

**PENGARUH *SOLUTION HEAT TREATMENT*,
QUENCHING, DAN *NATURAL AGING (T4)* TERHADAP SIFAT
MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO ALUMINIUM 2024**



TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan Dalam Memperoleh

Gelar Sarjana Program Studi Strata 1 Teknik Mesin

Disusun :

Alfaj Habiburrohman

2202220114

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS TRIDINANTI

2026

UNIVERSITAS TRIDINANTI
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN



TUGAS AKHIR

PENGARUH *SOLUTION HEAT TREATMENT, QUENCHING, DAN
NATURAL AGING (T4)* TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN
STRUKTUR MIKRO ALUMINIUM 2024

Disusun :

ALFAJ HABIBURROHMAN
2202220114

Mengetahui, Diperiksa dan Disetujui
Oleh :

Ketua Jurusan Teknik Mesin

Herivanto Rusmarjadi, S.T., M.T

Dosen Pembimbing I

Ir. Togar PO. Sianipar, M.T
Dosen Pembimbing II

Ir. Zulkarnain Fatoni, M.T

Disahkan Oleh :

Dekan Fakultas Teknik



Dr. Ani Firda, S.T., M.T

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Nama : Alfaj Habiburrohman
NIP : 2202220114
Fakultas : TEKNIK

Program Studi : TEKNIK MESIN

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi berjudul
PENGARUH *SOLUTION HEAT TREATMENT, QUENCHING, DAN NATURAL AGING* (T4) TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO ALUMINIUM 2024

adalah benar merupakan karya sendiri. Hal-hal yang bukan karya saya, dalam skripsi tersebut diberi tanda citasi dan ditunjukkan dalam daftar pustaka.

Apabila dikemudian hari terbukti pernyataan saya tidak benar dan ditemukan pelanggaran atas karya skripsi ini, saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan skripsi dan gelar yang saya peroleh dari skripsi tersebut.

Palembang, Yang membuat pernyataan

NIM : 2202220114

SURAT PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai Civitas Akademika Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Tridinanti Palembang, saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Alfaj Habiburrohman
NIM : 2202220114
Fakultas : TEKNIK
Program Studi : TEKNIK MESIN
Jenis Karya : TUGAS AKHIR/ SKRIPSI

Demi Pengembangan Ilmu pengetahuan untuk memberikan kepada pihak Universitas Tridinanti Palembang hak bebas Royalti Non eksklusif (*non exclusive royalty free right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan), dengan hak royalti eksklusif ini universitas tridinanti berhak menyimpan, mengalih mediakan, mengelola dalam bentuk data base dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan pemilik hak cipta. Demikian pernyataan saya buat dengan sebenarnya dan tanpa ada tekanan dari pihak mana pun.

Dibuat di Palembang
Tanggal,.....2026
Yang menyatakan,

SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Alfaj Habiburrohman

NIP : 2202220114

Fakultas : TEKNIK

Program Studi : TEKNIK MESIN

Dengan ini menyatakan bahwa Artikel dengan judul :

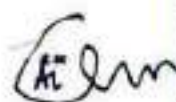
PENGARUH *SOLUTION HEAT TREATMENT, QUENCHING, DAN NATURAL AGING* (T4) TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO ALUMUNIUM 2024

benar bebas dari plagiat dan publikasi ganda. Bila pernyataan ini terbukti tidak benar maka saya bersedia menerima sanksi yang berlaku dari pihak prodi dan insitusi Universitas Tridinanti.

Demikian surat pernyataan ini saya buat penuh keasadaran, dan tanpa paksaan dari pihak mana pun. Sehingga dapat dipergunakan sebagai mana mestinya.

Palembang.....2026

Mahasiswa



Lampiran :

Print Out Hasil Plagiat



Digital Receipt

This receipt acknowledges that Turnitin received your paper. Below you will find the receipt information regarding your submission.

The first page of your submissions is displayed below.

