



UNIVERSITAS PERTAHANAN REPUBLIK INDONESIA

**Optimasi Pelapisan Material Aluminum Alloy 6061 Dengan
Penambahan Zat Aditif Asam Malonat Pada Metode *Plasma
Electrolytic Oxidation* Untuk Peningkatan Kemampuan
*Electromagnetic Wave Absorbance***

MUHAMMAD IHSAN LUBIS

320210304017

**Skripsi yang Ditulis untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan dalam
Mendapatkan Gelar Sarjana**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI FISIKA MILITER
BOGOR, 2025**

LEMBAR PERSETUJUAN SKRIPSI

Nama : Muhammad Ihsan Lubis
NIM : 320210304017
Program Studi : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Militer
Judul Skripsi : Optimasi Pelapisan Material Aluminium Alloy 6061 Dengan Penambahan Zat Aditif Asam Malonat Pada Metode *Plasma Electrolytic Oxidation* Untuk Peningkatan Kemampuan *Electromagnetic Wave Absorbance*

Dosen Pembimbing I,



Mutmainnah, S.Si., M.Si.

NIP. 199306162022032002

Tanggal : 07 Juli 2025

Dosen Pembimbing II,



M. Prisma Kamil S.Pd., Ph.D.

NIP. 199109072022021001

Tanggal : 21 Juli 2025

Mengetahui,

Kepala Program Studi Fisika,

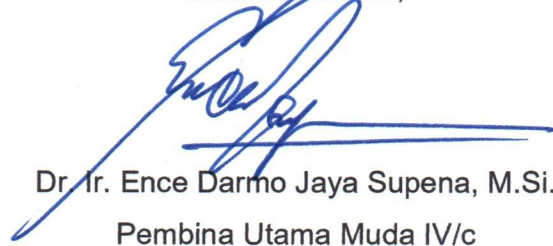


M. Zuhni P., S.Si., M.Eng.

Kolonel Tek. NRP. 522657

Tanggal : 11 Agustus 2025

Dekan Fakultas,



Dr. Ir. Ence Darmo Jaya Supena, M.Si.

Pembina Utama Muda IV/c

Tanggal : 11/8-2025

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

Nama : Muhammad Ihsan Lubis
NIM : 320210304017
Program Studi : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Militer
Judul : Optimasi Pelapisan Material Aluminium alloy 6061 Dengan Penambahan Zat Aditif Asam Malonat Pada Metode *Plasma Electrolytic Oxidation* Untuk Peningkatan Kemampuan *Electromagnetic Wave Absorbance*

No.	Nama	Tanda tangan	Tanggal
1.	Dosen Pembimbing I Mutmainnah, S.Si., M.Si. NIP.199306162022032002		07/07/2025
2.	Dosen Pembimbing II Muhammad Prisma Kamil S.Pd., Ph.D. NIP.199109072022021001		21/07/2025
3.	Dosen Penguji I Dr. Riri Murniati, S.Si., M.Si. NIP.199001202022032002		17/07/2025
4.	Dosen Penguji II Syara Ilafirda, S.Si., M.Si. NIP.199201292024212012		11/08/2025

PERNYATAAN ORISINALITAS

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya atau bagian karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan jenjang apapun di suatu Perguruan Tinggi; dan sepanjang sepengetahuan saya juga tidak terdapat istilah, frasa, kalimat, paragraph, subbab atau bab dari karya yang pernah ditulis atau diterbitkan; kecuali yang secara tertulis diajukan dalam naskah ini dan disebutkan dalam Daftar Referensi.

Apabila di kemudian hari terbukti bahwa terdapat plagiat dalam skripsi ini, saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan peraturan/undang undang yang berlaku.

Bogor, 11 Agustus 2025

A 10,000 Indonesian Rupiah banknote is shown, partially obscured by a large, stylized black ink signature. The signature appears to read 'Ihsan'. The banknote features the Garuda Pancasila emblem and the serial number 5A545AJX017204510.

