

PENGARUH ELEKTROPLASTISITAS TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MEKANIK PADA PEMBENTUKAN PLAT ALUMINIUM ALLOY 2024

Reihan Arian Yusuf Wicaksono

S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

Email: reihanarian.21002@mhs.unesa.ac.id

Ahmad Saepuddin, S.T., M.Sc.

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

Email: ahmadsaepuddin@unesa.ac.id

Abstrak

Aluminium sering mengalami keretakan mikro saat dibengkokkan menggunakan metode konvensional. Ribs pada struktur sayap pesawat umumnya diproduksi menggunakan mesin press berat. Proses ini menghasilkan permukaan yang cukup kasar dan berpotensi menyebabkan keretakan mikro pada area lengkungannya. Maka dari itu perlu dilakukan penelitian untuk menentukan pengaruh variasi arus listrik optimal dalam proses elektroplastisitas guna memperoleh kekuatan tarik dan ketahanan tekuk maksimal pada rib, sehingga dapat mengurangi risiko terjadinya keretakan mikro. Penelitian ini bertujuan menganalisis perubahan struktur mikro pada aluminium alloy 2024 akibat elektroplastisitas serta dampaknya terhadap kekuatan tarik dan ketahanan tekuk. Metode eksperimen diterapkan untuk menganalisis pengaruh elektroplastisitas dengan variasi arus (90 Ampere, 100 Ampere, 110 Ampere) terhadap struktur mikro (ASTM E3&E112) serta sifat mekanik, yang mencakup uji tarik (ASTM E8) dan uji bending (ASTM E290) dalam proses pembentukan plat aluminium alloy 2024. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada aluminium alloy 2024, fasa θ (Al₂Cu) mengalami penurunan jumlah presipitat setelah proses elektroplastisitas, meskipun pengurangannya tidak terlalu signifikan pada arus 90 A, 100 A, dan 110 A. Nilai kekuatan tarik terbesar pada variasi arus 90 A dengan rata-rata sebesar 243,756 N/mm². Sedangkan nilai kekuatan tarik terendah pada variasi arus 110 A dengan rata-rata sebesar 232,142 N/mm². Nilai kekuatan bending terbesar pada variasi arus 90 A dengan rata-rata sebesar 1200,742 N/mm², sedangkan nilai kekuatan bending terendah pada variasi arus 110 A dengan rata-rata sebesar 1154,831 N/mm².

Kata Kunci: Elektroplastisitas, Struktur Mikro, Uji Tarik, Uji Bending, Aluminium Alloy 2024.

Abstract

Aluminum often experiences microcracks when bent using conventional methods. The ribs in aircraft wing structures are typically produced using heavy press machines. This process results in a relatively rough surface, which increases the risk of microcracks forming in the curved areas. Therefore, research is needed to determine the optimal electric current variation in the electroplasticity process to achieve maximum tensile strength and bending resistance in the ribs, thereby reducing the risk of microcracks. This study aims to analyze the microstructural changes in Aluminum Alloy 2024 caused by electroplasticity and its impact on tensile strength and bending resistance. The experimental method was applied to analyze the effect of electroplasticity with varying current levels (90 A, 100 A, 110 A) on the microstructure (ASTM E3&E112) and mechanical properties, including tensile testing (ASTM E8) and bending testing (ASTM E290), in the formation of Aluminum Alloy 2024 plates. The research results indicate that in 2024 aluminum alloy, the θ (Al₂Cu) phase experienced a reduction in the number of precipitates after the electroplasticity process, although the decrease was not particularly significant at current levels of 90 A, 100 A, and 110 A. The highest tensile strength was observed at a current of 90 A, with an average value of 243.756 N/mm², while the lowest tensile strength occurred at 110 A, with an average value of 232.142 N/mm². The maximum bending strength was also observed at 90 A, with an average of 1200.742 N/mm², whereas the minimum bending strength was found at 110 A, with an average of 1154.831 N/mm².

Keywords: Electroplasticity, Microstructure, Tensile Testing, Bending Testing, Aluminum Alloy 2024.

PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi yang terus berkembang telah menghasilkan berbagai alat dan komponen industri berkualitas tinggi yang dirancang untuk memudahkan aktivitas manusia sebagai pengguna teknologi. Dalam industri, terutama di sektor otomotif dan kedirgantaraan, pemilihan material serta metode produksi memegang peran penting dalam menjamin kualitas dan fungsi produk akhir. Dalam industri dirgantara, pesawat modern terdiri dari sekitar 75%-80% aluminium karena sifatnya yang ringan dan kuat (Marshall, 2024).

Aluminium alloy seri 2xxx, khususnya AA2024, banyak digunakan dalam industri kedirgantaraan karena

memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, ketahanan korosi yang cukup baik, serta kemampuan pengerasan presipitasi melalui perlakuan panas (García-Hernández et al., 2019). Namun demikian, proses pembentukan konvensional seperti rolling sering menimbulkan permasalahan seperti peningkatan gaya deformasi, keausan alat, serta munculnya tegangan sisa yang berdampak pada penurunan sifat mekanik (Dong et al., 2022).

Salah satu metode yang dikembangkan untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah elektroplastisitas, yaitu fenomena penurunan resistansi deformasi logam akibat aliran arus listrik selama proses deformasi plastis (Kim et al., 2020)(Liu et al., 2024). Arus listrik yang

diberikan dapat memengaruhi perilaku dislokasi melalui efek electron wind force, meningkatkan mobilitas dislokasi, dan menyebabkan penurunan tegangan alir (Li et al., 2022)(Sutton & Todorov, 2021). Selain itu, perlakuan elektroplastisitas terbukti mampu memperbaiki struktur mikro serta meningkatkan duktilitas dan kekuatan tarik pada berbagai paduan aluminium (Dobras et al., 2023)(Chen et al., 2021).

