

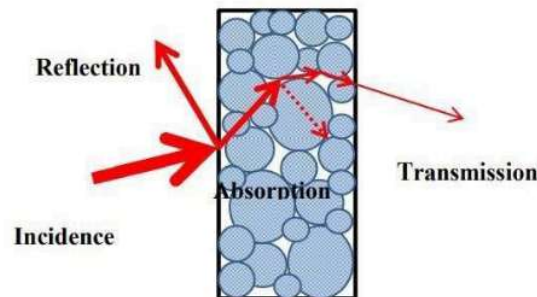
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

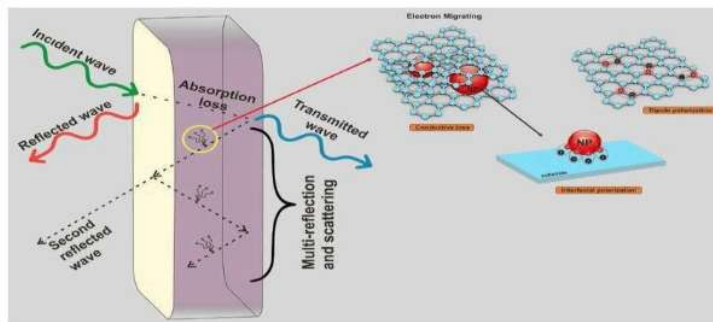
2.1.1 Radar Absorber Material (*Electromagnetic Wave Absorbers*)

Absorber gelombang elektromagnetik (*Electromagnetic Wave Absorbers*) menyerap energi gelombang elektromagnetik untuk mengurangi pantulan dan transmisi, penting dalam mengatasi polusi elektromagnetik dan meningkatkan teknologi siluman (Akinay *et al.*, 2023; Quan *et al.*, 2017). Absorbansi material mengacu pada kemampuannya menyerap energi gelombang, yang sebagian besar dikonversi menjadi panas. Konsep ini dijelaskan oleh hukum Beer-Lambert yaitu $A = \epsilon bc$ yang menyatakan bahwa absorbansi sebanding dengan konsentrasi bahan penyerap dan panjang lintasan gelombang.



Gambar 2.1 Proses umum terjadinya penyerapan gelombang mikro melalui material

Sumber : (Che Mansor *et al.* 2015)



Gambar 2.2 Representasi skema penyerapan dan pemantulan gelombang elektromagnetik

Sumber : (Akinay *et al.* 2023)

Mekanisme penyerap gelombang elektromagnetik pada gambar 2.2 tersebut melibatkan tiga proses utama, yaitu refleksi, penyerapan, dan transmisi, dengan kontribusi tambahan dari multi-refleksi dan hamburan di dalam material. Ketika gelombang datang mengenai permukaan material, sebagian energi akan dipantulkan sebagai gelombang terpantul, namun pada material penyerap yang baik pantulan ini diminimalkan melalui penyesuaian impedansi permukaan sehingga lebih banyak energi gelombang masuk ke dalam material. Energi yang masuk kemudian mengalami penyerapan (*absorption loss*) melalui beberapa mekanisme, antara lain kehilangan konduktif akibat migrasi elektron pada struktur konduktif, polarisasi dipol yang terjadi akibat orientasi ulang dipol material terhadap medan listrik gelombang, dan polarisasi antarmuka yang muncul akibat akumulasi muatan pada batas antara dua fase material seperti nanopartikel dengan matriks penyusunnya. Di dalam material, gelombang juga mengalami multi-refleksi dan hamburan yang memperpanjang lintasan propagasi gelombang sehingga peluang penyerapan energi semakin besar. Sebagian kecil energi yang tidak terserap akan keluar sebagai gelombang tertransmisi. Efektivitas material penyerap diukur melalui nilai *Reflection Loss* (RL), di mana semakin negatif nilai RL menunjukkan kinerja penyerapan yang semakin baik; misalnya RL -10 dB menunjukkan sekitar 90% energi terserap, sedangkan RL -20 dB menunjukkan penyerapan hingga 99%. (Akinay *et al.* 2023).

Material penyerap ini beroperasi melalui dua mekanisme utama yaitu, penyerapan energi gelombang elektromagnetik yang menghasilkan panas dan refleksi internal berganda yang mengurangi intensitas gelombang melalui hamburan di dalam material. Mekanisme ini memungkinkan *Radar Absorbing Materials* (RAM) untuk meredam radiasi elektromagnetik pada berbagai rentang frekuensi, sehingga efektif dalam mengurangi deteksi radar (Kim *et al.* 2023; Ruiz-Perez *et al.* 2022).

Material penyerap ideal harus memiliki sifat elektromagnetik yang memungkinkan *Impedance matching* antara material dan udara agar

gelombang elektromagnetik dapat masuk dan diserap secara maksimal. Karakteristik lain yang diinginkan mencakup densitas rendah, stabilitas termal, ketahanan korosi, serta konduktivitas listrik dan magnetik yang tinggi (Aytaç *et al.* 2020; Kim *et al.* 2023b).

Selain itu, material penyerap harus mampu beradaptasi dengan berbagai kondisi lingkungan. Material tekstil yang fleksibel dan ekonomis menunjukkan potensi besar untuk diaplikasikan pada permukaan kompleks, sementara penambahan filler magnetik seperti partikel besi karbonil dapat meningkatkan kapasitas penyerapan, terutama pada frekuensi tinggi (Chen *et al.* 2021).