Muhammad Ihsan Lubis

**LEMBAR PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH
UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Pertahanan Republik Indonesia,
saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Muhammad Ihsan Lubis
NIM : 320210304017
Program Studi : Sarjana Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Militer
Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Pertahanan Republik Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

Optimasi Pelapisan Material Aluminium alloy 6061 Dengan Penambahan Zat Aditif Asam Malonat Pada Metode *Plasma Electrolytic Oxidation* Untuk Peningkatan Kemampuan *Electromagnetic Wave Absorbance*

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Pertahanan Republik Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya

Dibuat di : Bogor
Pada tanggal : 11 Agustus 2025
Yang menyatakan



Muhammad Ihsan Lubis
NIM. 320210304017

KATA PENGANTAR

Puji syukur peneliti panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena berkat Rahmat dan karunia-Nya penulisan skripsi dengan judul: "Optimasi Pelapisan Material Aluminium Alloy 6061 Dengan Penambahan Zat Aditif Asam Malonat pada Metode *Plasma Electrolytic Oxidation* Untuk Peningkatan Kemampuan *Electromagnetic Wave Absorbance*" dapat diselesaikan.

Penyusunan skripsi ini ditujukan sebagai salah satu syarat dalam memperoleh gelar Sarjana pada program Studi Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Militer Universitas Pertahanan Republik Indonesia.

Penyusunan skripsi ini dapat diselesaikan berkat bantuan dan dukungan dari berbagai pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Untuk itu, pada kesempatan ini Kadet Mahasiswa mengucapkan terima kasih kepada:

1. Letnan Jenderal TNI (Purn.) Dr. Anton Nugroho, M.M.D.S., M.A., selaku Rektor Universitas Pertahanan Republik Indonesia.
2. Bapak Dr. Ir. Ence Darmo Jaya Supena, M.Si., selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Militer Universitas Pertahanan Republik Indonesia.
3. Kol. Tek M. Zuhnir Piliang, S.Si., M. Eng., selaku Kepala Program Studi Fisika Universitas Pertahanan Republik Indonesia.
4. Ibu Mutmainnah, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing I.
5. Bapak Muhammad Prisma Kamil, S.Pd., Ph.D., selaku Dosen Pembimbing II.
6. Bapak Parlindungan Lubis, Ibu Nia Imas Masturoh selaku orang tua penulis, serta Yasmin Annisa Lubis dan Asiah Jamila Lubis selaku adik kandung penulis yang telah memberikan dukungan serta doa selama masa pendidikan penulis.
7. Rekan-rekan Seperjuangan Prodi Fisika Cohort 2 Universitas Pertahanan Republik Indonesia.

8. Rekan-rekan Pokdoyonkor Remaja Nara Arkasena Tahun 2023/2024.

9. Adik-adik Kebanggaan Prodi Fisika Cohort 3,4 dan 5 Universitas Pertahanan Republik Indonesia.

Semoga Tuhan Yang Maha Esa membalas kebaikan-kebaikan berbagai pihak atas bantuannya.

Saya menyadari bahwa skripsi ini masih kurang sempurna, oleh karena itu dengan kerendahan hati mengharapkan kritik dan saran yang konstruktif demi kesempurnaan skripsi ini.

Akhirnya semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat terhadap pengembangan ilmu di bidang pertahanan terkait dalam upaya edukasi dan pengembangan material absorber di Indonesia.