Submission author: 11
Assignment title: Kesmas --- Task #1
Submission title: ALFAJ HABIBURROHMAN 2202220114.docx
File name: ALFAJ_HABIBURROHMAN_2202220114.docx
File size: 1.34M
Page count: 34
Word count: 4,343
Character count: 28,549
Submission date: 25-Jul-2026 07:19PM (UTC+0700)
Submission ID: 3003052429

Bab 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kemampuan 21st adalah penguasaan akan ilmu yang relevan untuk dapat bersaing di era milenial (Mg) dan teknologi (Mg). Penguasaan ini sangat diperlukan dalam rangka menghadapi dunia yang semakin berubah dengan pesatnya teknologi yang menggugah dan tantangan yang dihadapi. Namun, nilai-nilai Akhlak Islam yang dipegang oleh mahasiswa sangat penting dalam menghadapi tantangan tersebut. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh Akhlak Islam terhadap kemampuan 21st mahasiswa.

Salah satu aspek yang dapat digunakan untuk mengukur kemampuan 21st adalah penguasaan akan teknologi informasi. Penguasaan ini sangat diperlukan dalam rangka menghadapi dunia yang semakin berubah dengan pesatnya teknologi yang menggugah dan tantangan yang dihadapi. Namun, nilai-nilai Akhlak Islam yang dipegang oleh mahasiswa sangat penting dalam menghadapi tantangan tersebut. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh Akhlak Islam terhadap kemampuan 21st mahasiswa.

24% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Top Sources

- 22%  Internet sources
10%  Publications
11%  Submitted works (Student Papers)

MOTTO

"Sebagaimana aluminium 2024 harus dipanaskan, didinginkan cepat, dan disempurnakan lewat waktu untuk mencapai kekuatan terbaiknya — begitu pula manusia disempurnakan lewat ujian, kesabaran, dan proses yang tak instan. 'Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan.' (QS. Al-Insyirah: 6)"

"Setiap tekanan yang dihadapi adalah proses pembentukan menuju versi terbaik dari diri sendiri."

"Mulailah dari hal kecil karena hal besar pun di mulai dari hal yang kecil."

KATA PENGANTAR

Puji syukur kita panjatkan hanya kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, karena berkat rahmat-Nya penulis dapat melaksanakan Tugas Akhir yang berjudul.

PENGARUH SOLUTION HEAT TREATMENT, QUENCHING, DAN NATURAL AGING (T4) TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO ALUMUNIUM 2024

Dibuat sebagai salah satu persyaratan dalam memperoleh Gelar Sarjana Program Studi Strata 1 Teknik Mesin. Oleh karena itu dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. H. Edizal, AE, M.S. selaku Rektor Universitas Tridianti
2. Ibu Dr. Ani Firda, S.T., M.T., selaku Dekan Fakultas Universitas Tridianti yang telah memberikan fasilitas dan dukungan selama masa perkuliahan.
3. Bapak Heri Rusmaryadi, S.T., M .T., selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin Universitas Tridianti yang telah memberikan arahan dan kemudahan dalam proses administrasi akademik.
4. Bapak Ir. Togar PO. Sianipar, M.T., selaku Dosen Pembimbing I yang telah memberikan bimbingan, arahan, serta masukan yang sangat berharga selama proses penyusunan skripsi ini.
5. Bapak Ir. Zulkarnaion Fatoni, M.T., selaku Dosen Pembimbing II yang dengan penuh kesabaran telah memberikan bimbingan dan saran yang membangun demi kesempurnaan skripsi ini.
6. Seluruh Bapak dan Ibu Dosen serta staf akademik Fakultas Universitas Tridianti yang telah mendidik dan memberikan ilmu pengetahuan yang

sangat bermanfaat selama penulis menempuh studi.

7. Kedua orang tua penulis, atas segala cinta kasih, pengorbanan, doa yang tiada henti, serta dukungan moral dan material yang menjadi kekuatan terbesar bagi penulis.
8. Seluruh keluarga besar penulis yang senantiasa memberikan semangat dan motivasi dalam setiap langkah perjalanan penulis.
9. Wanita yang selalu menemani keluh kesah dan memberikan semangat dan dukungan penulis.
10. Sahabat dan teman-teman angkatan 2022 Program Studi Teknik Mesin yang telah berbagi suka dan duka selama masa perkuliahan serta memberikan dukungan dalam penyelesaian skripsi ini.
11. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, yang telah turut berkontribusi dalam penyelesaian skripsi ini.