Tabel 2.1 Pita Frekuensi Radar

Pita radar	Jangkauan frekuensi	Panjang gelombang	Kegunaan
TLF	<3 Hz	>100.000 km	Aktivitas saraf
ELF	3-30 Hz	100.000–10.000 km	Aktivitas saraf, komunikasi dengan kapal selam
SLF	30-300 Hz	10.000-1000 km	Komunikasi dengan kapal selam
ULF	300-3000 Hz	1000-100 km	Komunikasi melalui kapal selam, komunikasi di tambang di seluruh daratan
VLF	3-30 kHz	100-10 km	Bantuan radio, sinyal waktu, komunikasi kapal selam
LF	30-300 kHz	10-1 km	Bantuan radio, sinyal waktu, siaran AM, siaran radio AM (Eropa dan sebagian Asia), RFID, radio amatir
MF	300-3000 kHz	1 km-100 m	Siaran AM (jaringan menengah), radio amatir, pelacak longsor
HF	3-30 MHz	100-10 m	Pengawasan di atas cakrawala: pengawasan jarak jauh dan rendah
VHF	30-300 MHz	10-1 m	Pengawasan jangka panjang, pemetaan permukaan tanah, pemantauan penetrasi tanah (resolusi rendah/sedang)
UHF	300-1000 MHz	1-0,3 m	Pengawasan jarak jauh, FOPEN (resolusi rendah)
L	1-2 GHz	30-15 cm	Pengawasan lalu lintas udara jangka panjang: kontrol lalu lintas udara menengah, efek cuaca moderat
S	2-4 GHz	15-7,5 cm	Pemetaan resolusi tinggi, altimetri satelit, pengawasan bandara, pengawasan jangka pendek
C	4-8 GHz	7,5-3,75 cm	Pengawasan jangka panjang di bandara, pemantauan lokasi senjata, efek peningkatan kelembaban di area hujan ringan/sedang
X	8-12,5 GHz	3,75-2,4 cm	Pelacakan jangka pendek, panduan misil, pencarian radar misil, intersepsi pesawat terbang, pemantauan medan tempur, lokasi senjata
Ku	12,5-18 GHz	2,4-1,7 cm	Pemetaan citra resolusi tinggi, sensor radar tinggi, pengawasan jangka

			pendek di area dengan penyerap uap air rendah
K	18-26,5 GHz	1,7-1,1 cm	Pengawasan jangka pendek, pengawasan bandara, pencitraan dalam cuaca basah
Ka	26,5-40 GHz	1,1-0,75 cm	Pemetaan resolusi sangat tinggi, pengawasan udara, pencitraan dalam cuaca basah
V	40-75 GHz	0,75-0,4 cm	Penginderaan ilmiah: pengabsorpsian uap air tinggi
W	75-110 GHz	0,4-0,2 cm	Kontrol mobil otomatis (77 GHz), pencari misil, pencitraan resolusi sangat tinggi (94 GHz)
Milimeter	110-300 GHz	0,2-0,1 cm	Eksperimental: terbatas pada jangkauan pendek untuk pengabsorpsian uap air tinggi

Sumber : (Ruiz-Perez *et al.* 2022)

Peningkatan efisiensi penyerapan biasanya dicapai dengan merancang material RAM dalam bentuk struktur hybrid yang menggabungkan bahan magnetik dengan matriks dielektrik. Kombinasi ini menciptakan efek sinergis antara resonansi magnetik dan dielektrik, yang menghasilkan *impedance matching* yang lebih baik dan *bandwidth* penyerapan yang lebih luas (Delfini *et al.* 2018; Kim *et al.* 2023).

Struktur berlapis-lapis dengan komposisi yang diatur secara presisi memungkinkan RAM bekerja pada berbagai frekuensi, meningkatkan kinerjanya dalam aplikasi modern (Jayalakshmi *et al.* 2019; Ma *et al.* 2023). Kemajuan dalam teknologi seperti simulasi komputasi dan deposisi lapisan atom memungkinkan desain material dengan sifat elektromagnetik yang disesuaikan secara presisi. Dengan teknik ini, RAM dapat dirancang untuk memiliki *bandwidth* penyerapan yang lebih luas dan memenuhi tuntutan aplikasi modern, termasuk teknologi siluman dan perlindungan interferensi elektromagnetik (Aytaç *et al.* 2020; Kumar and Singh 2018).

Penelitian terkini juga mengarah pada pengembangan struktur *multilayer* dengan metamaterial dan permukaan selektif frekuensi untuk memperluas *bandwidth* penyerapan. Kombinasi RAM dengan perangkat *grid multilayer* telah terbukti meningkatkan kemampuan redireksi energi gelombang, menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi pada berbagai aplikasi (Jayalakshmi *et al.* 2019; Ma *et al.* 2023).

2.1.2 Aluminium Alloy 6061

Paduan aluminium banyak digunakan di berbagai sektor industri karena kombinasi sifat-sifat utamanya seperti rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, ketahanan korosi yang sangat baik, dan kemudahan dalam fabrikasi. Berdasarkan paduan-paduan tersebut, paduan aluminium 6061 menonjol sebagai material yang sangat serbaguna, terutama di industri seperti konstruksi, dirgantara, dan otomotif. Sifat mekaniknya, yang mencakup kekuatan sedang hingga tinggi, kemampuan pengelasan yang baik, dan kemudahan pemrosesan yang luar biasa, menjadikannya material pilihan untuk aplikasi struktural (Wang *et al.*, 2019). Selain itu, daya daur ulang dan daya tarik estetikanya telah mendorong peningkatan penggunaannya dalam solusi teknik modern (S.A. Sajjadi *et al.*, 2014).