Bogor, 11 Agustus 2025

Muhammad Ihsan Lubis

ABSTRAK

Optimasi Pelapisan Material Aluminum Alloy 6061 Dengan Penambahan Zat Aditif Asam Malonat Pada Metode *Plasma Electrolytic Oxidation* Untuk Peningkatan Kemampuan *Electromagnetic Wave Absorbance*

Dalam aplikasi strategis seperti *radar absorbing materials* (RAM) dan sistem perlindungan elektromagnetik, material dengan kemampuan menyerap gelombang elektromagnetik dan ketahanan korosi yang tinggi sangat dibutuhkan untuk meningkatkan efisiensi operasional perangkat di lingkungan ekstrem. Aluminium alloy 6061 yang dikenal karena sifat mekaniknya yang unggul, membutuhkan peningkatan performa dalam menyerap gelombang elektromagnetik dan ketahanan terhadap korosi, terutama untuk aplikasi panel *absorber* gelombang elektromagnetik. Salah satu metode yang efektif untuk meningkatkan performa material ini adalah *Plasma Electrolytic Oxidation* (PEO), yang menghasilkan lapisan oksida keras yang meningkatkan ketahanan korosi dan kekerasan material. Penambahan asam malonat (MA) dalam elektrolit PEO dapat memperbaiki struktur lapisan oksida, mengurangi porositas, dan meningkatkan ketahanan korosi. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan penggunaan MA dalam proses PEO untuk meningkatkan ketahanan korosi dan kemampuan penyerapan gelombang elektromagnetik pada aluminium alloy 6061. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi konsentrasi MA 1 gr/L, 3 gr/L, dan 5 gr/L dapat meningkatkan ketebalan lapisan oksida, kekasaran permukaan, dan kemampuan material dalam menyerap gelombang elektromagnetik pada frekuensi 8.000 MHz hingga 12.000 MHz. Konsentrasi MA 5 gr/L memberikan hasil terbaik dengan *corrosion rate* yang sangat rendah (0.051 mpy) dan resistansi polarisasi tinggi ($1.758 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$) menunjukkan ketahanan korosi yang optimal. Selain itu, konsentrasi MA 5 gr/L juga meningkatkan kemampuan penyerapan gelombang elektromagnetik hingga -1,279 dB. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan material *absorber* elektromagnetik berkinerja tinggi untuk aplikasi di bidang pertahanan dan kedirgantaraan.

Kata kunci: *Aluminium Alloy 6061, Plasma Electrolytic Oxidation (PEO), Asam Malonat, Ketahanan Korosi, Penyerapan Gelombang Elektromagnetik, Lapisan Oksida, Kekasaran Permukaan.*

ABSTRACT

Optimization of Aluminum Alloy 6061 Coating with the Addition of Malonic Acid Additive in Plasma Electrolytic Oxidation Method for Enhanced Electromagnetic Wave Absorbance Capability

In strategic applications such as radar absorbing materials (RAM) and electromagnetic protection systems, materials with high electromagnetic wave absorption capabilities and corrosion resistance are essential to enhance the operational efficiency of devices in extreme environments. Aluminum alloy 6061, known for its superior mechanical properties, requires improved performance in electromagnetic wave absorption and corrosion resistance, especially for electromagnetic wave absorber panel applications. One effective method to enhance the performance of this material is Plasma Electrolytic Oxidation (PEO), which produces a hard oxide layer that increases corrosion resistance and material hardness. The addition of malonic acid (MA) in the PEO electrolyte can improve the oxide layer structure, reduce porosity, and enhance corrosion resistance. This study aims to optimize the use of MA in the PEO process to improve corrosion resistance and electromagnetic wave absorption capability of aluminum alloy 6061. The results show that varying MA concentrations of 1 g/L, 3 g/L, and 5 g/L increase the oxide layer thickness, surface roughness, and the material's ability to absorb electromagnetic waves at frequencies from 8,000 MHz to 12,000 MHz. The 5 g/L MA concentration yielded the best results with a very low corrosion rate (0.051 mpy) and high polarization resistance ($1.758 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$), indicating optimal corrosion resistance. Moreover, the 5 g/L MA concentration also enhanced electromagnetic wave absorption capability up to -1.279 dB. This study is expected to contribute significantly to the development of high-performance electromagnetic absorber materials for defense and aerospace applications..