Akhir kata penulis mengharapkan semoga laporan ini bermanfaat bagi penulis sebagai semangat meraih masa depan dan semoga dapat bermanfaat bagi masyarakat luas.

Palembang, ... Januari 2026

Alfaj Habiburrohman

Daftar Isi

HALAMAN JUDUL	i
SURAT PERNYATAAN.....	iii
SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT	iv
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	v
SURAT PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
MOTTO	vii
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiii
ABSTRAK	xiv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.4.1 Manfaat Teoritis.....	3
1.4.2 Manfaat Praktis	3
1.5 Batasan Penelitian / Masalah	4
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Aluminium 2024.....	6
2.2 Diagram Fasa Al–Cu	6
2.3 Perlakuan Panas pada Aluminium 2024	8
2.4 Solution Heat Treatment.....	8
2.5 Quenching.....	9
2.6 Natural Aging (T4)	9
2.7 Guinier–Preston Zone (Gp Zone)	10
2.8 Mekanisme Penguatan oleh GP Zone.....	11
2.9 Hubungan Struktur Mikro dan Sifat Mekanik	11
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	13
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	13
3.2 Bahan Penelitian	13
3.3 Alat Penelitian	13
3.4 Variabel Penelitian.....	14
3.4.1 Variabel Bebas	14
3.4.2 Variabel Terikat	14
3.4.3 Variabel Kontrol	14
3.5 Persiapan Spesimen	15
3.6 Prosedur Penelitian	15
3.6.1 Solution Heat Treatment	15
3.6.2 Quenching	16

3.6.3 Natural Aging.....	16
3.7 Pengujian Kekerasan	17
3.8 Pengujian Struktur Mikro	18
3.8.1 Grinding	18
3.8.2 Polishing	18
3.8.3 Etching	18
3.8.4 Pengamatan	18
3.9 Teknik Analisis Data	19
3.10 Diagram Alir Penelitian	20
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	21
4.1 Hasil Penelitian	21
4.2 Data Hasil Pengujian Kekerasan	21
4.5 Analisa Hasil Kekerasan dan Pengamatan Struktur Mikro	23
4.5.1 Struktur Mikro Tanpa Perlakuan	23
4.5.2 Struktur Mikro Natural Aging 4 Hari	25
4.5.3 Struktur Mikro Natural Aging 8 Hari	27
4.5.4 Struktur Mikro Natural Aging 14 Hari	29
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	31
5.1 Kesimpulan	31
5.2 Saran	32
DAFTAR PUSTAKA	34

Daftar Gambar

Gambar 2. 1 diagram fasa Al-Cu.....	9
Gambar 3.1 Spesimen Alumunium 2024	15
Gambar 3.2 Tungku Pemanas.....	18
Gambar 3.3 <i>Rockwel Hardness Tester</i>	19
Gambar 3.4 Mikroskop.....	21
Gambar 3.5 Diagram Alir.....	22
Gambar 4.1 Grafik kekerasan alumunium 2024.....	24
Gambar 4.3 Struktur mikro tanpa perlakuan	25
Gambar 4.4 Struktur mikro natural aging 4 hari	27
Gambar 4.5 Struktur mikro natural aging 8 hari	28
Gambar 4.6 Struktur mikro natural aging 14 hari	30

Daftar Tabel

Tabel 2.1 Komposisi kimia paduan alumunium 2024.....	8
Tabel 3.1 Tabel kode specimen	17
Tabel 4.1 Hasil pengujian kekerasan.....	24