Tabel 2.2 komposisi paduan Al6061

Elemen	Jumlah (wt %)
Aluminium	96,85
Magnesium	0,9
Silicon	0,7
Iron	0,6
Copper	0,3
Chromium	0,25
Zinc	0,2
Titanium	0,1
Manganese	0,05
Others	0,05

Sumber : (Malhotra *et al.* 2013)

Sifat mekanik paduan aluminium 6061 sebagian besar ditentukan oleh mikrostruktur materialnya. Paduan ini memiliki struktur butiran halus, yang meningkatkan kekuatan tarik, kekerasan, dan ketahanan dampaknya. Elemen paduan seperti magnesium dan silikon memainkan peran penting dalam membentuk presipitat Mg_2Si , yang meningkatkan kekuatan material melalui penguatan presipitasi (Chauhan *et al.* 2017). Laju pendinginan selama pembekuan juga memengaruhi ukuran butiran, pendinginan yang lebih cepat menghasilkan mikrostruktur yang lebih halus, yang pada

berdampak pada meningkatkan sifat mekanik (Benjunior *et al.* 2017). Temuan ini menunjukkan pentingnya mengoptimalkan kondisi pendinginan selama pemrosesan untuk mencapai sifat material yang diinginkan.

Paduan aluminium 6061 juga dikenal karena kinerja termalnya yang luar biasa. Paduan ini memiliki titik lebur di kisaran 590–650°C, dengan konduktivitas termal yang tinggi (142–191 W/m°C) dan kapasitas panas spesifik, yang semuanya berkontribusi pada pengelolaan panas yang efektif. Karakteristik ini membuatnya sangat cocok untuk aplikasi yang memerlukan pembuangan panas yang efisien dan pengaturan suhu (Wang *et al.* 2022b). Namun, kinerjanya di lingkungan suhu tinggi perlu diperhatikan dengan hati-hati, karena suhu yang lebih tinggi dapat secara signifikan merusak sifat mekaniknya (Kandpal, Kumar, and Singh 2017).

Tabel 2.3 Perbandingan sifat fisik dan thermal utama paduan Aluminium alloys, carbon steels, stainless steels

<i>Metal Type</i>	<i>Melting Point (°C)</i>	<i>Density (kg/m³)</i>	<i>Emissivity ε_m</i>	<i>Coefficient of thermal expansion $\alpha(10^{-6}/^{\circ}C)$</i>	<i>Thermal Conductivity $\lambda_a(W/m^{\circ}C)$</i>	<i>Specific heat $c_a(J/kg^{\circ}C)$</i>
Aluminium alloys	590-650	2700	0,3	22,9	142-191	911
Carbon steels	1425-1540	7850	0,7	12,2	53	440
Stainless steels	1375-1510	7850	0,4	16,1	15	455

Sumber : (Wang *et al.* 2022b)

Perlakuan panas sangat penting untuk meningkatkan lebih lanjut sifat mekanik paduan aluminium 6061. Perlakuan panas solusi yang diikuti dengan penuaan menyebabkan pembentukan presipitat yang menguatkan material dengan menghambat pergerakan dislokasi. Presipitat ini, yang berkisar dari koheren hingga inkoheren, memainkan peran yang berbeda dalam meningkatkan kekuatan tarik dan kekerasan paduan (Chauhan *et al.* 2017; Sharma, Kumar, and Joshi 2019).

Ketahanan terhadap korosi adalah fitur penting lainnya dari paduan aluminium 6061, yang disebabkan oleh pembentukan lapisan oksida

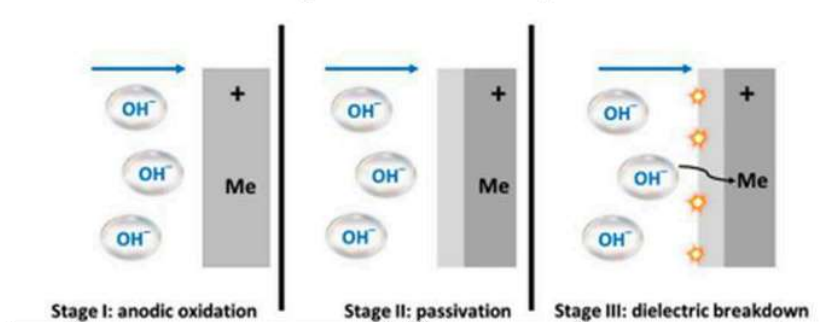
pelindung pada permukaan material. Hal ini yang dikombinasikan dengan efek sinergis dari elemen paduannya, memastikan bahwa paduan ini dapat bertahan dengan baik di lingkungan yang terpapar kelembaban dan bahan kimia (Georgantzia, Gkantou, *and* Kamaris 2021). Selain itu, kemampuan paduan aluminium 6061 untuk menjalani berbagai perlakuan permukaan meningkatkan daya tahannya dan daya tarik estesisnya, memungkinkan untuk digunakan baik untuk tujuan fungsional maupun dekoratif (Kandpal, Kumar, *and* Singh 2017). Selain itu, kemudahan pemesinan dan kemampuan pengelasan paduan aluminium 6061 meningkatkan versatilitasnya dalam proses manufaktur. Kemampuan paduan ini untuk menahan berbagai teknik fabrikasi tanpa degradasi kekuatan yang signifikan merupakan keuntungan utama. Paduan ini kompatibel dengan metode seperti pengelasan gesekan paduan dan pengelasan fusi tradisional, memastikan sambungan las yang kuat. Sifat-sifat ini, yang dipadukan dengan rasio kekuatan-terhadap-berat yang tinggi, menjadikan paduan aluminium 6061 material yang sangat berharga dalam aplikasi rekayasa ringan.