Pada paduan AA2024, perubahan fasa seperti θ (Al_2Cu) dan θ' (Al_2CuMg) sangat berpengaruh terhadap sifat mekanik (García-Hernández et al., 2019). Dengan penerapan arus listrik selama proses deformasi, distribusi dan ukuran presipitat tersebut dapat berubah, sehingga diharapkan menghasilkan peningkatan kekuatan tarik dan ketahanan tekuk tanpa menyebabkan degradasi struktur mikro (Bumgardner et al., 2020). Oleh karena itu, studi tentang pengaruh elektroplastisitas pada pembentukan plat aluminium alloy 2024 menjadi penting untuk mengoptimalkan proses manufaktur modern yang efisien dan ramah energi.

Penelitian ini bertujuan menganalisis perubahan struktur mikro pada aluminium alloy 2024 akibat elektroplastisitas serta dampaknya terhadap kekuatan tarik dan ketahanan tekuk. Studi ini penting untuk industri aerospace, menawarkan solusi efisien dan berkelanjutan dalam manufaktur melalui pengoptimalan sifat mekanik material. Pemahaman mengenai parameter medan listrik, seperti intensitas dan durasi, dapat meningkatkan presisi pengolahan material, mengurangi risiko kesalahan, dan mendukung inovasi produk.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode penelitian eksperimen. Eksperimen ini dilaksanakan di laboratorium dengan kondisi dan peralatan yang disesuaikan. Peneliti terlebih dahulu melakukan proses penggulangan pada spesimen aluminium, diikuti oleh penerapan elektroplastisitas dengan variasi arus yang telah ditentukan. Selanjutnya, dilakukan pengujian struktur mikro, dan tahap terakhir meliputi pengujian sifat mekanik melalui uji tarik dan uji bending. Seluruh proses penelitian dilakukan dengan memanfaatkan peralatan dan kondisi yang telah diatur sesuai kebutuhan.

Waktu dan Tempat Penelitian

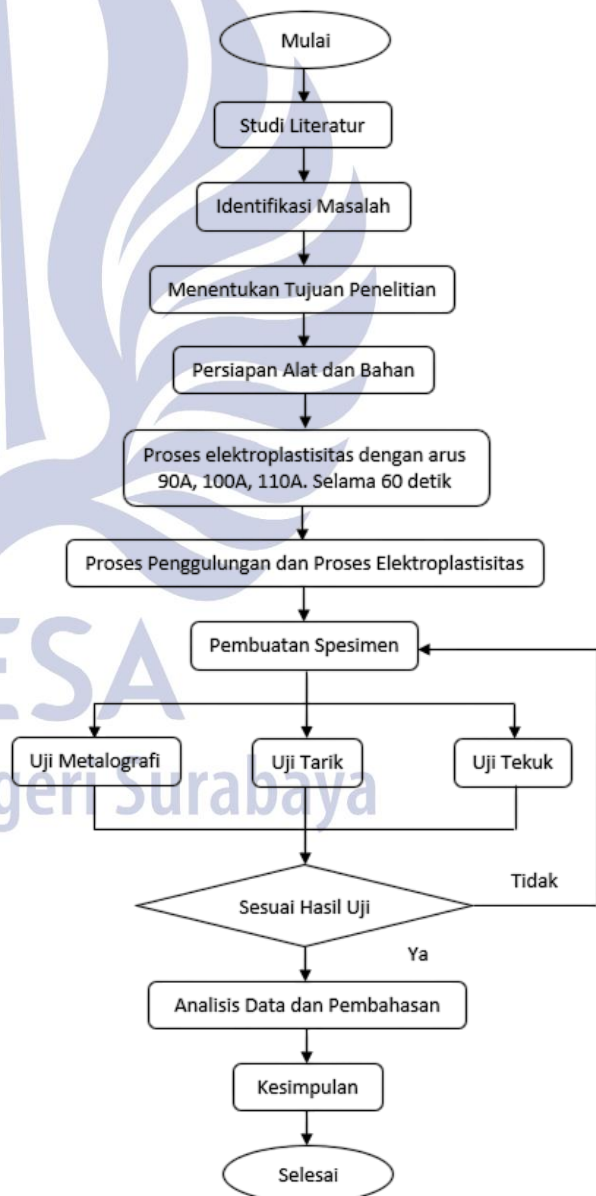
- Waktu Penelitian
Penelitian ini dilaksanakan selama tiga bulan pada April – Juni 2025 setelah proposal tugas akhir disetujui melalui proses sidang, hingga seluruh data dan analisis yang dibutuhkan berhasil dikumpulkan.
- Tempat Penelitian
Penelitian berjudul “Pengaruh Elektroplastisitas Terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Pada Pembentukan Plat Aluminium Alloy 2024” ini dilakukan di dua lokasi. Proses elektroplastisitas, penggulangan, dan uji tarik dilaksanakan di Laboratorium Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya. Uji metalografi dan uji bending dilakukan di Laboratorium Politeknik Negeri Malang.