Keywords : Aluminum Alloy 6061, Plasma Electrolytic Oxidation (PEO), Malonic Acid, Corrosion Resistance, Electromagnetic Wave Absorption, Oxide Layer, Surface Roughness.

DAFTAR ISI

SAMPUL DEPAN	i
LEMBAR PERSETUJUAN SKRIPSI.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	iii
PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iv
KATA PENGANTAR LEMBAR PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....	v
KATA PENGANTAR.....	vi
ABSTRAK.....	viii
ABSTRACT.....	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR SINGKATAN	xvi
BAB I 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	4
1.4.2 Manfaat Praktis	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Landasan Teori.....	5
2.1.1 <i>Radar Absorber Material (Electromagnetic Wave Absorbers)</i>	5
2.1.2 Aluminium Alloy 6061	9
2.1.3 <i>Plasma Electrolytic Oxidation</i>	11

2.1.4 Asam Malonat	14
2.1.5 Karakterisasi dan Pengujian Material.....	16
2.2 Hasil Penelitian Terdahulu	25
2.3 Kerangka Berpikir	30
2.4 Hipotesis	30
BAB III METODE PENELITIAN	31
3.1 Metode dan Desain Penelitian	31
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian	31
3.3 Alat dan Bahan	33
3.3.1 Alat	33
3.3.2 Bahan	33
3.4 Variabel Penelitian	34
3.5 Prosedur Penelitian	35
3.6 Metode Analisis	36
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	37
4.1 Hasil	37
4.1.1 Pembentukan Lapisan PEO pada Al 6061	37
4.1.2 Variasi Penambahan MA Terhadap Persebaran Unsur dan Komposisi Unsur Pada Lapisan PEO	41
4.1.3 Variasi Penambahan MA Terhadap Morfologi, Kekasaran dan Ketebalan Permukaan Lapisan PEO	50
4.1.4 Analisis Elektrokimia	57
4.1.5 Pengaruh Variasi MA Terhadap Kemampuan <i>Electromagnetic Wave Absorbance</i>	60
4.2 Pembahasan	62
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	64
5.1 Kesimpulan.....	64

5.2 Saran.....	64
DAFTAR PUSTAKA	66
LAMPIRAN 1	72
LAMPIRAN 2.....	73
LAMPIRAN 3.....	74
LAMPIRAN 4.....	75

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Proses umum terjadinya penyerapan gelombang mikro melalui material.....	5
Gambar 2.2	Representasi skema penyerapan dan pemantulan gelombang elektromagnetik	5
Gambar 2.3	Mekanisme pembentukan lapisan oksida pada teknik anodisasi dan PEO	12
Gambar 2.4	Skematik lapisan hasil teknik pelapisan PEO.....	12
Gambar 2.5	Set up alat PEO	13
Gambar 2.6	Struktur kimia asam malonat.....	15
Gambar 2.7	Prinsip Kerja FESEM	16
Gambar 2.8	Diagram Skema FESEM.....	17
Gambar 2.9	Skema <i>energy-dispersive spectrometer</i>	18
Gambar 2.10	Bilangan Kompleks ($F_{hkl}=A+iB$) dengan $ F_{hkl} =\phi$	19
Gambar 2.11	Kondisi Refleksi – Hukum Bragg	20
Gambar 2.12	Skematik karakterisasi <i>Roughness</i>	20
Gambar 2.13	Skematik parameter-S pada VNA dua-port	21
Gambar 2.14	Set up alat <i>Potentiodynamic Tafel Polarization</i>	24
Gambar 2.15	Kerangka berpikir penelitian.....	29
Gambar 3.1	Gedung 224 Pusat Riset Material Maju.....	32
Gambar 3.2	Diagram Alir Penelitian	35
Gambar 4.1	Visualisasi Sampel : A) Al 6061; B) PEO-M0; C) PEO-M1; D) PEO-M3; E) PEO-M5	37
Gambar 4.2	Mekanisme Proses PEO ; A) Keadaan Awal; B) Keadaan Anodisasi; C) Keadaan <i>Breakdown Voltage</i> ; D) Keadaan <i>Critical voltage</i> ; E) Keadaan Akhir.....	37
Gambar 4.3	Perbandingan Grafik Tegangan Terhadap Waktu	38
Gambar 4.4	Peta Persebaran Unsur pada Sampel PEO-M0	42
Gambar 4.5	Peta Persebaran Unsur pada Sampel PEO-M1	42
Gambar 4.6	Peta Persebaran Unsur pada Sampel PEO-M3	43