Dalam aplikasi struktural, paduan aluminium 6061 memiliki keunggulan dibandingkan banyak paduan cor lainnya berkat *Ultimate Tensile Strength* (UTS) dan kekuatan hasilnya yang superior. Sifat-sifat ini sangat penting untuk aplikasi yang menanggung beban, yang menunjukkan pentingnya memilih jenis paduan dan kondisi pemrosesan yang tepat berdasarkan karakteristik kinerja yang diperlukan (Benjunior *et al.* 2017). Selain itu, kelenturan paduan ini memastikan bahwa ia dapat mengalami deformasi signifikan tanpa kegagalan, yang penting untuk aplikasi yang terpapar beban dinamis (Georgantzia, Gkantou, *and* Kamaris 2021).

2.1.3 Plasma Electrolytic Oxidation

Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) merupakan salah satu teknik modifikasi permukaan yang semakin dikenal, yang digunakan untuk meningkatkan sifat-sifat logam ringan, seperti aluminium, magnesium, dan

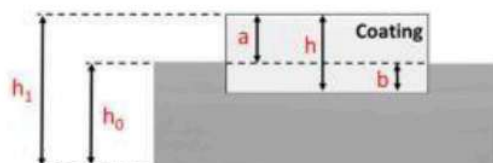
titanium, dengan membentuk lapisan oksida pelindung yang keras dan tahan lama. Proses PEO melibatkan penerapan tegangan tinggi pada substrat logam yang terendam dalam elektrolit basa, yang menyebabkan terjadinya pelepasan plasma di permukaan material. Pelepasan plasma ini menyebabkan oksidasi substrat dan pembentukan lapisan oksida yang sangat adherens, yang sangat berguna untuk meningkatkan ketahanan korosi dan sifat aus material (Sikdar *et al.* 2021).



Gambar 2.3 Mekanisme pembentukan lapisan oksida pada teknik anodisasi dan PEO

Sumber : (Sikdar *et al.* 2021)

Berbeda dengan anodisasi konvensional, PEO menggunakan mekanisme yang melibatkan reaksi elektrokimia dan plasma, yang memungkinkan terbentuknya lapisan oksida dengan ketebalan yang lebih besar dan sifat-sifat mekanik yang lebih baik. Proses ini menyebabkan terjadinya pelepasan *micro-arc* yang menghasilkan lapisan oksida yang lebih padat dan keras. Lapisan oksida yang terbentuk juga sering kali memiliki struktur mikro yang poros, yang dapat meningkatkan daya rekat dan aktivitas biologi, terutama dalam aplikasi biomedis (Clyne and Troughton 2019; Kaseem *et al.* 2021)



Gambar 2.4 Skematik lapisan hasil teknik pelapisan PEO

Sumber : (Wang *et al.*, 2020)

Karakteristik lapisan PEO sangat dipengaruhi oleh berbagai parameter, termasuk komposisi elektrolit, densitas arus, dan durasi perlakuan. Sebagai contoh, perubahan formulasi elektrolit dapat menghasilkan variasi dalam ketebalan lapisan, porositas, dan komposisi fase lapisan oksida yang terbentuk. Penambahan aditif anorganik dalam elektrolit dapat meningkatkan integrasi unsur-unsur tertentu dalam lapisan, hal ini dapat meningkatkan sifat fungsional lapisan, seperti ketahanan aus dan korosi (Agureev *et al.* 2018; Kaseem *et al.* 2021b).

Mekanisme PEO yang melibatkan pelepasan plasma juga memungkinkan adanya pembentukan struktur kristalin dalam lapisan oksida, yang berkontribusi pada peningkatan kekerasan mikro dan daya tahan lapisan terhadap keausan. Hal ini menjadikan lapisan yang terbentuk sangat cocok untuk aplikasi yang membutuhkan sifat mekanik yang kuat, seperti dalam industri kedirgantaraan dan otomotif (Clyne *and* Troughton 2019). Beberapa studi menunjukkan bahwa fase alumina yang terbentuk dalam lapisan oksida dapat meningkatkan ketahanan aus dan korosi lapisan tersebut.



Gambar 2.5 Set up alat PEO

Sumber : Dokumentasi Pribadi

Proses PEO juga memberikan fleksibilitas dalam penyesuaian sifat lapisan sesuai dengan kebutuhan aplikasi tertentu. Sebagai contoh, pemilihan elektrolit yang mengandung silikat dapat meningkatkan kekerasan dan ketahanan mekanik lapisan oksida, sementara penggunaan elektrolit berbasis fosfat dapat meningkatkan daya rekat lapisan tersebut terhadap substrat (Lu *et al.* 2016). Kemampuan untuk mengontrol parameter proses ini menjadikan PEO sebagai metode yang sangat

serbaguna untuk rekayasa permukaan logam.