Variabel Penelitian

- Variabel Bebas
Variabel bebas dalam penelitian ini adalah arus 90 A, 100 A, 110 A pada proses elektroplastisitas.
- Variabel Terikat
Variabel terikat pada penelitian ini adalah struktur mikro, nilai kekuatan tarik, dan nilai ketahanan bending pada plat aluminium alloy 2024.
- Variabel Kontrol
Variabel kontrol dalam penelitian ini menggunakan material plat aluminium alloy 2024, proses elektroplastisitas selama 60 detik, standart uji metalografi menggunakan ASTM E3 & ASTM E112, standart uji tarik menggunakan ASTM E8, standart uji bending menggunakan ASTM E290.

Rancangan Penelitian

Rencana kegiatan ini dibuat dalam bentuk flowchart dibawah ini.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Penjelasan Diagram Alir

- Dimulai dengan studi literatur mencari sumber-sumber yang relevan.
- Mengidentifikasi masalah kemudian menentukan permasalahan utama.
- Menentukan tujuan yang akan diselesaikan dalam penelitian.
- Mempersiapkan alat dan bahan yang diperlukan.
- Memberikan perlakuan elektroplastisitas dengan arus Arus 90 A, 100 A, dan 110 A selama 60 detik.
- Kutub positif (+) dihubungkan ke spesimen, sedangkan kutub negatif (-) dihubungkan ke mesin rolling kemudian dilakukan proses rolling.
- Pembentukan spesimen dibuat sesuai dengan standar yang direkomendasikan yaitu ASTM E8 untuk uji tarik dan ASTM E290 untuk uji bending.
- Spesimen dilakukan pengujian metalografi, tarik, dan bending.
- Data dari hasil uji dianalisis secara menyeluruh dan mengambil kesimpulan. Jika ditemukan kegagalan material dilakukan evaluasi kemudian proses diulang ke tahap persiapan.
- Akan tetapi jika tidak ditemukan kegagalan maka penelitian dinyatakan selesai.

Prosedur Penelitian

- Tahap Persiapan
 - Menyiapkan alat dan bahan
 - Memotong specimen sesuai standart ASTM E8 untuk uji tarik dan ASTME290 untuk uji bending.
- Tahap Penelitian
 - Melakukan proses rolling bersamaan dengan diberi perlakuan elektroplastisitas dengan variasi arus 90 A, 100 A, 110 A. Dengan durasi 60 detik.
 - Melakukan pengamatan struktur mikro dengan uji metalografi menggunakan standar ASTM E3&ASTM E112.
 - Melakukan uji tarik menggunakan standar ASTM E8.
 - Melakukan uji bending menggunakan standar ASTM E290.
- Tahap Pengujian
 - Mencatat parameter proses penggulungan yaitu arus, waktu serta hasil tebal dan lebar akhir spesimen.
 - Mendokumentasikan perubahan struktur mikro.
 - Mencatat hasil pengujian dengan detail.
 - Merangkum temuan penelitian berdasarkan data struktur mikro dan sifat mekanik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menghasilkan data berupa angka dan gambar. Data angka yang dimaksud adalah nilai yang diperoleh dari uji kekuatan tarik dan uji ketahanan bending, sedangkan data gambar diperoleh dari uji metalografi.

Hasil Proses Rolling

Tabel 1. Hasil Proses Rolling Spesimen Tarik

Spesimen		Tebal/Lebar Awal (mm)	Tebal/Lebar Akhir (mm)	Presentase Perubahan (%)
TP	1	6,00/20,00	5,97/20,02	-0,51/+0,11
	2	6,00/20,00	5,80/20,19	-3,33/+0,95
90 A	1	6,00/20,00	5,83/20,17	-2,83/+0,85
	2	6,00/20,00	5,83/20,17	-2,83/+0,85
	3	6,00/20,00	5,88/20,15	-2,00/+0,75
	4	6,00/20,00	5,98/20,01	-0,33/+0,05
	5	6,00/20,00	5,95/20,03	-0,83/+0,15
100 A	1	6,00/20,00	5,84/20,16	-2,67/+0,80
	2	6,00/20,00	5,86/20,15	-2,33/+0,75
	3	6,00/20,00	5,87/20,14	-2,17/+0,70
	4	6,00/20,00	5,86/20,15	-2,33/+0,75
	5	6,00/20,00	5,87/20,14	-2,17/+0,70
110 A	1	6,00/20,00	5,87/20,15	-2,17/+0,75
	2	6,00/20,00	5,88/20,14	-2,00/+0,70
	3	6,00/20,00	5,87/20,15	-2,17/+0,75
	4	6,00/20,00	5,84/20,16	-2,67/+0,80
	5	6,00/20,00	5,85/20,15	-2,50/+0,75