ABSTRACT

Aluminium 2024 merupakan paduan aluminium seri 2xxx yang banyak digunakan pada industri kedirgantaraan karena rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi. Sifat mekanik material ini sangat dipengaruhi oleh perlakuan panas yang diterapkan, salah satunya melalui mekanisme penguatan presipitasi (T4) yang terdiri dari solution heat treatment, quenching, dan natural aging. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi waktu natural aging terhadap nilai kekerasan dan struktur mikro Aluminium 2024. Spesimen dipanaskan pada suhu 480°C, kemudian di-quenching menggunakan media air, dan dilanjutkan dengan natural aging pada suhu ruang selama 4, 8, dan 14 hari. Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode Rockwell skala B (HRB), sedangkan pengamatan struktur mikro dilakukan melalui metode metalografi dengan mikroskop optik pada perbesaran 400×. Hasil penelitian menunjukkan bahwa spesimen tanpa perlakuan panas memiliki nilai kekerasan tertinggi sebesar 82,9 HRB, sedangkan setelah perlakuan T4 nilai kekerasan menurun menjadi 79,21 HRB pada natural aging 4 hari, kemudian meningkat menjadi 80,3 HRB pada 8 hari dan 81,8 HRB pada 14 hari. Peningkatan waktu natural aging menunjukkan kecenderungan kenaikan kekerasan akibat proses presipitasi yang berlangsung secara bertahap di dalam matriks aluminium, meskipun nilai kekerasan belum melampaui kondisi awal material. Pengamatan struktur mikro menunjukkan tidak terdapat perubahan visual yang signifikan antar variasi perlakuan, dengan struktur didominasi oleh matriks α -Al, batas butir, dan partikel intermetalik.

Kata kunci: Aluminium 2024, solution heat treatment, quenching, natural aging, T4, kekerasan, struktur mikro

ABSTRACT

Aluminum 2024 is a 2xxx series aluminum alloy widely used in the aerospace industry due to its high strength-to-weight ratio. The mechanical properties of this material are strongly influenced by the applied heat treatment, particularly through the precipitation hardening mechanism (T4), which consists of solution heat treatment, quenching, and natural aging. This study aims to determine the effect of natural aging time variation on the hardness and microstructure of Aluminum 2024. Specimens were heated at 480°C, quenched in water, and subsequently subjected to natural aging at room temperature for 4, 8, and 14 days. Hardness testing was conducted using the Rockwell B scale (HRB), while microstructural observation was performed through metallographic methods using an optical microscope at 400× magnification. The results showed that the untreated specimen had the highest hardness value of 82.9 HRB, while after T4 treatment the hardness decreased to 79.21 HRB at 4 days of natural aging, then increased to 80.3 HRB at 8 days and 81.8 HRB at 14 days. The increase in natural aging time showed a tendency toward higher hardness due to the gradual precipitation process within the aluminum matrix, although the hardness values had not yet exceeded the initial condition of the material. Microstructural observation showed no significant visual changes between treatment variations, with the structure dominated by α -Al matrix, grain boundaries, and intermetallic particles.

Keywords: Aluminum 2024, solution heat treatment, quenching, natural aging, T4, hardness, microstructure

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Aluminium 2024 adalah paduan aluminium seri 2xxx yang terutama terdiri dari tembaga (Cu), magnesium (Mg), dan mangan (Mn). Paduan ini banyak digunakan dalam industri kedirgantaraan karena rasio kekuatan terhadap beratnya yang tinggi dan ketahanan lelah yang baik. Namun, sifat mekanik Aluminium 2024 sangat dipengaruhi oleh perlakuan panas yang diterapkan. Awalnya, material ini tidak memiliki sifat mekanik yang optimal, sehingga memerlukan perlakuan panas untuk meningkatkan kinerjanya (Staszczyk et al., 2019).

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk meningkatkan sifat mekanik Aluminium 2024 adalah melalui pengerasan presipitasi. Proses ini terdiri dari beberapa tahap: perlakuan panas larutan, pendinginan cepat (quenching), dan penuaan (aging). Perlakuan panas larutan melarutkan unsur-unsur paduan ke dalam matriks aluminium, membentuk larutan padat homogen. Proses pendinginan cepat kemudian mempertahankan larutan padat jenuh pada suhu ruang. Tahap penuaan kemudian memungkinkan pembentukan presipitat halus karena difusi atom yang terlarut. Presipitat ini dapat menghambat pergerakan dislokasi, sehingga meningkatkan kekerasan dan kekuatan material. Perubahan ukuran, kuantitas, dan distribusi endapan selama proses penuaan diketahui berdampak signifikan terhadap sifat mekanik Aluminium 2024 (Staszczyk et al., 2019).

