

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Landasan Teori

Bab ini memaparkan teori-teori dasar dan konsep yang menjadi dasar penelitian, mencakup karakteristik Aluminium 6061 sebagai material struktural, Alumina (Al_2O_3) sebagai *Radar Absorbing Material* (RAM), prinsip *Radar Absorbing Coating* (RAC), serta peran EDTA dalam modifikasi permukaan. Pembahasan dilengkapi dengan hasil penelitian terdahulu yang relevan, penyusunan kerangka berpikir, dan perumusan hipotesis sebagai acuan dalam pelaksanaan penelitian.

2.1.1 Aluminium 6061

Aluminium telah banyak digunakan untuk komponen yang membutuhkan bobot rendah dan ketahanan yang sangat baik terhadap korosi, terutama dalam sektor industri kedirgantaraan. Sejak tahun 1930-an, aluminium telah diakui sebagai bahan pilihan dalam industri penerbangan. Biasanya, sektor kedirgantaraan menggunakan seri aluminium 2xxx dan 7xxx sebagai bahan utama untuk komponen pesawat terbang. Namun demikian, karena meningkatnya aplikasi aluminium 6061, yang memiliki banyak keunggulan seperti kemampuan bentuk yang sangat baik, ketahanan korosi yang unggul, dan efektivitas biaya, aluminium 6061 telah muncul sebagai alternatif yang layak untuk komponen pesawat terbang, terutama untuk kulit pesawat. Namun, kelemahan dari aluminium 6061 jika dibandingkan dengan seri aluminium 2xxx dan 7xxx, adalah kekuatannya yang jauh lebih rendah. Oleh karena itu, sangat penting untuk menerapkan prosedur yang bertujuan meningkatkan sifat mekanik aluminium 6061 (Dewi *et al.*, 2016)

Untuk memenuhi standar yang diperlukan untuk komponen pesawat terbang, sangat penting untuk meningkatkan kekuatan Al 6061. Teknik yang terbukti untuk menambah kekuatan melibatkan proses *cold rolling* diikuti oleh penuaan, yang dapat membuatnya cocok untuk aplikasi

tertentu, seperti kulit sayap pesawat. Al 6061 mengalami *cold rolling* dengan pengurangan 50%, 60%, dan 70%, kemudian mengalami penuaan pada suhu 200° C untuk berbagai durasi 1800, 3600, 5400, 7200, dan 10.800 detik. Investigasi berfokus pada sifat mekanik dan perubahan mikrostruktur yang terjadi setelah prosedur *cold rolling* dan penuaan. Perubahan penting dalam morfologi mikrostruktur diamati di Al 6061, menelusuri perkembangan dari keadaan seperti yang diterima, melalui fase *cold rolling*, dan berpuncak pada proses penuaan. Setelah operasi *cold rolling*, Al 6061 menunjukkan butiran memanjang, yang menjadi semakin rata pada pengurangan maksimum 70%, sedangkan struktur mikro beralih ke bentuk ekiaxial pasca-penuaan.

Sifat mekanik dinilai secara kuantitatif melalui evaluasi kekerasan dan ketahanan aus Brinell. Peningkatan nyata dalam kekerasan dan ketahanan aus diamati. Nilai kekerasan puncak dicatat dalam spesimen yang menunjukkan pengurangan 70% dengan durasi penuaan 5400 detik, mengukur 121 HBN, berbeda dengan nilai kekerasan yang diterima 65 HBN. Ketahanan aus menunjukkan peningkatan dari nilai awal $6,209951 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{mm}$ dalam kondisi seperti yang diterima menjadi $4,775436 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{mm}$ setelah penuaan. Peningkatan sifat mekanik ini dapat dikaitkan dengan regangan pengerasan yang disebabkan oleh proses *cold rolling* dan pembentukan fase sekunder (presipitasi) setelah penuaan. Sebaliknya, fase sekunder (endapan) berfungsi sebagai penghalang gerakan dislokasi, sehingga berkontribusi pada augmentasi yang diamati dalam sifat mekanik (Dewi *et al.*, 2016). Komposisi pada Aluminium 6061 dapat dilihat pada gambar 2.1

Tabel 2.1 Komposisi Aluminium 6061

Si	Mg	Fe	Cu	Cr	Zn	Ti	Unsur Lain	Al
0.63	0.98	0.19	0.18	0.05	0.10	0.08	0.15	Balance

Sumber: (Dewi *et al.*, n.d.)

Properties	Aluminum 6061
Density(g/cm ³)	2.7
Melting Onset (°C)	580
Melting Completion (°C)	650
Thermal Conductivity (W/m-K)	170
Ultimate Tensile Strength (MPa)	310
Yield Tensile Strength (Mpa)	270
Brinell Hardness	93
Elongation at Break (%)	10
Fatigue Strength (Mpa)	96
Shear Strength (Mpa)	210