Tabel 2. Hasil Proses Rolling Spesimen Bending

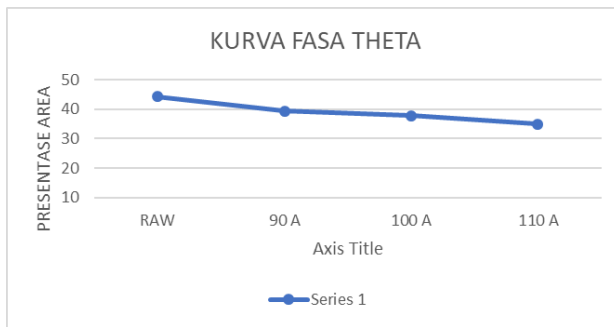
Spesimen		Tebal/Lebar Awal (mm)	Tebal/Lebar Akhir (mm)	Presentase Perubahan (%)
TP	1	6,00/50,00	5,90/50,10	-1,67/+0,20
	2	6,00/50,00	5,30/51,90	-11,67/+3,80
90 A	1	6,00/50,00	5,35/50,46	-10,83/+0,92
	2	6,00/50,00	5,50/50,86	-8,33/+1,72
	3	6,00/50,00	5,65/51,10	-5,83/+2,20
	4	6,00/50,00	5,52/50,83	-8,00/+1,66
	5	6,00/50,00	5,60/50,95	-6,67/+1,90
100 A	1	6,00/50,00	5,61/50,97	-6,50/+1,94
	2	6,00/50,00	5,30/50,26	-11,67/+0,52
	3	6,00/50,00	5,42/50,64	-9,67/+1,28
	4	6,00/50,00	5,63/50,95	-6,17/+1,90
	5	6,00/50,00	5,51/50,71	-8,17/+1,42
110 A	1	6,00/50,00	5,37/50,59	-10,50/+1,18
	2	6,00/50,00	5,64/50,95	-6,00/+1,90
	3	6,00/50,00	5,34/50,46	-11,00/+0,92
	4	6,00/50,00	5,34/50,46	-11,00/+0,92
	5	6,00/50,00	5,30/50,06	-11,67/+0,12

Hasil Uji Metalografi

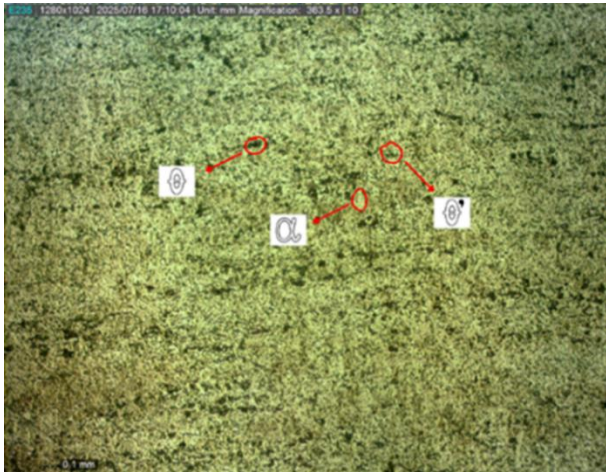
Pengamatan struktur mikro pada penelitian ini bertujuan untuk mendeteksi perubahan struktur mikro dan menjelaskan fenomena yang terjadi pada parameter nilai kekuatan tarik dan nilai kekuatan bending pada plat aluminium alloy 2024 setelah dilakukan proses elektroplastisitas. Perbesaran yang digunakan dalam pengamatan ini adalah 363,5x dan resolusi 1280 x 1024. Cairan etsa menggunakan Reagen Keller.



Gambar 2. Spesimen Uji Metalografi

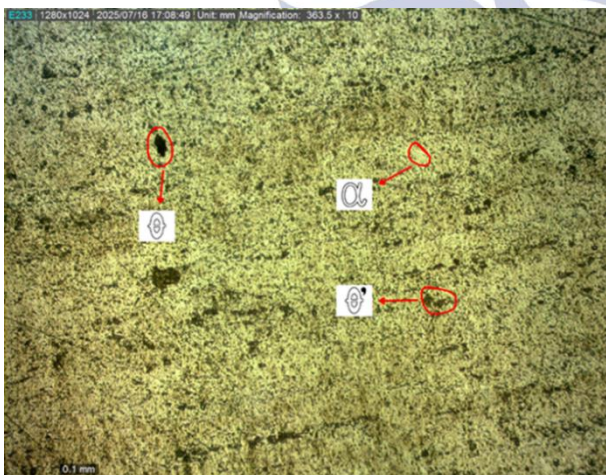


Gambar 3. Kurva Fasa Theta



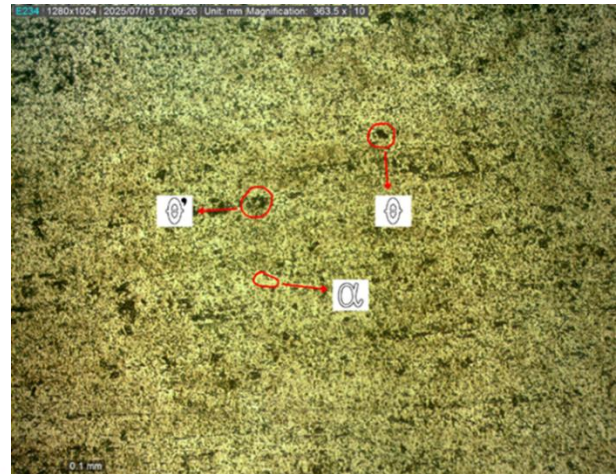
Gambar 4. Hasil Uji Metalografi Raw Material

Berdasarkan hasil analisis menggunakan software ImageJ pada spesimen Raw Material kandungan fasa α sebanyak 51,486%, kandungan fasa θ sebanyak 44,335%.



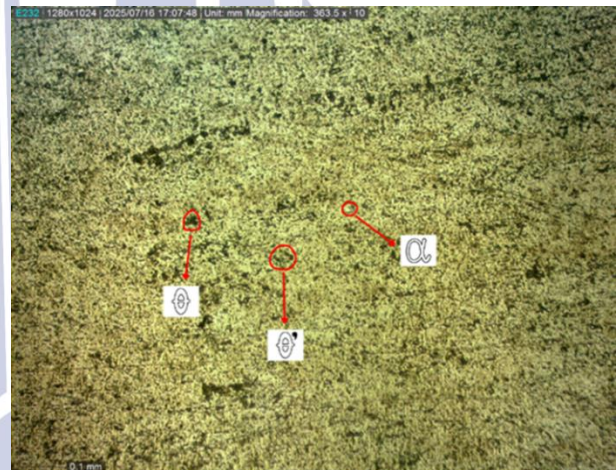
Gambar 5. Hasil Uji Metalografi Variasi 90 A

Berdasarkan hasil analisis menggunakan software ImageJ pada spesimen Raw Material kandungan fasa α sebanyak 56,549%, kandungan fasa θ sebanyak 39,473%.