Beberapa penelitian sebelumnya telah melakukan perlakuan panas pada Aluminium 2024. (El Garchani & Kabiri, 2023) menyatakan bahwa perlakuan

panas berdampak signifikan terhadap perubahan mikrostruktur dan sifat mekanik paduan AA2024. Hasil ini menunjukkan bahwa pemilihan parameter perlakuan panas yang tepat dapat meningkatkan kinerja material sesuai dengan tujuan penggunaannya. Namun, sebagian besar penelitian sebelumnya terutama berfokus pada kondisi penuaan buatan atau hanya meneliti satu tahap perlakuan panas secara terpisah.

Berdasarkan hal ini, penelitian tentang pengaruh perlakuan panas larutan, pendinginan cepat (quenching), dan penuaan alami (T4) terhadap sifat mekanik dan mikrostruktur Aluminium 2024 masih diperlukan. Dalam penelitian ini, perlakuan panas larutan dilakukan pada suhu 480°C, kemudian dilanjutkan dengan proses pendinginan cepat (quenching) dan penuaan alami selama 4, 8, dan 14 hari. Pengujian kekerasan dan pengamatan mikrostruktur digunakan untuk menentukan hubungan antara variasi waktu penuaan alami dengan perubahan mikrostruktur dan nilai kekerasan Aluminium 2024. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi ilmiah mengenai pengaruh perlakuan panas T4 pada Aluminium 2024 dan menjadi pertimbangan dalam pengembangan proses perlakuan panas yang lebih efektif.

1.2 Rumusan Masalah

- 1) Bagaimana pengaruh variasi waktu natural aging terhadap kekerasan dan struktur mikro Aluminium 2024?
- 2) Bagaimana perbedaan nilai sifat mekanik aluminium 2024 sebelum dan sesudah dilakukan proses perlakuan panas menggunakan natural aging?

1.3 Tujuan Penelitian

- 1) Menentukan pengaruh variasi waktu natural aging terhadap struktur mikro Aluminium 2024.
- 2) Untuk mengetahui nilai sifat mekanik pada aluminium 2024 dengan temperature 480°C.

1.4 Manfaat Penelitian

1.4.1 Manfaat Teoritis

Penelitian ini diharapkan dapat menambah pemahaman ilmiah mengenai mekanisme pengerasan presipitasi pada Aluminium 2024 melalui tahapan solution heat treatment, quenching, dan natural aging (T4). Hasil penelitian ini memberikan kontribusi dalam menjelaskan keterkaitan antara perubahan struktur mikro dan peningkatan kekerasan pada paduan aluminium seri 2000. Temuan penelitian ini dapat memperkaya literatur metalurgi fisik dan menjadi dasar pengembangan kajian lanjutan terkait optimasi perlakuan panas pada paduan Al–Cu.

1.4.2 Manfaat Praktis

- 1) Memberikan referensi teknis mengenai parameter perlakuan panas yang berpengaruh terhadap kekerasan Aluminium 2024.
- 2) Menjadi acuan bagi praktisi industri dalam meningkatkan kualitas material Aluminium 2024 melalui perlakuan panas.
- 3) Menyediakan data eksperimen yang dapat digunakan sebagai bahan evaluasi dan perbandingan pada proses perlakuan panas aluminium.