Gambar 2.1 Karakteristik Aluminium 6061

Sumber : ddprototype.com

2.1.2 Al₂O₃ (Alumina) Sebagai *Radar Absorbing Material*

Aluminium oksida (Al₂O₃) adalah salah satu bahan keramik yang memiliki stabilitas termal tinggi, kekuatan mekanik yang tinggi dan ketahanan korosi yang sangat baik. Sebagai dielektrik, Al₂O₃ memiliki konstanta permitivitas yang cukup tinggi pada rentang suhu ekstrem, menjadikannya kandidat potensial untuk digunakan sebagai komponen struktur *Radar Absorbing Material* (RAM). Al₂O₃ bukanlah penyerap gelombang elektromagnetik aktif seperti bahan magnetik atau konduktif, tetapi perannya sebagai matriks atau substrat untuk pengembangan RAM sangat penting. Beberapa penelitian terbaru telah menunjukkan bahwa Al₂O₃ dikombinasikan dengan struktur material meta atau bahan tambahan lainnya dengan sifat magnetik atau konduktif, dapat secara efektif digunakan sebagai bagian dari sistem penyerapan gelombang mikro (Zhao *et al.*, 2021). Lapisan konduktif yang dicetak pada substrat Al₂O₃ dapat menghasilkan resonansi permukaan dan meningkatkan kecocokan impedansi antara udara dan material. Hal ini menghasilkan nilai *reflection loss* (RL) di atas -10 dB pada frekuensi 11,5 GHz dengan ketebalan hanya

1,5 mm bahkan pada suhu 800 °C, artinya lebih dari 90% energi gelombang mikro dapat diserap secara efektif oleh struktur tersebut. Keunggulan ini sangat penting dalam aplikasi militer dan dirgantara yang membutuhkan RAM berperforma tinggi pada kondisi suhu ekstrem.

Studi yang dilakukan oleh Yang *et al.* (2022) meningkatkan kemungkinan potensi Al₂O₃ sebagai RAM dikombinasikan dengan bahan aktif. Dalam struktur ini, Al₂O₃ bertindak sebagai fase keramik dielektrik yang mendukung pembentukan respons elektromagnetik bersamaan dengan struktur periodik logam. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa komposit ini dapat mencapai nilai RL di bawah -10 dB pada rentang frekuensi 8,5-10,4 GHz, bahkan pada suhu 500 °C. Ini menunjukkan bahwa Al₂O₃ tidak hanya memberikan stabilitas fasa dan perlindungan termal, tetapi juga berkontribusi pada performa elektromagnetik keseluruhan ketika digunakan dalam konstruksi struktur lapisan atau metamaterial. Proses manufaktur Al₂O₃, yang dapat dilakukan dengan teknologi *plasma spraying* atau *screen printing*, memberikan fleksibilitas untuk berintegrasi ke dalam desain RAM modern. Permukaan Al₂O₃ yang halus dan tahan panas dapat menjadi substrat ideal bagi lapisan penyerap lainnya, serta memungkinkan terciptanya efek multirefleksi dan peningkatan *dielectric loss* secara lokal. Sifat ini menjadi sangat penting untuk memaksimalkan interaksi antara gelombang radar dengan struktur internal material. Meskipun Al₂O₃ bukan penyerap aktif, perannya dalam struktur RAM sangat penting. Al₂O₃ bertindak sebagai media pendukung untuk bahan penyerap aktif, meningkatkan stabilitas termal, meningkatkan ketahanan material terhadap lingkungan yang ekstrem, mendukung pembentukan resonansi, dan menyebarkan gelombang elektromagnetik di dalamnya. Penggunaan Al₂O₃ sebagai bagian dari sistem RAM modern adalah pendekatan strategis untuk mengembangkan peredam gelombang mikro yang tipis, ringan, dan tahan panas, dengan bandwidth penyerapan yang luas (Yang *et al.*, 2022).

2.1.3 Radar Absorbing Coating

Radar Absorbing Coating (RAC) merupakan bahan canggih yang direkayasa untuk secara efektif menyerap gelombang radar, sehingga mengurangi *Radar Cross Section* (RCS) dari berbagai objek. Inovasi teknologi ini sangat penting dalam ranah aplikasi teknologi siluman, terutama yang berkaitan dengan pesawat tempur, kapal angkatan laut, dan berbagai kendaraan militer. Kemanjuran operasional RAC didasarkan pada pemanfaatan karakteristik elektromagnetik yang melekat pada bahan tertentu untuk menangkap energi gelombang radar dan kemudian mengubahnya menjadi energi panas melalui berbagai mekanisme pembuangan energi. Mekanisme ini memfasilitasi penurunan substansional dalam pantulan gelombang radar yang diarahkan kembali ke sistem radar lawan, akibatnya membuat deteksi objek tersebut secara signifikan lebih menantang (Nicholas & Strattan, 1996; Foulke, 1992).

Biasanya, RAC terdiri dari bahan yang dicirikan oleh konstanta dielektrik yang meningkat dan permeabilitas magnetik spesifik, yang sengaja direkayasa untuk berfungsi di spektrum frekuensi radar yang luas. Di antara bahan yang umum digunakan adalah komposit berbasis ferit, graphene, dan *carbon nanotube* (CNT), yang baik karena sifat elektromagnetiknya yang luar biasa. Studi empiris lebih lanjut menunjukkan bahwa penggabungan bahan polimer konduktif, seperti polianilin dan polipirol, memfasilitasi integrasi fleksibel dengan karakteristik geometri rumit dari badan pesawat atau kapal angkatan laut (Zhu *et al.*, 2021; Kim *et al.*, 2020).