Gambar 6. Hasil Uji Metalografi Variasi 100 A

Berdasarkan hasil analisis menggunakan software ImageJ pada spesimen Raw Material kandungan fasa α sebanyak 59,201%, kandungan fasa θ sebanyak 37,890%.



Gambar 7. Hasil Uji Metalografi Variasi 110 A

Berdasarkan hasil analisis menggunakan software ImageJ pada spesimen Raw Material kandungan fasa α sebanyak 61,067%, kandungan fasa θ sebanyak 34,926%.

Hasil pengamatan metalografi pada aluminium alloy 2024 didapatkan daerah berwarna gelap, butiran berupa titik-titik hitam dan daerah terang. Menurut Zainul Huda (2008) daerah berwarna terang merupakan daerah fasa α , daerah butiran berwarna gelap merupakan daerah presipitat θ' , sedangkan daerah berwarna gelap merupakan daerah fasa θ . Ciri umum pada aluminium alloy 2024 adalah tersusun atas paduan utama Al-Cu-Mg dengan Aluminium (Al) sebagai matriks utama, Tembaga (Cu) sebagai pembentuk presipitat penguat Al_2Cu , Magnesium (Mg) sebagai pembentuk fasa Al_2CuMg .

Fasa α menunjukkan fasa aluminium (Al) yang merupakan matriks utama pada paduan yang bersifat lunak dan ductile, penampakan mikroskopis yang terlihat yaitu berwarna kekuningan terang dan tersebar di seluruh area. Fasa θ menunjukkan presipitat Al_2Cu yang merupakan presipitat penting untuk kekuatan paduan 2024, penampakan mikroskopis yang terlihat berupa titik gelap kecil berwarna coklat dan terletak dalam matriks atau butir.

Fasa θ' menunjukkan Al_2CuMg yang merupakan fasa penguat tambahan, penampakan mikrofotografi yang terlihat berwarna agak gelap ke abu-abuan dan terletak dibatas butir.

Hasil pengamatan metalografi pada gambar 4 (raw material), gambar 5 (arus 90 A), gambar 6 (arus 100 A), dan gambar 7 (arus 110 A) menunjukkan bahwa seiring peningkatan arus listrik dari 90 A hingga 110 A, jumlah fasa θ (Al_2Cu) dan fasa θ' (Al_2CuMg) pada aluminium alloy 2024 mengalami penurunan meskipun tidak menunjukkan perubahan yang signifikan.

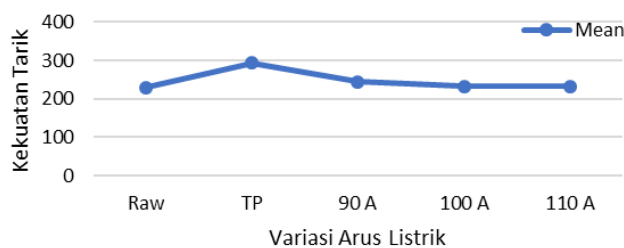
Hasil Uji Tarik

Pengujian tarik dilakukan untuk menentukan kekuatan tarik material dengan mengukur tegangan dan elongasi yang terjadi selama pengujian. Setelah pengujian tarik dilakukan, diperoleh data berupa beban tarik maksimum (N). Nilai ini menjadi dasar untuk menghitung tegangan tarik maksimum menggunakan rumus $\sigma = \frac{P}{A}$, di mana P adalah beban dan A adalah luas penampang. Hasil perhitungan tersebut ditampilkan dalam tabel berikut:

Tabel 3. Hasil Uji Tarik

Spesimen	Lebar (b) (mm)	Tebal (d) (mm)	Luas Penampang (mm ²)	Beban Tarik Max (P)		Kekuatan Tarik Max ($\sigma = P/Ao$) (N/mm ²)	Rata-rata Tegangan Tarik Max (N/mm ²)
				Kg	N		
RAW	1	12,5	6	75	1779,8	17442,6	229,233
	2	12,5	6	75	1776,0	17405,3	
	3	12,5	6	75	1707,1	16729,7	
TP	1	12,5	6	75	2249,8	22048,3	293,977
	2	12,5	6	75	1723,0	16885,4	
	3	12,5	6	75	1719,0	16846,2	
90 A	1	12,5	6	75	1808,8	17727,2	243,756
	2	12,5	6	75	2278,6	22330,4	
	3	12,5	6	75	2202,4	17619,8	
	4	12,5	6	75	1745,1	17102,0	
	5	12,5	6	75	1777,1	17415,3	
100 A	1	12,5	6	75	1789,6	17538,3	232,294
	2	12,5	6	75	1778,1	17426,1	
	3	12,5	6	75	1798,8	17628,7	
	4	12,5	6	75	1785,1	17494,2	
	5	12,5	6	75	1802,0	17660,1	
110 A	1	12,5	6	75	1784,2	17485,4	232,142
	2	12,5	6	75	1746,0	17110,8	
	3	12,5	6	75	1765,6	17302,9	
	4	12,5	6	75			
	5	12,5	6	75			