1.5 Batasan Penelitian / Masalah

Adapun batasan penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1) Material yang digunakan adalah Aluminium paduan 2024.
- 2) Solution heat treatment dilakukan pada suhu konstan 480°C.
- 3) Media quenching menggunakan air.
- 4) Natural aging dilakukan pada suhu ruang dengan variasi waktu 4,8,14 hari.
- 5) Pengujian sifat mekanik berupa uji kekerasan.
- 6) Pengamatan struktur mikro dilakukan melalui metode metalografi.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi ini disusun untuk memberikan gambaran mengenai isi penelitian yang dilakukan. Adapun sistematika penulisan dalam skripsi ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang penelitian, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan skripsi.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas teori-teori yang mendukung penelitian, meliputi aluminium 2024, perlakuan panas solution heat treatment, proses quenching, natural aging (T4), sifat mekanik material, struktur mikro aluminium, serta penelitian terdahulu yang relevan.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan metode penelitian yang digunakan, meliputi tempat dan waktu penelitian, bahan dan peralatan penelitian, variabel penelitian, prosedur penelitian, proses perlakuan panas, pengujian kekerasan, pengamatan struktur mikro, serta teknik analisis data.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil penelitian yang diperoleh dari pengujian kekerasan dan pengamatan struktur mikro aluminium 2024 setelah perlakuan solution heat treatment, quenching, dan natural aging. Hasil yang diperoleh kemudian dianalisis dan dibahas berdasarkan teori serta penelitian terdahulu.

BAB V PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian dan pembahasan, serta saran yang dapat digunakan untuk penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

Berisi sumber-sumber referensi yang digunakan dalam penyusunan skripsi.

LAMPIRAN

Berisi data pendukung penelitian, dokumentasi kegiatan penelitian, hasil pengujian, perhitungan, serta informasi lain yang mendukung isi skripsi.

DAFTAR PUSTAKA

- Dilmeç, M., & Arıkan, H. (2014). Effect of solution heat treatment conditions on the mechanical properties and formability for AA 2024 alloy. *Applied Mechanics and Materials*, 686(2014), 3–9. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.686.3>
- Dumitraschkewitz, P., Uggowitzer, P. J., Gerstl, S. S. A., Löffler, J. F., & Pogatscher, S. (2019). Size-dependent diffusion controls natural aging in aluminium alloys. *Nature Communications*, 10(1), 0–6. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12762-w>
- El Garchani, F. E., & Kabiri, M. R. (2023). The Study on Characteristics of Heat Treatment of The AA2024 Aluminum Alloys. *Journal of Multidisciplinary Applied Natural Science*, 3(2), 122–130. <https://doi.org/10.47352/jmans.2774-3047.166>
- Junipitoyo, B., Al Baihaqy, L. H., & Winiasri, L. (2020). Pengaruh Heat Treatment Dan Quenching Terhadap Sifat Fisis Dan Mekanis Aluminum Alloy 2024-t3. *Jurnal Penelitian*, 5(1), 1–10. <https://doi.org/10.46491/jp.v5e1.481.1-10>
- Mardjuki. (2010). Sifat Kekerasan Paduan Al-Cu dari Hasil Proses Perlakuan Panas Penuaan (Aging). *Transmisi*, 6(1), 549–556.
- Miyoshi, H., Kimizuka, H., Ishii, A., & Ogata, S. (2021). Competing nucleation of single- and double-layer Guinier–Preston zones in Al–Cu alloys. *Scientific Reports*, 11(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83920-8>
- Prasetya, Y. B. (2022). Optimasi Parameter Keausan Paduan Aluminium 2024 pada Perlakuan Panas Natural Aging. *Transmisi*, 18(1), 1–4. <https://doi.org/10.26905/jtmt.v18i1.7552>
- Pratama, G. A., & Setiawan, F. (2024). Analisis Pengaruh Waktu Pelapisan Nikel Pada Material Aluminium Seri 2024 Terhadap Kekuatan Tarik Dan. 8(2), 199–205.
- Staszczyk, A., Sawicki, J., & Adamczyk-Cieslak, B. (2019). A study of second-phase precipitates and dispersoid particles in 2024 aluminum alloy after different aging treatments. *Materials*, 12(24). <https://doi.org/10.3390/ma1224168>
- Yudhi Chandra Dwiaji. (2023). Pengaruh Variasi Temperatur Perlakuan Panas dan Media Pendingin Terhadap Sifat Mekanis dan Mikrostruktur Aluminium 2024. *Journal of Applied Mechanical Engineering and Renewable Energy*, 3(2), 69–75. <https://doi.org/10.52158/jamere.v3i2.571>