Prinsip operasional yang mendasari RAC didasarkan pada tiga mekanisme utama awalnya, gelombang radar yang menabrak permukaan berlapis RAC diserap oleh material melalui interaksi dielektrik dan magnetik. Selanjutnya, energi gelombang radar diubah menjadi energi panas melalui pembuangan energi, menghalangi pantulan kembali ke sumber radar. Terakhir, lapisan ini mampu merekayasa gelombang yang dipantulkan

untuk mengalami interferensi destruktif, sehingga melemahkan sinyal yang kembali ke sistem radar permusuhan (Raj *et al.*, 2022; Zhu *et al.*, 2021). Dengan penerapan struktur berpori atau nanokomposit, seperti nanoplates graphene, RAC telah ditunjukkan untuk meningkatkan kemanjuran penyerapan gelombang radar dengan melebihi 90% di berbagai frekuensi (Yadav *et al.*, 2020; Lin, 2014).

Penggunaan RAC sangat penting dalam kendaraan militer kontemporer. Pada pesawat siluman seperti F-22 Raptor dan B-2 Spirit, lapisan ini mengurangi deteksi radar melalui kombinasi sinergis bahan penyerap gelombang dan desain aerodinamis yang menyebarkan gelombang radar jauh dari asalnya. Misalnya, penelitian menunjukkan bahwa penerapan RAC berbasis graphene dalam pesawat siluman dapat mengurangi RCS menjadi di bawah 1 m^2 , sangat kontras dengan pesawat konvensional yang mungkin menunjukkan nilai RCS dalam ratusan meter persegi (Liu *et al.*, 2023). Pada kapal angkatan laut, RAC diterapkan ke permukaan eksternal untuk mengurangi refleksi radar, pertimbangan penting dalam operasi maritim di mana risiko terhadap deteksi radar musuh.

Selain itu, RAC juga digunakan pada kendaraan lapis baja untuk meminimalkan deteksi radar dalam pertempuran, sehingga meningkatkan kemampuan bertahan hidup di lingkungan dengan tingkat ancaman yang tinggi (Sun *et al.*, 2024). Kemajuan terbaru telah memuncak dalam pengembangan komposit nano yang menggabungkan bahan berbasis karbon dengan ferit, yang berpuncak pada lapisan ringan yang menunjukkan efisiensi penyerapan gelombang radar yang sangat tinggi. Inovasi nanostruktur ini memungkinkan pengurangan ketebalan lapisan tanpa mengorbankan kinerja, faktor penting dalam mempertahankan profil ringan untuk kendaraan militer (Zhu *et al.*, 2021).

Radar Absorbing Coating (RAC) merupakan pendekatan teknologi canggih yang bertujuan mengurangi deteksi radar dengan memanfaatkan karakteristik elektromagnetik material untuk menyerap energi gelombang

radar dan kemudian mengubahnya menjadi energi panas. Setelah timbulnya gelombang radar pada substrat yang menampilkan lapisan RAC, gelombang dibagi menjadi tiga komponen utama: refleksi, transmisi, dan penyerapan. Impedansi elektromagnetik material (Z_m) disesuaikan agar sangat menyerupai impedansi gelombang radar dalam medium atmosfer (Z_0) agar dapat mengoptimalkan kapasitas penyerapan, sesuai dengan persamaan

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad (2.1)$$

Jika kondisi $Z_m = Z_0$ terpenuhi, maka koefisien refleksi R dapat dinyatakan sebagai

$$R = \left| \frac{Z_m - Z_0}{Z_m + Z_0} \right| \quad (2.2)$$

yang akan mendekati nol, sehingga memungkinkan sebagian besar gelombang radar menembus lapisan material (Zhu *et al.*, 2021).

Gelombang radar yang menembus material RAC mengalami penyerapan melalui mekanisme yang terkait dengan pembuangan energi elektromagnetik. Fenomena penyerapan ini mengikuti hukum Lambert-Beer, yang mendalilkan bahwa intensitas gelombang berkurang secara eksponensial dengan kedalaman material, seperti yang digambarkan oleh

$$E(z) = E_0 e^{-\alpha z} \quad (2.3)$$

di mana α menandakan konstanta redaman. Parameter α bergantung pada karakteristik intrinsik material, yang meliputi permeabilitas magnetik relatif (μ_r) dan permitivitas relatif (ϵ_r), serta frekuensi radar (f), melalui relasi

$$a = \omega \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \operatorname{Im}(\sqrt{\mu_r \epsilon_r}) \quad (2.4)$$

Bahan yang menunjukkan atribut dielektrik dan magnetik yang jelas, seperti ferit, graphene, dan karbon nanotube (CNT), sering digunakan di

RAC karena kemampuan penyerapan energinya yang superior di seluruh spektrum frekuensi radar yang luas (Zhu *et al.*, 2021; Sun *et al.*, 2024).