Rata-Rata Pengujian Tarik



Gambar 8. Grafik Rata-rata Uji Tarik

Diketahui dari hasil pengujian kekuatan tarik pada gambar 8 memiliki rata-rata yang berbeda. Hasil penelitian proses elektroplastisitas pada plat aluminium alloy 2024 dengan variasi Raw Material mempunyai rata-rata kekuatan tarik sebesar 229,233 N/mm², variasi TP/ Tanpa Perlakuan (hanya melalui proses rolling tanpa

elektroplastisitas mengalami kenaikan dengan nilai kekuatan tarik sebesar 293,977 N/mm², variasi arus listrik 90 A mempunyai rata-rata kekuatan tarik sebesar 243,756 N/mm², variasi arus listrik 100 A mempunyai rata-rata kekuatan tarik sebesar 232,294 N/mm², variasi arus listrik 110 A mempunyai rata-rata kekuatan tarik sebesar 232,142 N/mm². Dari kelima variasi arus listrik tersebut dapat dilihat bahwa variasi TP memiliki nilai kekuatan tarik yang paling besar dan variasi Raw memiliki nilai yang terendah.

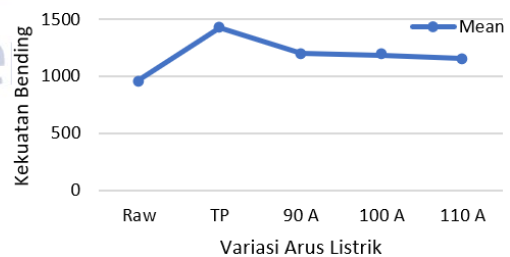
Hasil Uji Bending

Pengujian bending bertujuan untuk mengetahui seberapa besar kekuatan lentur (flexural strength) suatu material. Adapun data yang diperoleh dari hasil pengujian bending adalah nilai beban bending maksimum. Nilai ini digunakan untuk mengetahui nilai tegangan bending maksimum dapat dihitung dengan cara $\sigma_b = \frac{3Pl}{2bd^2}$ dan hasilnya dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4. Hasil Uji Bending

Spesimen	Lebar (b) (mm)	Tebal (d) (mm)	Panjang (L) (mm ²)	Beban Lengkung Max (P)		Kekuatan Bending Max ($\sigma_b = \frac{3Pl}{2bd^2}$) (N/mm ²)	Rata-rata Tegangan Tekuk Max (N/mm ²)
				Kg	N		
RAW	1	25	5	100	423,40	4149,32	966,985
	2	25	5	100	411,80	4035,64	
	3	25	5	100	398,20	3902,36	
TP	1	25	5	100	604,80	5927,04	1422,489
	2	25	5	100	485,40	4756,92	
	3	25	5	100	508,60	4984,28	
90 A	1	25	5	100	528,80	5182,24	1200,742
	2	25	5	100	509,60	4994,08	
	3	25	5	100	520,20	5097,96	
	4	25	5	100	521,20	5107,76	
	5	25	5	100	475,80	4662,84	
100 A	1	25	5	100	496,20	4862,76	1186,724
	2	25	5	100	523,40	5129,32	
	3	25	5	100	506,20	4960,76	
	4	25	5	100	490,40	4805,92	
	5	25	5	100	524,40	5139,12	
110 A	1	25	5	100	484,40	4747,12	1154,831
	2	25	5	100	484,40	4747,12	
	3	25	5	100	471,40	4619,72	
	4	25	5	100			
	5	25	5	100			

Rata-Rata Pengujian Bending



Gambar 9. Grafik Rata-rata Uji Bending

Diketahui dari hasil pengujian kekuatan bending pada gambar 9 memiliki rata-rata yang berbeda. Hasil penelitian proses elektroplastisitas pada plat aluminium alloy 2024 dengan variasi Raw Material mempunyai rata-rata kekuatan bending sebesar 966,985 N/mm². TP mengalami kenaikan dengan nilai sebesar 1422,489 N/mm², variasi arus listrik 90 A mempunyai rata-rata kekuatan bending sebesar 1200,742 N/mm², variasi arus listrik 100 A

mempunyai rata-rata kekuatan bending sebesar 1186,724 N/mm², variasi arus listrik 110 A mempunyai rata-rata kekuatan bending sebesar 1154,831 N/mm². Berdasarkan keempat variasi arus listrik tersebut dapat dilihat bahwa variasi TP memiliki nilai kekuatan bending yang paling besar dan variasi raw memiliki nilai bending yang terendah.

Relevansi hasil uji metalografi dengan pengujian tarik dan bending pada aluminium alloy 2024 menunjukkan adanya tren penurunan kekuatan mekanik seiring dengan peningkatan arus listrik dalam proses elektroplastisitas. Pada arus rendah (90 A), struktur mikro didominasi oleh butir yang relatif halus dengan distribusi presipitat yang masih merata, sehingga kekuatan tarik (243,756 N/mm²) dan bending (1200,742 N/mm²) tercatat paling tinggi. Kondisi ini sejalan dengan mekanisme Hall-Petch, di mana butir yang lebih halus meningkatkan hambatan pergerakan dislokasi sehingga kekuatan material bertambah. Sebaliknya, pada arus tinggi (110 A), energi listrik yang besar menghasilkan pemanasan Joule berlebih yang memicu pertumbuhan butir (grain growth) dan penurunan densitas dislokasi, sehingga kekuatan tarik (232,142 N/mm²) dan bending (1154,831 N/mm²) mengalami penurunan dan termasuk yang terendah.