Gambar 4.7	Peta Persebaran Unsur pada Sampel PEO-M5	43
Gambar 4.8	Komposisi unsur dari pola XRD pada sampel PEO-M0.....	44
Gambar 4.9	Komposisi unsur dari pola XRD pada sampel PEO-M1.....	45
Gambar 4.10	Komposisi unsur dari pola XRD pada sampel PEO-M3.....	46
Gambar 4.11	Komposisi unsur dari pola XRD pada sampel PEO-M5.....	47
Gambar 4.12	Pola hasil XRD pada setiap sampel PEO.....	48
Gambar 4.13	Morfologi Lapisan Permukaan Hasil PEO dan Persebaran Ukuran Pori dengan Variasi Zat Aditif MA.....	50
Gambar 4.14	Area Kekasaran Lapisan Permukaan PEO dengan Variasi Konsentrasi MA. A) PEO-M0; B) PEO-M1; C) PEO-M3; D) PEO-M5.....	53
Gambar 4.15	Parameter Kekasaran Lapisan Pada Sampel PEO	54
Gambar 4.16	Ketebalan Lapisan pada Sampel Hasil PEO	56
Gambar 4.17	Kurva <i>Potentiodynamic Tafel Polarization</i>	57
Gambar 4.18	Kurva Penyerapan Gelombang Elektromagnetik.....	60

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Pita Frekuensi Radar	7
Tabel 2.2	Komposisi paduan Al6061.....	9
Tabel 2.3	Perbandingan sifat fisik dan thermal utama paduan Aluminium alloys, carbon steels, stainless steels.....	10
Tabel 2.4	Penelitian Terdahulu	25
Tabel 3.1	Rincian Waktu Penelitian Tugas Akhir	32
Tabel 4.1	Perbandingan Perubahan Tegangan Seiring Waktu Untuk Setiap Sampel PEO	38
Tabel 4.2	Komposisi unsur dari pola XRD pada sampel PEO-M0.....	44
Tabel 4.3	Komposisi unsur dari pola XRD pada sampel PEO-M1.....	45
Tabel 4.4	Komposisi unsur dari pola XRD pada sampel PEO-M3.....	46
Tabel 4.5	Komposisi unsur dari pola XRD pada sampel PEO-M5.....	47
Tabel 4.7	Parameter Elektrokimia yang diperoleh dari plot <i>Tafel</i> <i>Polarization</i>	58

DAFTAR SINGKATAN

PEO	: <i>Plasma Electrolytic Oxidation</i>
PAOF	: <i>Porous Anodic Oxide Film</i>
FESEM	: <i>Field Emission Scanning Electron Microscope</i>
EDS	: <i>Energy Dispersive Spectroscopy</i>
XRD	: <i>X-ray Diffraction</i>
VNA	: <i>Vector Network Analyzer</i>
RAM	: <i>Radar Absorbing Material</i>
RL	: <i>Reflection Loss</i>
R _p	: Resistansi polarisasi
MA	: <i>Malonic Acid</i>
EIS	: <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i>
PEO-M0	: PEO Tanpa MA
PEO-M1	: PEO + MA 1 gr/L
PEO-M3	: PEO + MA 3 gr/L
PEO-M5	: PEO + MA 5 gr/L