Selain itu, selain sifat material yang melekat, ketebalan lapisan RAC direkayasa dengan cermat berdasarkan panjang gelombang radar spesifik yang ditargetkan. Dengan menggunakan prinsip resonansi seperempat panjang gelombang, ketebalan lapisan d dikalibrasi menjadi

$$d = \frac{\lambda}{4} \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \quad (2.5)$$

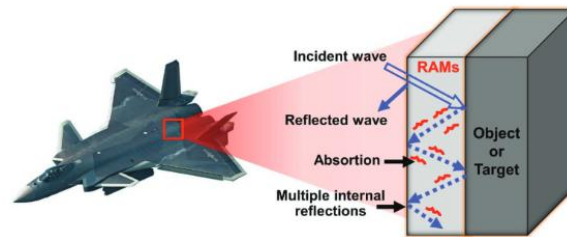
dimana interferensi destruktif terjadi antara gelombang yang dipantulkan dari batas atas dan bawah lapisan. Konfigurasi strategis ini secara signifikan mengurangi refleksi radar yang kembali ke sumbernya (Raj *et al.*, 2022). Selanjutnya, RAC dirumuskan untuk memfasilitasi konversi energi radar menjadi energi panas melalui disipasi, sebagaimana diartikulasikan oleh persamaan

$$P_{loss} = \sigma |E|^2 \quad (2.6)$$

dimana σ menunjukkan konduktivitas listrik material (Kim, 2016). Bahan seperti ferit dan polimer konduktif dapat meningkatkan kemanjuran proses konversi ini (Zhu *et al.*, 2021).

Sebagai teknologi siluman, RAC menemukan aplikasi luas dalam kendaraan militer, termasuk pesawat tempur dan kapal angkatan laut. Dalam pesawat siluman, dicontohkan oleh F-22 Raptor dan B-2 Spirit, RAC digunakan bersama dengan desain aerodinamis untuk menyebarkan dan menyerap gelombang radar, sehingga mengurangi *Radar Cross Section* (RCS) menjadi di bawah 1 m², sangat kontras dengan pesawat konvensional yang menunjukkan nilai RCS dalam ratusan meter persegi (Liu *et al.*, 2023; Jang, 2019). Dalam konteks kapal angkatan laut, lapisan ini telah digunakan untuk meminimalkan pantulan radar dari permukaan yang luas yang biasanya mudah diidentifikasi oleh sistem radar maritim (Foulke, 1992; Westwick, 2019). Kemajuan terbaru juga telah menyaksikan

munculnya nanokomposit berbasis graphene dan nanotube karbon, yang memberikan kinerja tinggi sambil mempertahankan profil yang ringan, sehingga membuatnya sangat efisien untuk aplikasi di kendaraan laut dan udara (Sun *et al.*, 2024; Yadav *et al.*, 2020).



Gambar 2.2 Mekanisme Redaman Elektromagnetik

Sumber: (S. H. Kim *et al.*, 2023)

2.1.4 Plasma Electrolytic Oxidation

Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) merupakan salah satu teknik rekayasa permukaan berbasis elektrokimia yang menjanjikan, hal ini disebabkan lapisan yang dihasilkan dalam proses PEO umumnya tebal, keras, dan padat pada logam ringan seperti aluminium, titanium, magnesium, dan substrat paduan ringan lainnya (Sikdar *et al.*, 2021). Lapisan yang tumbuh pada saat proses ini memiliki ketebalan kisaran puluhan hingga ratusan mikron pada substrat yang secara signifikan dapat meningkatkan properti material, seperti ketahanan korosi, ketahanan aus, dan sifat penghalang termal (Rapheal *et al.*, 2016). Lapisan yang terbentuk melalui proses ini melibatkan tiga operasi simultan: reaksi elektrokimia, reaksi kimia plasma, dan reaksi difusi oksigen termal (Sikdar *et al.*, 2021).

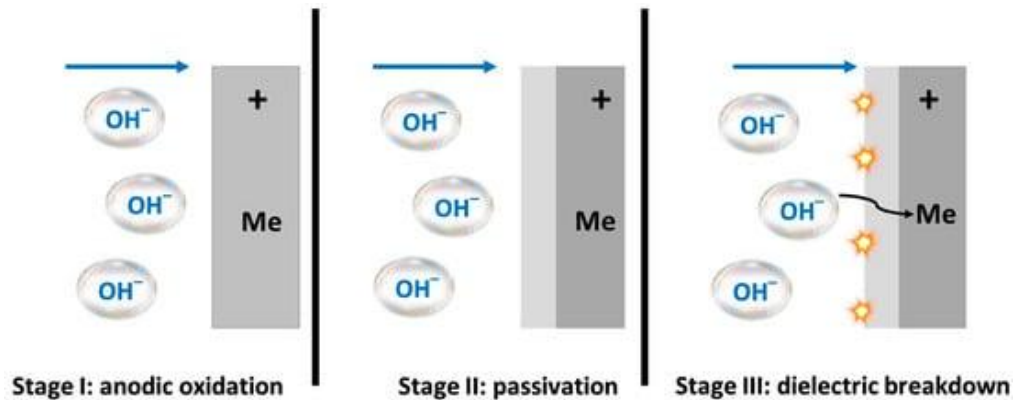
Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) secara alternatif disebut sebagai *Micro-Arc Oxidation* (MAO), *Anodic Spark Deposition* (ASD), *Plasma Chemical Oxidation* (PCO), atau *Anodic Oxidation by Spark Discharge* (ANOF, Jerman: *Anodische Oxidation Unter Funkenentladung*). Metodologi pelapisan konversi ini berfungsi untuk meningkatkan karakteristik permukaan substrat logam tertentu yang menunjukkan

kecenderungan untuk menjadi pasif dalam elektrolit berair yang cukup sesuai. Proses ini secara jelas dicirikan oleh terjadinya pelepasan, yang bermanifestasi di bawah medan listrik yang kuat dalam konfigurasi yang terdiri dari substrat, lapisan oksida, selubung gas, dan elektrolit, sehingga secara kritis mempengaruhi morfologi dan atribut komposisi lapisan yang dihasilkan. *Electric Breakdown* yang terjadi dalam kerangka ini menghasilkan keadaan plasma, di mana, di bawah kondisi polarisasi anodik, bahan substrat diubah menjadi senyawa yang mencakup bahan substrat itu sendiri (termasuk konstituen paduan), oksigen, dan komponen yang berasal dari elektrolit (Simchen *et al.*, 2020)

