembaga-nikel
H	Untuk alumunium, seng, dan timbal
K	Untuk logam, bantalan, dan logam yang sangat lunak lainnya, atau bahan-bahan tipis
L	Untuk logam, bantalan, dan logam yang sangat lunak lainnya, atau bahan-bahan tipis
M	Untuk logam, bantalan, dan logam yang sangat lunak lainnya, atau bahan-bahan tipis
P	Untuk logam, bantalan, dan logam yang sangat lunak lainnya, atau bahan-bahan tipis
R	Untuk logam, bantalan, dan logam yang sangat lunak lainnya, atau bahan-bahan tipis
S	Untuk logam, bantalan, dan logam yang sangat lunak lainnya, atau bahan-bahan tipis
V	Untuk logam, bantalan, dan logam yang sangat lunak lainnya, atau bahan-bahan tipis

Untuk mendapatkan besarnya nilai kekerasan dengan menggunakan pengujia *Rockwell* dilakukan dengan cara menekan benda uji pada indenter dengan beban minor kemudian ditekan dengan beban mayor. Kemudian beban mayor diambil sehingga tersisa beban minor, dimana indenter ditahan (Angga, 2018).



Gambar 5. Prinsip Kerja Metode Pengukuran Kekerasan *Rockwell*
(Sumber: Hadi, 2011)

Besarnya nilai kekerasan material dengan menggunakan metode *Rockwell* dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut:

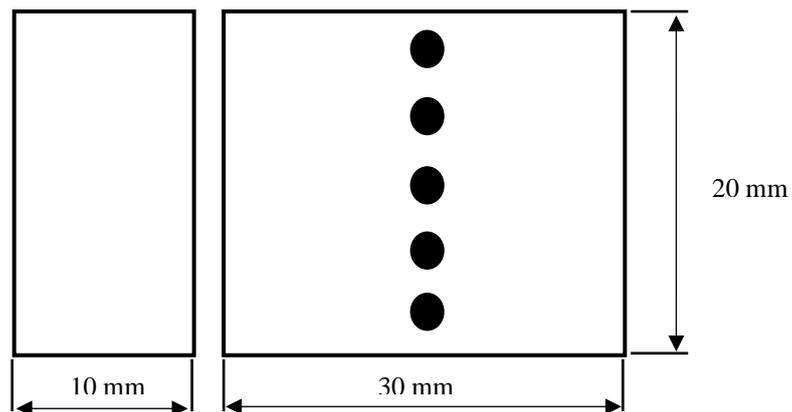
$$H_R = E - e$$

Keterangan:

E: Jarak antara kondisi 1 dan kondisi 3 yang dibagi dengan 0.002

e: antara indentor saat diberi beban minor dan *zero reference line* yang dapat dilihat ada tabel 8.

Pengujian kekerasan *Brinell* dilakukan dengan menggunakan alat kekerasan *Brinell*. Pengujian ini menggunakan bola baja keras. Pemilihan beban dalam pengujian ini tergantung dari kekerasan material yang diuji. Semakin keras material, maka beban yang digunakan semakin besar, begitu juga sebaliknya. Pengujian ini memerlukan permukaan benda uji yang datar dan halus agar lebih mudah dalam melakukan pengujian (Angga, 2018).



Gambar 6. Ilustrasi Pengujian Kekerasan dengan Metode *Brinell*
(Sumber: Gede, 2016)

Angka kekerasan dengan metode *Brinell* dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut:

$$BHN = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Keterangan:

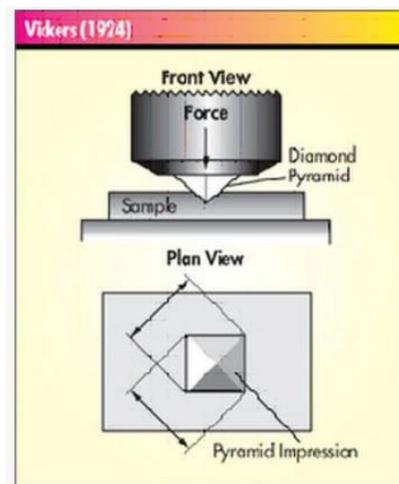
P: Beban yang diberikan pada indenter (kg)

D: Diameter indenter (mm)

d: Diameter bekas injakan indenter (mm)

(Angga, 2018).