Selain itu, porositas yang terbentuk dalam lapisan PEO dapat memainkan peran penting dalam meningkatkan performa mekanik lapisan, terutama dalam distribusi beban dan pengurangan konsentrasi tegangan selama penggunaan. Struktur mikro lapisan yang terhubung dengan pori-pori ini memungkinkan distribusi stres yang lebih merata, yang pada akhirnya dapat meningkatkan daya tahan lapisan tersebut terhadap kerusakan mekanik (Simchen *et al.* 2020).

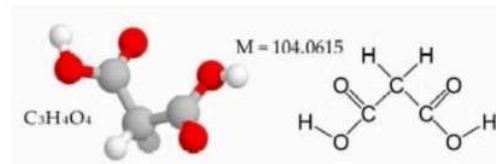
Meskipun PEO menawarkan banyak keunggulan, seperti peningkatan ketahanan korosi dan kekerasan, beberapa tantangan masih ada, terutama terkait dengan porositas dan kerusakan mikro pada lapisan yang terbentuk. Untuk mengatasi hal ini, berbagai metode perawatan pasca-perlakuan, seperti penyegelan menggunakan senyawa berbasis serum atau lapisan polimer, dapat diterapkan untuk meningkatkan ketahanan pelindung lapisan PEO (Kaseem *et al.* 2021b). Penyegelan ini membantu memperbaiki kualitas lapisan dengan mengurangi mikrodefek yang dapat mengurangi daya tahan lapisan terhadap lingkungan ekstrim.

Secara keseluruhan, PEO merupakan metode modifikasi permukaan yang efektif dan dapat disesuaikan untuk berbagai aplikasi industri, termasuk di sektor *aerospace*, otomotif, dan biomedis. Dengan memahami prinsip dasar dan faktor-faktor yang mempengaruhi karakteristik lapisan PEO, para peneliti dapat mengoptimalkan sifat-sifat lapisan tersebut untuk aplikasi yang lebih spesifik, serta mengatasi tantangan yang mungkin muncul selama penerapannya (Agureev *et al.* 2018; Simchen *et al.* 2020).

2.1.4 Asam Malonat

Asam malonat (MA) merupakan aditif penting dalam elektrolit selama proses *Plasma Electrolytic Oxidation* (PEO), yang bertujuan untuk memodifikasi lapisan oksida pada permukaan material logam. Penambahan MA pada elektrolit terbukti meningkatkan aktivitas elektrokimia, menghasilkan kualitas lapisan yang lebih baik. Aditif ini

mampu mengubah sifat elektrolit sehingga memengaruhi proses deposisi selama PEO, menciptakan lapisan oksida yang lebih seragam dan padat (Khodaverdi *et al.* 2021).



Gambar 2.6 Struktur kimia asam malonat

Sumber : (Poznyak *et al.* 2021)

Porositas lapisan oksida yang dihasilkan merupakan parameter penting dalam menentukan performa material, khususnya untuk aplikasi sebagai *absorber*. Penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi asam malonat yang lebih tinggi dalam elektrolit mampu mengurangi porositas lapisan oksida secara signifikan (Jalal *et al.* 2019). Asam malonat, ketika digunakan dalam proses pelapisan, memfasilitasi pembentukan film oksida aluminium berpori (*PAOF*) yang menunjukkan sifat struktural yang lebih baik. Proses pelapisan dengan asam malonat menyebabkan penggabungan gugus hidroksil dan senyawa organik ke dalam lapisan oksida, yang dapat meningkatkan sifat penghalang film terhadap lingkungan korosif. Selain itu, struktur berpori dari film pelapisan memungkinkan peningkatan luas permukaan, yang dapat meningkatkan kapasitas serap bahan. Kehadiran asam malonat dalam elektrolit berkontribusi pada faktor ekspansi volume yang lebih tinggi dan struktur pelapisan yang lebih teratur, yang sangat penting untuk meningkatkan baik ketahanan korosi maupun karakteristik serap (Poznyak *et al.* 2021).

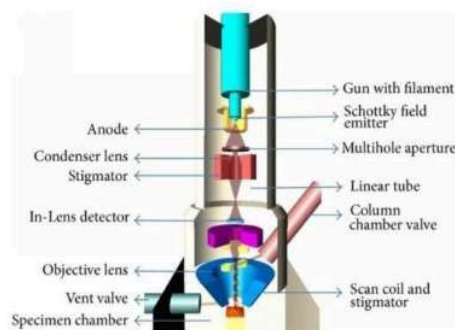
Selain memengaruhi porositas, MA juga meningkatkan kekuatan adhesi lapisan terhadap substrat. Adhesi yang baik memastikan lapisan tetap melekat meskipun menghadapi tekanan mekanis atau kondisi lingkungan ekstrem. Penambahan asam malonat dan MA pada proses PEO secara signifikan meningkatkan sifat lapisan oksida yang dihasilkan. Asam malonat berperan dalam pembentukan struktur lapisan yang lebih padat

dan stabil, sehingga meningkatkan ketahanan terhadap degradasi lingkungan. Di sisi lain, MA berkontribusi pada peningkatan stabilitas termal lapisan, membuatnya lebih tahan terhadap suhu tinggi yang sering dijumpai dalam aplikasi teknis (Jalal *et al.* 2019).