Proses *Plasma Electrolytic Oxidation* (PEO) pada dasarnya didasarkan pada fenomena oksidasi anodik yang terjadi pada substrat logam. Ketika elektroda logam mengalami polarisasi anodik dalam media elektrolit, berbagai reaksi elektrokimia dapat terjadi. Elektroda logam, yang menunjukkan ketidaklarutan dalam larutan elektrolitik, menginduksi pembebasan oksigen, suatu proses yang disebabkan oleh elektrolisis air. Sebaliknya, jika elektroda logam mengalami pembubaran di dalam elektrolit, garam yang terdiri dari bahan elektroda dan konstituen dari elektrolit akan terbentuk, mengakibatkan penipisan elektroda. Jalur reaksi tersier melibatkan interaksi bahan anoda dengan oksigen yang berasal dari elektrolit, yang mengarah pada pembentukan film pasif tipis, yang tidak larut atau memiliki kelarutan minimal dalam media elektrolit.

Film pasif biasanya terdiri dari oksida atau hidroksida yang terkait dengan bahan anoda; Namun, juga telah didokumentasikan bahwa senyawa substrat dan berbagai konstituen elektrolit kompleks dapat berkontribusi pada pembentukan film. Untuk mengurangi reaksi, sangat penting untuk mempertahankan rasio yang menguntungkan antara volume sel satuan produk reaksi dan bahan substrat. Dalam kasus yang melibatkan oksida logam, hubungan ini digambarkan oleh rasio *Pilling-Bedworth* (PBR),

hidroksida dan senyawa yang lebih rumit, diartikulasikan sebagai rasio produk/logam (PMR) (Lohrengel, 1993 ; Laiwen *et al.*, 2011)

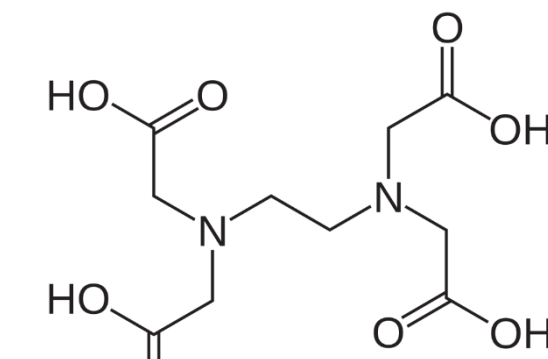


Gambar 2.3 Mekanisme PEO

Sumber: (Sikdar *et al.*, 2021)

2.1.5 Ethylenediaminetetraacetic Acid

Ethylenediaminetetraacetic Acid (EDTA) dengan rumus kimia $\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{N}_2\text{O}_8$ berfungsi sebagai agen pengkelat yang banyak digunakan di berbagai domain karena kapasitasnya untuk menyerap kation logam. Diformulasikan selama tahun 1930-an, EDTA menemukan kegunaan dalam spektrum aplikasi yang mencakup sektor medis dan industri.



Gambar 2.4 Ethylenediaminetetraacetic Acid

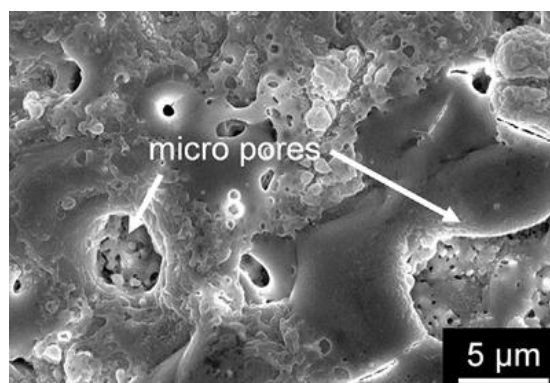
Sumber : glentham.com

2.1.5.1 Karakteristik Porositas Permukaan EDTA Pada PEO

Ketika EDTA digunakan dalam proses PEO, porositas lapisan anorganik berkurang menjadi sekitar 3,2%. Angka ini secara signifikan lebih

rendah dibandingkan dengan tingkat porositas yang dicapai dengan agen pengompleks alternatif seperti Asam Nitritotriasetat (NTA), yang menghasilkan porositas sekitar 10,5%. Penggabungan EDTA juga memfasilitasi sintesis senyawa stabil, termasuk Al_2SiO_3 , sebagai hasil dari perlakuan termal yang dibantu plasma.