Pengujian kekerasan *vickers* didasarkan pada penekanan indenter yang berbentuk *pyramid diamond* terbalik dengan sudut puncak 136° ke permukaan logam yang akan diuji kekerasannya, dimana permukaan logam yang diuji harus rata dan bersih. Proses pengujian dilakukan setelah gaya tekan secara statis pada permukaan benda uji, kemudian ditiadakan dan *pyramid diamond* dikeluarkan dari bekas yang terjadi, maka diagonal segi empat bekas teratas diukur secara teliti. Permukaan bekas merupakan segi empat karena *pyramid* merupakan piramida sama sisi (Angga, 2018).



Gambar 7. Pengujian Kekerasan dengan Metode *Vickers*
(Sumber: Angga, 2018).

Nilai kekerasan *Vickers* dapat ditentukan dengan menggunakan rumus berikut:

$$Hv = \frac{2F \sin \theta_2}{D^2} = \frac{1.8554F}{D^2}$$

Keterangan:

F: Bebam yang digunakan (kg)

D: Panjang diagonal rata-rata (mm)

θ : Sudut antara permukaan *diamond* yang berhadapan (136°)

H. Struktur Mikro

Struktur yang terdapat dalam suatu material dalam susunan yang sangat kecil adalah struktur mikro. Struktur mikro hanya dapat diketahui menggunakan mikroskop yang mampu melakukan pembesaran yang baik seperti mikroskop elektron, mikroskop sinar x dan mikroskop ion. Pengamatan struktur mikro diawali dengan memotong material uji yang akan kita amati. Selanjutnya

material yang telah dipotong, kemudian diampelas hingga halus. Pengamplasan ini dilakukan berulang kali dari amplas yang kasar hingga halus. Arah pengamplasan harus berubah-ubah setiap step nya. Setelah halus, permukaan material dipoles menggunakan metal polish hingga mengkilap, tidak ada goresan dan seperti kaca. Kemudian dilakukan pengetsaan dengan cara mencelupkan material ke dalam larutan etsa dengan posisi permukaan yang akan di etsa menghadap keatas. Saat pencelupan akan terjadi reaksi pada permukaan benda uji oleh sebab itu larutan yang mengenai permukaan benda uji harus tersirkulasi, maka benda uji harus digerak-gerakkan. Kemudian benda uji harus dicuci hingga bersih lalu dikeringkan dan dilihat atau difoto menggunakan mikroskop. Pada pemeriksaan struktur mikro akan menghasilkan bentuk struktur, ukuran dan bagian struktur mikro yang berbeda (Zainuri, 2011)

III. METODE PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat Penelitian

Adapun waktu dan tempat dilaksanakannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

a. Waktu Penelitian

Penelitian ini akan dilaksanakan pada tanggal 01 Maret sampai dengan 31 Agustus 2021.

b. Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di beberapa tempat yaitu:

1. Proses perlakuan panas dilakukan di Laboratorium Material Teknik, Universitas Lampung.
2. Pengujian Struktur Mikro dilakukan di Laboratorium LIPI Tanjung Bintang Lampung.
3. Pengujian kekerasan dilakukan di Laboratorium Material Teknik dan Laboratorium Metrologi Industri, Universitas Lampung.

B. Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam melakukan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Alat

Adapun alat yang digunakan untuk penelitian ini adalah:

a. Tungku *Furnace*

Tungku *furnace* yang digunakan adalah tungku *furnace* yang terdapat di Laboratorium Material Teknik Mesin Universitas Lampung yang digunakan untuk memberikan perlakuan panas pada Aluminium 2024.