2.1.5 Karakterisasi dan Pengujian Material

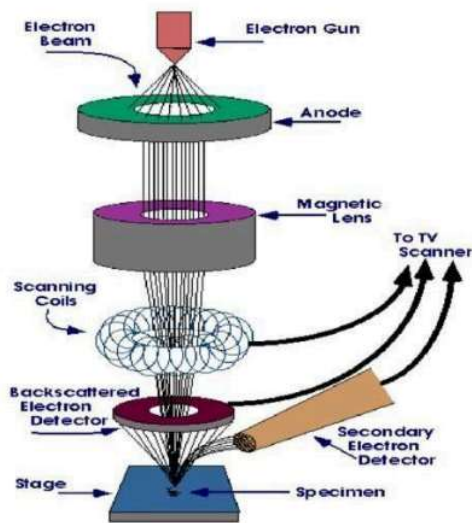
2.1.5.1 *Field Emission Scanning Electron Microscopes – Energy Dispersive Spectroscopy (FESEM-EDS)*

Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) adalah instrumen canggih yang digunakan untuk menghasilkan citra permukaan material dengan resolusi tinggi, memungkinkan analisis pada skala nano. Teknologi ini memanfaatkan emisi elektron dari medan listrik kuat pada ujung tajam katoda, yang menghasilkan berkas elektron berenergi tinggi. Elektron dilepaskan dari sumber emisi medan dan dipercepat dalam gradien medan listrik tinggi, lalu diarahkan ke permukaan sampel menggunakan lensa elektronik dalam kolom vakum tinggi. Berkas elektron sempit ini membombardir sampel, menciptakan interaksi dengan atom di permukaan material.



Gambar 2.7 Prinsip Kerja FESEM

Sumber : (Senthil Prabhu *et al.* 2021)

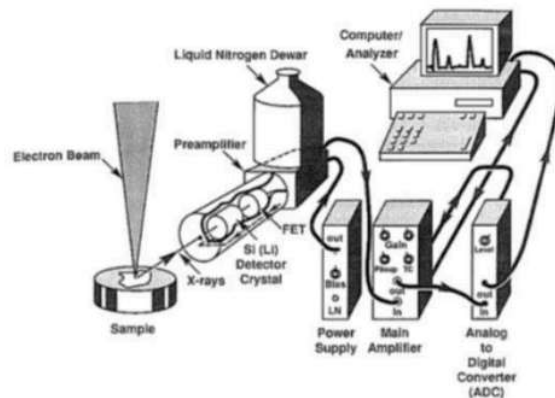


Gambar 2.8 Diagram Skema FESEM

Sumber : (Senthil Prabhu *et al.* 2021)

Interaksi tersebut menghasilkan sinyal sekunder seperti elektron sekunder, elektron hambur balik, dan sinar-X. Elektron sekunder yang dipancarkan dari setiap titik pada permukaan sampel memiliki sudut dan kecepatan yang mencerminkan struktur permukaan material. Sinyal ini ditangkap oleh detektor, diperkuat, dan diolah menjadi gambar digital berkualitas tinggi. Gambar ini memberikan detail tentang morfologi, topografi, serta struktur mikro material, menjadikan FESEM alat yang sangat efektif untuk karakterisasi material dalam berbagai bidang penelitian. (Gnanamoorthy, Karthikeyan, and Prabu 2014).

Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) adalah teknologi yang digunakan dalam analisis SEM untuk mendeteksi dan menganalisis sinar-X karakteristik yang dipancarkan oleh elemen-elemen dalam sampel. Sinar-X ini terbentuk ketika elektron yang ditembakkan oleh SEM berinteraksi dengan atom dalam spesimen, menghasilkan foton dengan energi spesifik yang terkait dengan elemen-elemen tersebut.



Gambar 2.9 Skema *energy-dispersive spectrometer*

Sumber : (José *et al.* 2019)

EDS memanfaatkan detektor keadaan padat untuk memisahkan sinar-X berdasarkan energinya dan menyusun spektrum energi. Sistem ini kemudian menganalisis spektrum tersebut untuk menentukan amplitudo elemen tertentu. Energi foton diubah menjadi sinyal listrik, yang akhirnya memungkinkan identifikasi kuantitatif dan kualitatif elemen dalam sampel. (A. Mohammed *and* A. Abdullah 2018).

2.1.5.2 X-ray Diffraction (XRD)

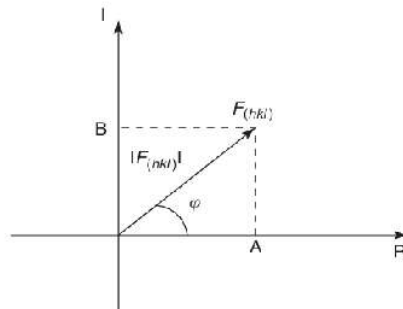
X-ray Diffraction (XRD) adalah metode analisis yang digunakan untuk mengidentifikasi fase kristalin dengan menentukan parameter struktur kisi kristal. Penggunaan utama teknik XRD adalah identifikasi dan karakterisasi senyawa berdasarkan pola difraksi (Gumustas *et al.* 2017). XRD bekerja berdasarkan prinsip persamaan Bragg, digambarkan dalam bentuk pantulan sinar-X yang dikoliminasi pada bidang kristal sampel yang akan dikarakterisasi. XRD didasarkan pada hamburan elastis sudut lebar dan umumnya digunakan untuk material yang teratur (khususnya material kristal dengan orde jarak jauh (Raval *et al.* 2018).