Karakteristik porositas lapisan PEO dipengaruhi oleh komposisi elektrolit serta penggabungan aditif seperti EDTA. Kompleks yang dibentuk oleh EDTA memiliki potensi untuk mengubah dinamika pelepasan plasma, menghasilkan medan listrik yang lebih seragam dan porositas berkurang dibandingkan dengan pelapis yang tidak memiliki aditif tersebut. Umumnya, pelapis PEO dicirikan oleh arsitektur berpori sebagai konsekuensi dari sifat yang melekat dari pelepasan plasma (Kamil *et al.*, 2020) ; (Yuting, 2024).



Gambar 2.5 Porositas Permukaan EDTA pada Aluminium

2.1.5.2 Komposisi Fasa EDTA Pada PEO

Komposisi fase lapisan PEO menunjukkan variabilitas yang cukup besar tergantung pada elektrolit spesifik yang digunakan. Penggabungan EDTA dalam formulasi elektrolitik memiliki potensi untuk memodifikasi komposisi fasa dengan mempengaruhi dinamika pelepasan plasma dan asimilasi unsur-unsur seperti tembaga, yang selanjutnya dapat menyebabkan pembentukan fase Cu_2O dan CuO (Kamil *et al.*, 2020)

2.1.5.3 Ketebalan Coating

Ketebalan lapisan PEO dipengaruhi oleh durasi perawatan dan komposisi elektrolit. Ketebalan lapisan ini dapat bervariasi dari beberapa

mikrometer hingga puluhan mikrometer. Penggabungan EDTA dapat mendorong pertumbuhan lapisan dengan meningkatkan pembubaran bahan substrat, sehingga berkontribusi pada ketebalan keseluruhan lapisan (Kamil *et al.*, 2020)

2.1.5.4 Pengujian VNA

VNA terutama digunakan untuk mengevaluasi parameter S dalam jaringan distribusi daya, yang mengharuskan pemeriksaan karakteristik transmisi dan refleksi sinyal listrik di antara berbagai komponen. Teknik ini banyak digunakan dalam domain elektronik dan telekomunikasi (Golestani, 2020). Dalam metodologi ini, kuantifikasi EDTA dicapai melalui titrasi coulometrik yang dilengkapi dengan deteksi titik akhir spektrofotometri. Teknik ini terbukti sangat menguntungkan di lingkungan akademik untuk menjelaskan seluk-beluk kimia dan penerapan metodologi analisis instrumental. Menyelidiki penerapan VNA dalam analisis kimia, khususnya mengenai EDTA, dapat mengungkap peluang penelitian baru, terutama dalam menjelaskan interaksi EDTA dengan beragam ion atau dalam matriks kompleks di mana sifat listrik memiliki relevansi yang signifikan.

2.1.5.5 Corossion Test

EDTA berfungsi sebagai penghambat korosi untuk aluminium dalam lingkungan asam. Pada konsentrasi yang berkurang, EDTA membentuk kompleks yang stabil dengan aluminium, menghasilkan efisiensi penghambatan yang dapat mencapai setinggi 89%. Sebaliknya, pada konsentrasi tinggi, ini meningkatkan korosi karena pembentukan kompleks yang tidak stabil. Tingkat korosi aluminium dalam larutan natrium klorida yang dilengkapi dengan EDTA meningkat dengan meningkatnya tingkat pH, terutama pada nilai pH 7,5 dan 9,5, di mana peningkatan konsentrasi EDTA memfasilitasi peningkatan proses korosi (Wrubl *et al.*, 1991). Fenomena ini dapat dikaitkan dengan pembentukan kompleks yang tidak stabil pada tingkat pH tinggi, yang gagal menawarkan tindakan perlindungan yang memadai. Berbagai metodologi, termasuk teknik potensiodinamik dan

potensiostatik, selain spektroskopi impedansi elektrokimia, telah digunakan untuk menyelidiki karakteristik elektrokimia aluminium dalam larutan yang mengandung EDTA.

2.2. Hasil Penelitian Terdahulu

Aluminium 6061 banyak digunakan karena kekuatan, ketahanan korosi, dan bobot ringannya, namun perlu modifikasi permukaan untuk meningkatkan kemampuan sebagai *electromagnetic absorber*. Metode *Plasma Electrolytic Oxidation* (PEO) mampu membentuk lapisan oksida dengan sifat yang dapat disesuaikan melalui variasi elektrolit. Penambahan *Ethylenediaminetetraacetic Acid* (EDTA) berpotensi mengubah morfologi dan komposisi lapisan melalui mekanisme kompleksasi ion, sehingga mendukung peningkatan kinerja penyerapan gelombang elektromagnetik. Beberapa penelitian sebelumnya telah mengkaji PEO pada aluminium dengan berbagai parameter dan aditif. Ringkasan hasil penelitian tersebut disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