Gambar 8. Tungku *Furnace*

Tabel 4. Spesifikasi Mesin *Furnace*

Model	L64/14
Tahun	2000
Frekuensi	50 Hz
Temperatur	Max 1400°C
Daya	13,0 kW
Arus	16/16/28 A

b. Alat Uji Kekerasan

Alat uji kekerasan (*hardness tester*) yang digunakan adalah Alat uji kekerasan (*hardness tester*) yang terdapat di Laboratorium Material Teknik Mesin Universitas Lampung dengan standar DIN 50103. Alat ini

digunakan untuk menguji tingkat kekerasan Aluminium-2024 sebelum dan sesudah mendapat perlakuan panas Adapun pengujian kekerasan dalam penelitian ini menggunakan metode *rockwell* dan menggunakan indenter bola baja 1/8”.



Gambar 9. Alat Uji Kekerasan

Tabel 5. Spesifikasi Alat Uji Kekerasan

Nama alat	<i>Hardness Tester</i>
<i>Pre Load</i>	10 kgf (98,07 N)
<i>Test Load</i>	60 -100 – 150 <i>Rockwell</i>
	63,5 – 125 – 187,5 <i>Brinell</i>
	10-60 <i>Vickers</i>
<i>Working</i>	<i>Rockwell traditional – electronic control</i>
<i>Feasible Test</i>	<i>Rockwell, Brinell + Vickers</i>
<i>Hight and Depth Capasity</i>	215 x 190 mm
<i>Diameter of coloumn and anvil</i>	60 x 60 mm
<i>Max load</i>	1.000 kg

c. Gerinda Pemotong

Gerinda pemotong digunakan untuk memotong spesimen yang akan diuji kekerasannya sesuai dengan ukuran yang telah ditetapkan yakni dengan ukuran panjang spesimen adalah 15 mm dan diameter sebesar 25 mm.



Gambar 10. Gerinda Pematong

d. Amplas

Amplas berfungsi sebagai penghalus permukaan spesimen agar permukaan menjadi halus dan bersih. Tingkatan amplas yang digunakan adalah 360,400,600,800,1000,1500 dan 2000.



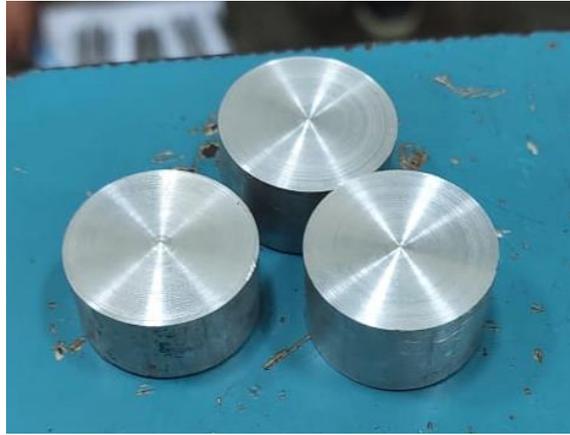
Gambar 11. Amplas

2. Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

a. Aluminium Seri 2024 (Al-2024)

Al-2024 digunakan sebagai spesimen uji kekerasan dan juga uji komposisi kimia yang akan digunakan untuk proses *quenching* dan *artificial aging* yang dimasukkan ke dalam *furnace*.



Gambar 12. Aluminium 2024

b. Air Sebagai Pendingin

Air dalam penelitian ini digunakan sebagai media pendingin dalam proses *quenching*.

C. Prosedur Penelitian

Adapun prosedur penelitian dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Persiapan Spesimen

Menyiapkan spesimen yang berupa Aluminium 2024 yang akan digunakan dalam proses pengujian.