Pada pengujian XRD akan memberikan nilai indeks miller yang merupakan sistem notasi dalam kristalografi untuk mendeskripsikan orientasi bidang kristal yang dinyatakan dalam koordinat *hkl*. Penentuan nilai indeks miller dapat menentukan struktur kristal karena adanya

penggunaan pola difraksi dari sinar yang dipancarkan. Pola difraksi yang didapatkan akan diterjemahkan dengan jarak antar bidang kristal dan simetri struktur kristal.

Hukum Bragg memberikan kondisi sederhana di mana sinar terdifraksi dapat diamati. Gambar 2.11 menunjukkan seberkas sinar-X paralel yang menembus sekumpulan bidang kisi paralel dengan indeks Miller h, k, l , dengan jarak antar bidang (d) dan pada sudut datang (θ). Indeks Miller h, k, l menggambarkan orientasi bidang kristal dalam kisi kristal, di mana h, k , dan l adalah bilangan bulat yang menunjukkan jumlah sel unit yang terhitung sepanjang sumbu x, y , dan z dalam kisi kristal. Bidang-bidang kisi ini berperilaku seperti cermin, memantulkan sinar-X yang datang dan menghasilkan pola difraksi yang teramati jika kondisi Bragg terpenuhi,:

$$IB + BJ = 2d \sin \theta \quad (2.1)$$



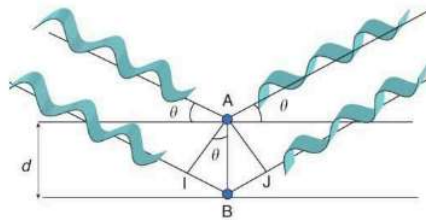
Gambar 2.10 Bilangan Kompleks ($F_{hkl}=A+iB$) dengan $|F_{hkl}|=\phi$

Sumber : (Le Pevelen *et al.* 2013)

Gelombang yang direfleksikan akan bersatu membentuk sinar yang terdifraksi (interferensi konstruktif maksimum, biasanya disebut refleksi) jika perbedaan jalur adalah kelipatan dari panjang gelombang λ :

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (2.2)$$

Persamaan tersebut disebut dengan persamaan Bragg. Gelombang refleksi yang tidak memenuhi persamaan tersebut akan mengganggu secara destruktif. Dalam persamaan tersebut, nilai n memberikan makna sebagai orde difraksi (Le Pevelen *et al.* 2013).

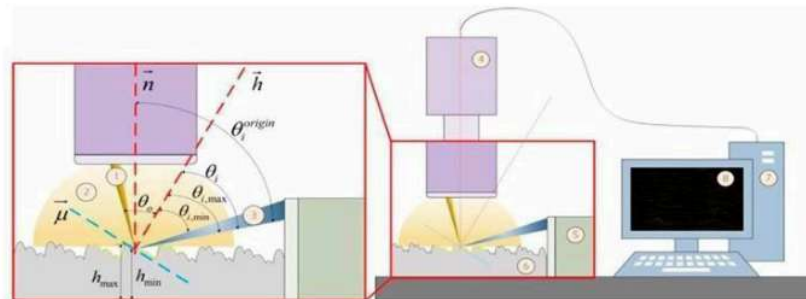


Gambar 2.11 Kondisi Refleksi – Hukum Bragg

Sumber : (Le Pevelen *et al.* 2013)

2.1.5.3 Roughness

Kekasaran permukaan merujuk pada ketidakraturan mikro pada permukaan material yang biasanya dihasilkan dari proses manufaktur seperti penggerindaan atau pemesinan. Ketidakraturan ini ditandai oleh puncak dan lembah yang memengaruhi sifat fungsional material, seperti adhesi, gesekan, dan reflektivitas. (Shang *et al.* 2024)



Gambar 2.12 Skematik karakterisasi Roughness

Sumber : (Shang *et al.* 2024)

Mekanisme analisis kekasaran permukaan sering kali melibatkan sistem optik atau pencitraan yang dikombinasikan dengan metode komputasi. Misalnya, teori fraktal dan model pembelajaran mesin digunakan untuk menganalisis korelasi antara fitur permukaan dan penampakkannya dalam data pencitraan. Model pencahayaan Lambert adalah pendekatan umum yang menghubungkan karakteristik permukaan dengan intensitas cahaya yang dipantulkan, yang dijelaskan oleh rumus:

$$I = I_i k_d \cos(\theta_i) \quad (2.3)$$

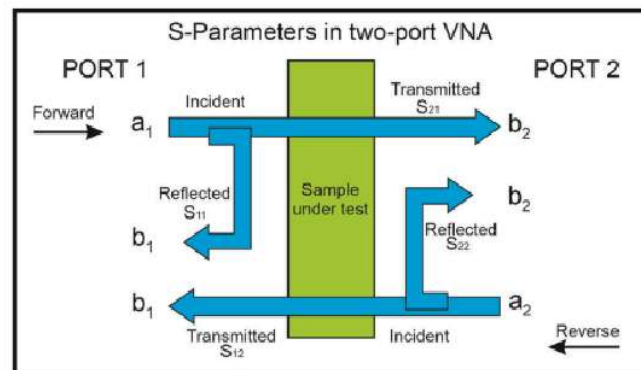
dengan:

- I adalah intensitas cahaya yang dipantulkan,
- I_i adalah intensitas cahaya yang datang,
- k_d adalah koefisien refleksi difus,
- θ_i adalah sudut antara cahaya yang datang dan normal permukaan.