No	Nama Pengarang (Tahun)	Judul	Hasil	Persamaan	Perbedaan
1	Qing Zhang, Dong-dong Wang, Yan Wang, Qing-wen Li, Han Chen, De-jiu Shen, Da-long Li (2020)	<i>The influence of EDTA-2Na on microstructure and corrosion resistance of PEO coating for AA1060 alloy</i>	Gambar dari Scanning Electron Microscope (SEM) menunjukkan bahwa permukaan pelapisan menjadi lebih tersebar setelah penambahan EDTA-2Na. Nodul yang terbentuk pada permukaan pelapisan, yang kaya akan silikon (Si), meningkat seiring dengan bertambahnya konsentrasi EDTA-2Na. Selain itu, pelapisan ini juga menunjukkan peningkatan jumlah saluran pelepasan yang ada di bawah permukaan, yang pada akhirnya menghasilkan lapisan luar yang lebih padat. Meskipun ketebalan lapisan pelapisan berkurang dengan penambahan	Penelitian ini langsung relevan karena menggunakan EDTA untuk memodifikasi permukaan aluminium	Penelitian ini tidak secara spesifik membahas mengenai penyerapan gelombang elektromagnetik

			konsentrasi EDTA-2Na, lapisan dalam tetap tipis, sekitar 2 μm , sementara lapisan luar semakin padat.		
2	Aiming Bu, Yongfu Zhang, Yan Xiang, Yunjie Yang, Weiwei Chen, Huanwu Cheng, Lu Wang (2020)	<i>Formation of laminated nano-coatings for enhanced anti-oxidation and electromagnetic wave absorbing properties of carbon fiber</i>	Metode PEO, seperti yang dijelaskan dalam penelitian sebelumnya, menghasilkan lapisan oksida yang dapat meningkatkan sifat-sifat fisik dan elektromagnetik dari permukaan logam. Ini mirip dengan penelitian yang dilakukan pada lapisan SiC yang terbentuk di atas lapisan Ni-P, yang memberikan hasil penyerapan elektromagnetik yang lebih baik	Menggunakan proses PEO pada aluminium 6061 untuk meningkatkan sifat elektromagnetik.	Tidak membahas penggunaan EDTA dalam elektrolit dan lebih menekankan pada pengujian karakteristik shielding daripada kemampuan penyerap elektromagnetik.
3	Jie Song, Lixi Wang, Naicen Xu and Qitu Zhang (2009)	<i>Microwave Absorbing Properties of Magnesium-substituted MnZn Ferrites Prepared by</i>	Penurunan nilai permittivitas (ϵ'') pada ferrit yang dimodifikasi dengan magnesium memberikan keuntungan dalam penyerapan elektromagnetik, yang juga didorong oleh peningkatan μ'' pada frekuensi yang lebih rendah. Hal ini	Penelitian ini langsung relevan karena menggunakan EDTA untuk memodifikasi permukaan aluminium	Penelitian sebelumnya fokus pada ferrite MnZn yang dimodifikasi dengan magnesium menggunakan metode kompleksasi Citrate-

		<i>Citrate-EDTA Complexing Method</i>	relevan dengan modifikasi permukaan aluminium, di mana lapisan oksida yang terbentuk dari proses PEO dapat disesuaikan untuk meningkatkan daya serapnya terhadap gelombang elektromagnetik pada frekuensi tertentu. Penggunaan EDTA dalam larutan PEO dapat membantu dalam membentuk lapisan yang memiliki sifat dielektrik yang disesuaikan untuk aplikasi penyerap elektromagnetik		EDTA untuk meningkatkan sifat penyerap gelombang elektromagnetik (microwave absorption). Di sini, ferrite adalah bahan yang digunakan untuk aplikasi penyerap elektromagnetik, dan modifikasi dilakukan pada struktur kristal ferrite itu sendiri
4	Qiang Sun, Quantong Jiang, Jizhou Duan, Siwei Wu, Chang Liu, Heng Tang, Hao	<i>Preparation and properties of Mg-Nd binary alloy MAO/SiO₂@α-Fe₂O₃ organic composite coating</i>	Penelitian ini menunjukkan bahwa lapisan komposit MAO/SiO ₂ @ α -Fe ₂ O ₃ yang disiapkan melalui proses micro-arc oxidation (MAO) dan pelapisan organik memiliki sifat penyerapan gelombang elektromagnetik yang sangat baik. Hasil pengujian menunjukkan bahwa	Menggunakan proses MAO atau yang dikenal dengan metode PEO untuk memodifikasi permukaan aluminium dan menguji kemampuan penyerapan gelombang elektromagnetik.	Penelitian ini menggunakan magnesium alloy (Mg-Nd) dengan lapisan oksida MAO yang dilapisi dengan SiO ₂ dan α -Fe ₂ O ₃ untuk meningkatkan

	Shi, Liying Song, dan Baorong Hou (2024)		kemampuan penyerapan gelombang elektromagnetik meningkat seiring dengan peningkatan rasio massa SiO ₂ dan α -Fe ₂ O ₃ dalam lapisan komposit tersebut.		kemampuan penyerapan gelombang elektromagnetik. Penelitian ini juga memfokuskan pada nanopartikel α -Fe ₂ O ₃ dan SiO ₂ sebagai pengisi dalam lapisan komposit untuk meningkatkan kinerja penyerapan.
5	Feng Zhanga, Wei Cuia, Bingbing Wanga, Binghui Xua, Xiaohan Liua, Xuehua Liua, Zirui Jiaa,b,	<i>Morphology-control synthesis of polyaniline decorative porous carbon with remarkable electromagnetic wave absorption capabilities</i>	EDTA-2Na digunakan untuk mempersiapkan porous carbon yang kemudian dilapisi dengan polyaniline (PANI). Penggunaan EDTA sebagai prekursor karbon memberikan lapisan karbon berpori yang memiliki struktur pori yang luas, yang penting untuk meningkatkan kemampuan penyerapan gelombang elektromagnetik.	Penelitian ini menguji penggunaan EDTA untuk meningkatkan kemampuan elektromagnetik absorber, yang merupakan inti dari penelitian	Menggunakan porous carbon sebagai material dasar yang dimodifikasi dengan polyaniline (PANI). EDTA-2Na digunakan sebagai prekursor karbon untuk menghasilkan material karbon berpori, yang