2. Perlakuan Panas *Precipitation Hardening*

Berikut adalah tahapan dalam melakukan perlakuan panas *precipitation hardening*:

a. *Solution Heat Treatment*

1. Memanaskan logam paduan Aluminium 2024 dalam *furnace* dengan temperatur 450⁰ C.
2. Melakukan penahanan atau *holding time* selama 15 menit.

b. *Quenching*

Mendinginkan logam yang telah dipanaskan dalam *furnace* ke dalam media pendingin dengan menggunakan air.

c. *Aging* (Penuaan)

1. *Natural aging*

α jenuh dan α SS dipanaskan di bawah suhu *solvas* untuk menghasilkan sebuah endapan halus terdispersi.

2. *Artificial aging*

Menetapkan suhu pengkristalan untuk paduan Aluminium 2024 dengan variasi temperatur sebesar 150⁰ C, 170⁰C, dan 190⁰C. Kemudian dilakukan *holding time* selama 5 jam.

d. Pendinginan pada *temperatur* ruangan.

3. Uji Kekerasan (*Hardness*)

Adapun tahapan dalam uji kekerasan adalah sebagai berikut:

- a. Mempersiapkan spesimen yang telah di amplas terlebih dahulu.
- b. Mengkalibrasi alat uji kekerasan.

- c. Memasang indenter yang berbentuk bola baja 3,175 mm (1/8) dengan skala merah.
- d. Meletakkan sesimen Al 2024 pada meja uji dari alat, kemudian mengatur *handle* alat uji hingga indenter menyentuh permukaan spesimen.
- e. Memutar *handle* hingga jarum dari skala minor menunjukkan angka 0.
- f. Kemudian menarik tuas beban berlawanan arah jarum jam dan tunggu hingga 10 detik, lalu tarik kembali tuas searah jarum jam.
- g. Menurunkan *handle* landasan hingga indenter tidak lagi menyentuh spesimen.
- h. Kemudian mencatat hasil uji yang diperoleh.
- i. Melakukan semua langkah diatas pada semua spesimen yang akan dilakukan pengujian kekerasan.

4. Uji Stuktur Mikro

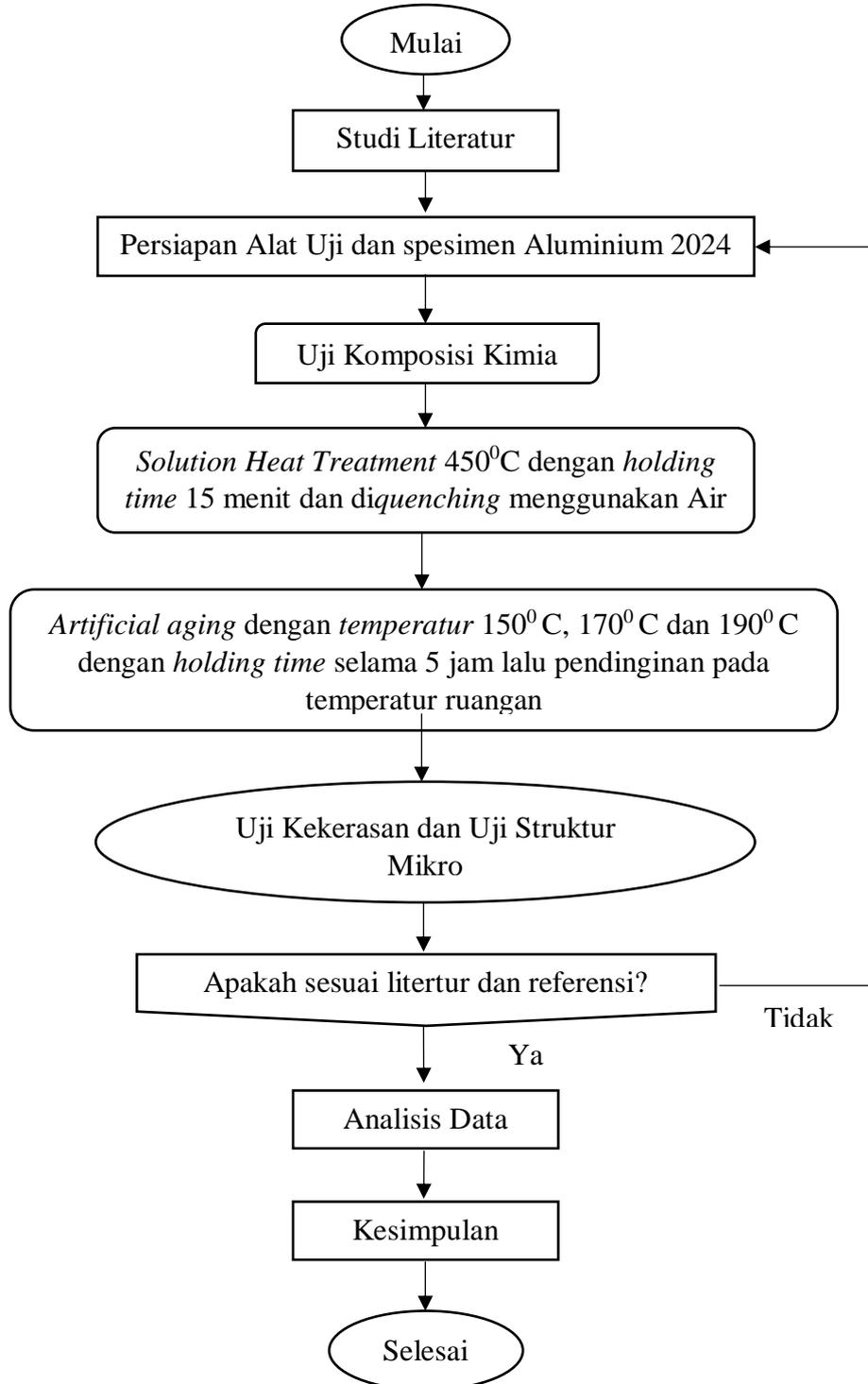
Adapun tahapan dalam pengujian struktur mikro adalah sebagai berikut:

- a. Menyiapkan spesimen dengan dimensi yang sesuai yaitu 10 x 10 mm.
- b. Menyiapkan cetakan untuk proses *mounting*.
- c. Menuangkan resin polyster yang telah dicampur katalis pada cetakan spesimen, lalu menunggu hingga kering dan mengeras sempurna.
- d. Mengeluarkan spesimen dari cetakan spesimen.
- e. Menghaluskan permukaan spesimen aluminium 2024 dengan *polisher grinding machine* dengan tingkatan amplas, 360,400,600,800,1000,1500 dan 2000.

- f. Menggosok permukaan yang telah dihaluskan dengan autosol sampai permukaan benar-benar mengkilap.
- g. Mencilupkan permukaan spesimen yang telah mengkilap ke dalam larutan etsa (3 ml HCL, 2 ml HF, 5 ml HNO³, 190 ml air).
- h. Mengamati struktur mikro dan permukaan spesimen aluminium 2024 dengan menggunakan mikroskop optik.

D. Diagram Alir

Adapun diagram alir dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:



Gambar 13. Diagram Alir Penelitian

V. SIMPULAN DAN SARAN

A. Simpulan

Adapun simpulan yang didapatkan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Dalam penelitian ini didapatkan hasil uji komposisi kimia dengan persentase Al sebesar 90,6 % dan presentase Cu sebesar 5,90%.
2. Proses *artificial aging* yang dilakukan pada penelitian ini dapat meningkatkan nilai kekerasan Al-2024.
3. Nilai kekerasan Al-Cu tertinggi terdapat pada material yang melalui proses *artificial aging* dengan variasi temperatur 190⁰ C nilai kekerasan sebesar 74,4 (HRB) yang mengalami peningkatan sebesar 23,59% dari nilai kekerasan bahan tanpa perlakuan panas.
4. Hasil pengujian struktur mikro menunjukkan bahwa material Al-Cu setelah proses *artificial aging* pada temperatur 190⁰ C memiliki fase θ dengan jumlah yang lebih banyak dan batas butir Al-Cu cenderung lebih rapat dan teratur. Hal ini berarti bahwa pada bahan yang mendapat perlakuan *artificial aging* terdapat endapan presipitat atau terbentuknya fasa kedua yang menjadi penyebab bahan tersebut lebih keras dan lebih baik sifat mekanisnya.