Li et al. (2022) menjelaskan bahwa efek elektroplastisitas meningkatkan plastisitas material dengan menurunkan hambatan deformasi, sementara Kim et al. (2020) menekankan bahwa pemanasan Joule dapat memperbesar butir jika arus terlalu tinggi. Lebih lanjut, Feng et al. (2024) menunjukkan bahwa peningkatan suhu akibat arus listrik dapat memperbaiki keuletan namun mengurangi kekuatan karena rekristalisasi parsial, dan Lv et al. (2024) menegaskan bahwa elektroplastisitas memang menyebabkan peningkatan deformabilitas disertai penurunan ketahanan terhadap deformasi. Berdasarkan hal tersebut, dapat disimpulkan bahwa hubungan antara kekuatan mekanik dan struktur mikro pada penelitian ini dikendalikan oleh interaksi antara pemanasan Joule, ukuran butir, serta distribusi presipitat, di mana arus rendah menghasilkan penguatan optimal sedangkan arus tinggi cenderung melemahkan sifat mekanik aluminium alloy 2024.

Berdasarkan hasil setiap pengujian tarik dan pengujian bending yang sudah dilakukan diketahui bahwa nilai kekuatan tarik dan kekuatan bending dari material plat aluminium alloy 2024 semakin tinggi arus listrik yang diberikan nilainya cenderung mengalami penurunan. Efek elektroplastik mengacu pada peningkatan plastisitas dan pengurangan ketahanan deformasi dengan memasukkan arus listrik atau medan listrik selama deformasi plastis logam (Li et al., 2022). Pada variasi arus listrik 110 A pengujian tarik dan pengujian bending memiliki nilai paling rendah dikarenakan arus listrik yang tinggi menghasilkan lebih banyak panas akibat resistansi material. Deformasi yang terjadi juga bisa lebih merata, dan presipitat tetap stabil sehingga memperkuat matriks. Elektroplastisitas sering ditunjukkan dengan peningkatan perpanjangan secara drastis selama deformasi di bawah arus listrik tanpa peningkatan suhu yang signifikan karena pemanasan Joule (Kim et al., 2020).

Peningkatan suhu dapat menyebabkan pemanasan berlebih yang dapat memperbesar ukuran butir (grain) pada

aluminium alloy. Butir yang lebih besar cenderung mengurangi kekuatan material (berdasarkan Hall-Petch Relationship, kekuatan material berbanding terbalik dengan akar ukuran butir). Suhu tinggi dapat menghilangkan dislokasi dan tegangan sisa (residual stress) yang terbentuk selama proses deformasi, menjadikan material lebih lunak dan kekuatannya menurun. Efek pemanasan termal terjadi ketika arus berenergi tinggi bekerja pada benda kerja logam dan menghasilkan pemanasan Joule terhadap resistansi inheren logam. Kemampuan deformasi aliran logam ditingkatkan, sehingga meningkatkan plastisitas benda kerja (Feng et al., 2024). Efek elektroplastik menyebabkan peningkatan plastisitas material dan penurunan ketahanan terhadap deformasi (Lv et al., 2024). Sehingga nilai kekuatan tarik dan kekuatan bending variasi arus listrik 110 Ampere memiliki nilai yang paling rendah yaitu 232,142 N/mm² dan 1154,831 N/mm².

Sebaliknya pada variasi arus listrik 90 A pengujian tarik dan pengujian bending yang sudah dilakukan diketahui bahwa nilai kekuatan tarik dan kekuatan bending dari material plat aluminium alloy 2024 memiliki nilai paling besar dikarenakan Arus ini belum cukup untuk memfasilitasi pergerakan dislokasi tanpa menyebabkan pemanasan berlebih atau pertumbuhan butir yang signifikan. Serta suhu yang dihasilkan belum mencapai titik yang menyebabkan pelunakan atau rekristalisasi masif. Sehingga nilai kekuatan tarik dan kekuatan bending variasi arus listrik 90 Ampere memiliki nilai yang paling tinggi yaitu 243,756 N/mm² dan 1200,742 N/mm².

Dapat diketahui bahwa variasi arus listrik tertinggi dapat menjadikan material pada plat aluminium alloy 2024 lebih lunak dan kekuatannya menurun. Dikarenakan pada penelitian ini menggunakan variasi arus listrik 90 A, 100 A, 110 A sehingga dapat dilihat semakin tinggi arus listrik maka semakin rendah nilai kekuatan tarik dan nilai kekuatan bendingnya. Pernyataan ini hanya berlaku pada penelitian ini karena jenis variasi variasi arus listrik yang digunakan hanya 90 A, 100 A, dan 110 A.