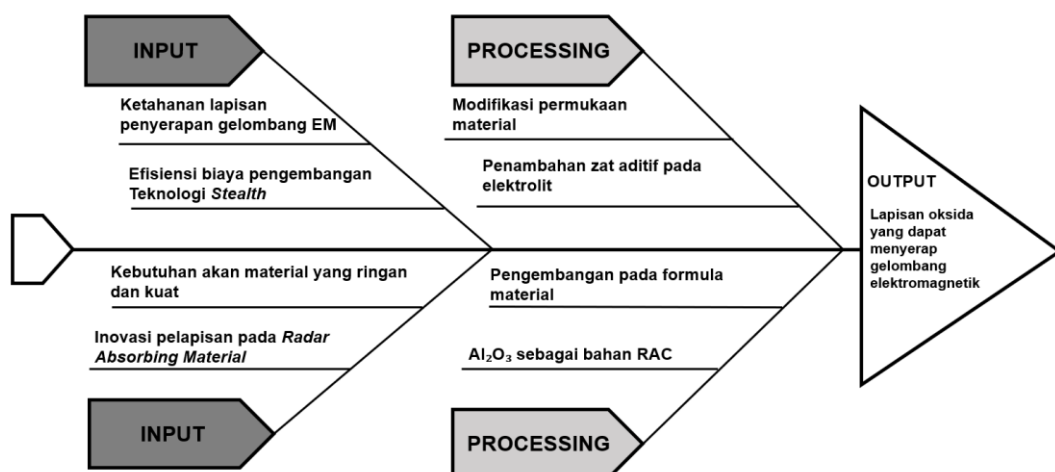
	Guanglei Wua (2020)				kemudian dilapisi dengan PANI untuk meningkatkan kemampuan penyerapan gelombang elektromagnetik
--	------------------------	--	--	--	---

Sumber : dibuat oleh penulis

Keterbaruan dalam penelitian ini yaitu Penggunaan Aluminium 6061 yang dimodifikasi permukaannya dengan Metode PEO dengan menambahkan aditif EDTA untuk mendapatkan hasil yang maksimal dalam penyerapan gelombang elektromagnetik.

2.3. Kerangka Berpikir

Kerangka berpikir ini menekankan perumusan bahan yang dirancang untuk meningkatkan teknologi siluman, yang digunakan dalam pesawat siluman untuk mengurangi deteksi oleh radar dan berbagai sistem elektromagnetik. Komponen penting dalam domain teknologi ini adalah penggabungan penyerap elektromagnetik, elemen yang mahir menangkap gelombang elektromagnetik untuk mencegah pantulannya kembali ke radar. Aluminium 6061 telah dipilih sebagai bahan dasar karena sifatnya yang ringan, kekuatan mekanik, dan kemudahan modifikasi. Untuk meningkatkan kapasitasnya untuk menyerap gelombang elektromagnetik, permukaan aluminium mengalami perubahan melalui proses *Plasma Electrolytic Oxidation* (PEO). Dalam prosedur ini, *Ethylenediaminetetraacetic Acid* (EDTA) diintegrasikan sebagai *complexing agent* untuk meningkatkan integritas lapisan oksida yang dihasilkan. Modifikasi ini dimaksudkan untuk menghasilkan lapisan oksida yang substansif, tangguh, dan mahir dalam menyerap gelombang elektromagnetik, sehingga memperkuat kemampuan siluman dalam aplikasi yang berkaitan dengan pesawat siluman.



Gambar 2.6 Kerangka Berpikir

2.4. Hipotesis

Berdasarkan latar belakang permasalahan, studi pustaka, serta rumusan masalah yang telah dikemukakan sebelumnya, maka dirumuskan hipotesis penelitian sebagai dugaan sementara terhadap hasil yang akan diperoleh. Hipotesis ini disusun untuk memberikan arah dalam pelaksanaan eksperimen serta menjadi dasar dalam analisis hasil penelitian. Adapun hipotesis yang diajukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a) Penambahan Ethylenediaminetetraacetic Acid (EDTA) dalam larutan elektrolit selama proses Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) pada Aluminium 6061 akan memodifikasi morfologi permukaan menjadi lebih halus dan homogen serta membentuk komposisi kimia yang mengandung fasa oksida aluminium yang lebih stabil.
- b) EDTA berperan sebagai agen pengompleks yang dapat meningkatkan ketebalan dan memperbaiki kualitas lapisan oksida yang terbentuk selama proses PEO pada Aluminium 6061, sehingga menghasilkan lapisan yang lebih padat, teratur, dan tahan terhadap degradasi lingkungan.
- c) Modifikasi Aluminium 6061 dengan metode PEO dan penambahan EDTA memiliki potensi dalam meningkatkan material sebagai penyerap gelombang elektromagnetik, dan performanya secara keseluruhan lebih unggul dibandingkan material yang tidak dimodifikasi.