B. Saran

Adapun saran dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Temperatur sebaiknya lebih dari 450°C dengan waktu penahanan yang lebih lama lagi agar fase θ yang terbentuk lebih baik lagi.
2. Pada proses etsa harus memperhatikan jenis etsa yang digunakan agar diperoleh struktur mikro yang lebih jelas.
3. Untuk mendapatkan hasil struktur mikro yang lebih jelas sebaiknya menggunakan uji SEM EDX.

DAFTAR PUSTAKA

- Angga, Anugrah, Novrio. 2018. Pengaruh *Aging* 200⁰C Dengan Waktu 1-9 Jam Terhadap Sifat Mekanik Al-Cu *Remelting*. *Skripsi*. Universitas Sanatha Darma. Yogyakarta.
- Aptika, 2009, Teknologi Penginderaan Mikrokopi, Diakses di: <http://indice.blog.uns.ac.id/files/2010/05/karakteristik-mikroskopi.pdf>. Pada tanggal 13 Februari 2021 Pukul 20.00 WIB.
- Ayyad. O. D. 2011. *Nove; Strategies The Synthesis of Metal Nanoparticle and Nanostructure. Thesis*. Universitat de Barcelona. Spain.
- Aziz, Afif. F., Kiryanto dan Santosa, Ari. W. B. 2017. Analisa Kekuatan Tarik, Kekuatan Tekuk, Komposisi dan Cacat Pengecoran Paduan Aluminium Flat Bar dan Limbah Kampas Rem dengan Menggunakan Cetakan Pasir dan Cetakan Hidrolik sebagai Bahan Komponen Jendela Kapal. *Jurnal Teknik Perkapalan*. Vol. 05, No. 1: 97-103.
- Budinski. 2001. *Engineering Materials Properties and Selection*. PHI New Delhi. pp. 517–536.
- Callister, W. D. 2007. *Materials Science and Engineering: An Introduction, 7th Edition*. John Willey and Sons. New York.
- Dahlan, Hadijaya. 2000. Pengaruh Variasi Beban Indentor *Micro Hardness Tester* Terhadap Akurasi Data Uji Kekerasan Material. *Urania*. No. 23-24: 51-55.
- Doddi, 2012, Pengujian Logam, Diakses di: http://doddi_y.staff.gunadarma.ac.id/download/files/27227/2.pdf. Pada tanggal 11 Februari 2021. Pukul 19.30 WIB

- Gede, I. Brahmanda, A. P. 2016. *Setudi Eksperimental Pengaruh Perlakuan Panas Precipitation Hardening T6 Dengan Variasi Holding Time dan Temperatur Solution Treatment Terhadap Sifat Mekanik Paduan Aluminium ADC 12. Tugas Akhir.* Institut Teknologi Sepuluh November. Surabaya.
- Hadi, 2011, *Hardness Testing*, Diakses di: <http://hadisaputrameng.files.wordpress.com/2011/09/pertemuan-ke-2-properties-of-materials-and-testin-g-page-02.pdf>. Pada tanggal 11 Februari 2021. Pukul 16.00 WIB.
- Haryanto, Poedji., Purnomo, Ady dan Carli. 2018. Analisis Kekuatan Tarik Pada Sambungan Aluminium dan Tembaga yang Disambung Dengan Las Gesek untuk Konektor Elektrikal. *Seminar Nasional Edusainstek.* FMIPA UNIMUS.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. 2012. *Kajian Kebijakan Pengembangan Industri Mineral Sebagai Kawasan Ekonomi Khusus.*
- Mandal. 2005. *Aluminum Welding 2nd ed.* Narosa Publishing House. New Delhi.
- Metals Handbook. 1973. *Metallography Structure and Phase Diagram, 8th. edition*. Vol.7. American Society for Metals.
- Nurlina, Nila. 2019. Pengaruh Pengujian *Hardening* Pada Baja Karbon Rendah Sebagai Solusi Peningkatan Kualitas Material. *Jurnal Qua Teknika.* Vol. 9, No. 1: 11-20.
- Paryono. 2011. *Pengaruh Perlakuan Panas T6 Terhadap Kekerasan Pada Paduan Aluminium ADC 12 Hasil Proses High Pressure Die Casting (HPDC).* Jurusan Teknik Mesin. Politeknik Negeri Semarang.
- Permatasari, Dessy., Zuhaimi dan Jannifar, A. 2020. Analisa Sifat Mekanik Aluminium Alloy 6151 Setelah Mengalami Perlakuan Panas. *Jurnal Mesin Sains Terapan.* Vol. 4, No. 1: 1-5.
- Pranata D.E.M., Alfirano, & Jajat, M. 2014. Analisis Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Paduan Al 2014 Hasil Proses *Aging* dengan Variasi Temperatur dan Waktu Tahan.