Simpulan

Berdasarkan analisa data uji metalografi, pengujian tarik, dan pengujian bending pada material plat aluminium alloy 2024, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada aluminium alloy 2024, fasa θ (Al₂Cu) mengalami penurunan jumlah presipitat setelah proses elektroplastisitas, meskipun pengurangannya tidak terlalu signifikan pada arus 90 A, 100 A, dan 110 A. Nilai kekuatan tarik dan bending tertinggi diperoleh pada arus rendah (90 A) karena ukuran butir yang lebih halus serta jumlah presipitat yang masih relatif banyak. Sebaliknya, pada arus tinggi (110 A), kelarutan Cu dalam matriks aluminium meningkat sehingga jumlah fasa θ berkurang, yang berakibat pada penurunan kekuatan tarik dan bending.
2. Hasil pengujian tarik pada proses elektroplastisitas antara variasi arus listrik 90 A, 100 A, dan 110 A terhadap pembentukan plat aluminium alloy 2024. Pada variasi arus listrik 90 A mempunyai rata-rata kekuatan tarik sebesar 243,756 N/mm², variasi arus

listrik 100 A mempunyai rata-rata kekuatan tarik sebesar 232,294 N/mm², variasi arus listrik 110 A mempunyai rata-rata kekuatan tarik sebesar 232,142 N/mm². Dari hasil pengujian tarik tersebut, variasi arus 110 A memiliki nilai kekuatan tarik terendah daripada variasi arus 90 A, dan variasi arus 100 A. Hasil pengujian bending pada proses elektroplastisitas antara variasi arus listrik 90 A, 100 A, dan 110 A terhadap pembentukan plat aluminium alloy 2024. Pada variasi arus listrik 90 A mempunyai rata-rata kekuatan bending sebesar 1200,742 N/mm². Pada variasi arus listrik 100 A mempunyai rata-rata kekuatan bending sebesar 1186,724 N/mm². Pada variasi arus listrik 110 A mempunyai rata-rata kekuatan bending sebesar 1154,831 N/mm². Dari hasil pengujian tarik tersebut, variasi arus 110 A memiliki nilai kekuatan bending terendah daripada variasi arus 90 A, dan variasi arus 100 A.

Saran

Pada penelitian pengaruh elektroplastisitas terhadap struktur mikro dan sifat mekanik pada pembentukan plat aluminium alloy 2024, saran yang dapat disampaikan sebagai berikut:

1. Pada penelitian selanjutnya dalam uji struktur mikro disarankan meneliti titik material yang sama.
2. Pada penelitian selanjutnya dalam metode rolling disarankan mengatur ketebalan dengan selisih yang lebih besar daripada ketebalan spesimen.
3. Pada penelitian selanjutnya disarankan menggunakan variasi arus listrik yang lebih tinggi dan durasi yang lebih lama agar perbedaan terlihat secara signifikan dan pengaruh dalam proses pembentukan material plat aluminium bisa lebih maksimal.
4. Pada penelitian selanjutnya disarankan menggunakan media pendingin setelah proses elektroplastisitas untuk mengontrol suhu material, menjaga stabilitas presipitat, dll

DAFTAR PUSTAKA

- Bumgardner, C. H., Croom, B. P., Song, N., Zhang, Y., & Li, X. (2020). Low energy electroplasticity in aluminum alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 798(September), 140235. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140235>
- Chen, K., Zhan, L., & Yu, W. (2021). Rapidly modifying microstructure and mechanical properties of AA7150 Al alloy processed with electropulsing treatment. *Journal of Materials Science and Technology*, 95, 172–179. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.03.060>
- Dobras, D., Zimniak, Z., & Zwierzchowski, M. (2023). The effect of pulsed electric current on the structural and mechanical behavior of 6016 aluminium alloy in different states of hardening. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 23(3), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s43452-023-00700-z>
- Dong, H. R., Li, X. Q., Li, Y., Wang, Y. H., Wang, H. B., Peng, X. Y., & Li, D. S. (2022). A review of electrically assisted heat treatment and forming of aluminum alloy sheet. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120(11–12), 7079–7099. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08996-6>
- Feng, S., Jia, D., Zhang, Y., Wu, X., Guo, E., Xue, R., Gong, T., Yang, H., Li, X., & Jiang, X. (2024). Effect of Electroplastic-Assisted Grinding on Surface Quality of Ductile Iron. *Lubricants*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/lubricants12080266>
- García-Hernández, J. L., Garay-Reyes, C. G., Gómez-Barraza, I. K., Ruiz-Esparza-Rodríguez, M. A., Gutiérrez-Castañeda, E. J., Estrada-Guel, I., Maldonado-Orozco, M. C., & Martínez-Sánchez, R. (2019). Influence of plastic deformation and Cu/Mg ratio on the strengthening mechanisms and precipitation behavior of AA2024 aluminum alloys. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(6), 5471–5475. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.015>
- Kim, M. J., Yoon, S., Park, S., Jeong, H. J., Park, J. W., Kim, K., Jo, J., Heo, T., Hong, S. T., Cho, S. H., Kwon, Y. K., Choi, I. S., Kim, M., & Han, H. N. (2020). Elucidating the origin of electroplasticity in metallic materials. *Applied Materials Today*, 21, 100874. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2020.100874>
- Li, X., Xu, Z., Guo, P., Peng, L., & Lai, X. (2022). Electroplasticity mechanism study based on dislocation behavior of Al6061 in tensile process. *Journal of Alloys and Compounds*, 910, 2–5. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.164890>
- Liu, J., Jia, D., Fu, Y., Kong, X., Lv, Z., Zeng, E., & Gao, Q. (2024). Electroplasticity effects: from mechanism to application. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 131(5–6), 3267–3286. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12072-y>
- Lv, Y., Chen, G., Zhang, B., Li, H., & Huang, J. (2024). Application of electroplastic effect in mechanical processing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25–48. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14574-9>
- Marshall, R. S. G. (2024). Aluminum Continues to Shine in Commercial Aircraft Applications. *ASM International*, 182(2), 24–28. <https://doi.org/10.31399/asm.amp.2024-02.p024>
- Sutton, A. P., & Todorov, T. N. (2021). Theory of electroplasticity based on electromagnetic induction. *Physical Review Materials*, 5(11). <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.5.113605>