- Rhandhiko, Agy., Haryadi, Gunawan. D dan Umardani, Yusuf. 2014. Pengaruh *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) T6 Pada Aluminium Alloy 6061-O dan Pengelasan Longitudinal Tungsten Inert Gas Terhadap Sifat Mekanika dan Struktur Mikro. *Jurnal Teknik Mesin*. Vol. 2, No. 3: 167-174.
- Rochman, R., Haryati, P. dan Purbo, C. 2010. Karakterisasi Sifat Mekanik dan Pembentukan Fasa Presipitat Pada Aluminium Allo 2024-T₈₁ Akibat Perlakuan Penuaan. *Mekanika*. Vol. 8, No. 2: 165-171.
- Saefuloh, Imam., Pramono, Agus dan Hickmatullah, Ricki. 2018. Studi Karakteristik Sifat Mekanik Aluminium *Matrix Composite* (AMC) Padua Al, 5%Cu, 12%Mg, 15% SiC Hasil Proses *Stir Casting* Dengan Variasi Temperatur Pengadukan. *Jurnal Teknika*. Vol. 12, No. 2: 151-164.
- Santoso, Edi dan Nafi, Maulana. 2019. Analisa Pengaruh Variasi Penambahan Cu dan Waktu *Aging* pada Hasil Pengecoran AlCu Terhadap Struktur Mikro. *Mekanika-Jurnal Teknik Mesin*. Vol. 5, No. 2: 6-11.
- Sidi, Pranowo., dan Wahyudi, M. T. 2012. Analisis Kekerasan Pada Pipa yang Dibengkokkan Akibat Pemanasan. *Jurnal Rekayasa Mesin*. Vol.3, No. 3: 398-403.
- Smith, R. 1995. *Chemical Process Design*. McGraw Hill International Book Company, Singapore
- Subagyo, Nur, Imam. 2017. Analisis Pengaruh *Artificial Aging* Terhadap Sifat Mekanis Pada Aluminium Seri 6061. *Skripsi*. Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Suhariyanto, dkk. 2015. Perbaikan Sifat Mekanis Paduan Aluminium A356.0 Dengan Cara Menambahkan Cu dan Perlakuan Panas T5. *Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan III 2015*.
- Sumpena dan Wardoyo. 2018. Pengaruh Variasi Temperatur *Hardening* dan *Tempering* Paduan AlMgSi-Fe12% Hasil Pengecoran Terhadap Kekerasan. *Jurnal ENGINE*. Vol. 2, No. 1: 26-32.
- Surdia, T. Saito, S. 1985. *Pengetahuan Bahan Teknik*. PT. Pradnya Pramita. Jakarta.

Utama, Hari. 2009. Pengaruh Penambahan Cu (1%, 3% dan 5%) Pada Aluminium Dengan *Solution Heat Treatment* dan *Natural Aging* Terhadap Sifat Fisis dan Mekanis. *Tugas Akhir*. Universitas Muhammadiyah Surakarta. Solo.