Hubungan ini membantu memprediksi kekasaran dengan menganalisis data kecerahan dan sudut yang diperoleh dari gambar. Selain itu, jaringan saraf sering digunakan untuk mengklasifikasikan kategori kekasaran, sementara model matematika berdasarkan kecerahan piksel dan tinggi puncak gelombang menyempurnakan pengukuran kekasaran secara kuantitatif. (Shang *et al.* 2024).

2.1.5.3 Vector Network Analyzer (VNA)

Vector Network Analyzer (VNA) adalah alat yang digunakan untuk mengukur parameter jaringan seperti refleksi dan transmisi suatu perangkat atau material dalam domain frekuensi. Pengukuran VNA mencakup parameter-parameter seperti modulus impedansi, fase, koefisien refleksi (S_{11}), dan koefisien transmisi (S_{21}).



Gambar 2.13 Skematik parameter-S pada VNA dua-port

Sumber : (Ruiz-Perez *et al.* 2022)

Alat ini bekerja dengan mengirimkan sinyal gelombang mikro ke dalam material dan menganalisis respons frekuensinya untuk menentukan sifat material, termasuk impedansi, konduktivitas, dielektrik, serta kehilangan energi (Yunasfi *et al.* 2018). Pada gambar 2.13 tersebut menunjukkan skematik pengukuran parameter-S menggunakan *Vector Network Analyzer* (VNA) dua-port, yang digunakan untuk menganalisis karakteristik refleksi dan transmisi suatu perangkat atau material dalam domain frekuensi. VNA bekerja dengan mengirimkan sinyal gelombang mikro ke dalam material yang diuji (*sample under test*) dan menganalisis respons frekuensinya untuk menentukan sifat-sifat material, seperti impedansi, konduktivitas, konstanta dielektrik, serta kehilangan energi. Pada konfigurasi dua-port ini, sinyal yang dikirim dari PORT 1 (a_1) merupakan gelombang insiden menuju sampel. Sebagian sinyal akan dipantulkan kembali ke PORT 1 sebagai gelombang terpantul (b_1) yang direpresentasikan oleh koefisien refleksi S_{11} , sedangkan sisanya diteruskan ke PORT 2 sebagai gelombang transmisi (b_2) yang direpresentasikan oleh koefisien transmisi S_{21} . Sebaliknya, ketika sinyal dikirim dari PORT 2 (a_2), sebagian dipantulkan kembali ke PORT 2 sebagai S_{22} dan sisanya ditransmisikan ke PORT 1 sebagai S_{12} . Dengan menganalisis parameter-parameter ini, VNA dapat memberikan informasi kuantitatif mengenai bagaimana suatu material atau perangkat mempengaruhi propagasi gelombang elektromagnetik, sehingga sangat penting dalam penelitian material penyerap gelombang maupun perangkat komunikasi berfrekuensi tinggi.

Parameter Refleksi dan Transmisi

- Koefisien Refleksi (S_{11}) : Menunjukkan jumlah gelombang yang dipantulkan kembali dari material.
- Koefisien Transmisi (S_{21}): Mengukur jumlah energi gelombang yang diteruskan melalui material.
- Untuk sistem linier tanpa kerugian energi, berlaku:

$$|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2 \approx 1 \quad (2.4)$$

Refleksi dari material sering dinyatakan sebagai *Reflection Loss* (RL), yang didefinisikan sebagai:

$$RL(dB) = 20 \log \left[\frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right] \quad (2.5)$$

Nilai *RL* negatif menunjukkan tingkat penyerapan gelombang mikro oleh material. Material dengan *RL* lebih kecil dari -10 dB umumnya dianggap efektif untuk menyerap gelombang mikro. (Yunasfi *et al.* 2018).

2.1.5.4 Uji Korosi

Korosi adalah proses degradasi material, terutama logam, yang terjadi akibat reaksi elektrokimia dengan lingkungannya, menghasilkan senyawa seperti oksida atau hidroksida yang merusak struktur material (Harsimran, Santosh, and Rakesh 2021). Proses ini melibatkan reaksi *anodic*, di mana logam kehilangan elektron, dan reaksi *cathodic*, seperti absorpsi oksigen atau evolusi hidrogen. Faktor yang memengaruhi korosi meliputi sifat logam, seperti posisi dalam seri galvanik dan kemurnian, serta kondisi lingkungan, seperti pH, suhu, dan kelembapan. Korosi dapat diuji menggunakan metode *Potentiodynamic Tafel polarization*.

Potentiodynamic Tafel polarization adalah teknik elektrokimia yang digunakan untuk menganalisis sifat korosi material melalui pengukuran hubungan antara potensial elektrokimia dan arus listrik pada permukaan material dalam media korosif. Metode ini berfokus pada analisis kurva polaritas yang diperoleh dengan mengaplikasikan variasi potensial pada material dan mengukur arus yang dihasilkan. Dari data ini, peneliti dapat memperoleh informasi penting mengenai laju korosi, termasuk parameter seperti arus korosi (I_{corr}), potensial korosi (E_{corr}), dan ketahanan material terhadap korosi.

Potentiodynamic Tafel polarization memungkinkan identifikasi dua daerah utama pada kurva daerah anodic, yang menggambarkan proses oksidasi material, dan daerah katodik, yang berhubungan dengan reduksi oksigen atau reduksi hidrogen. Dengan mengevaluasi kemiringan (*slope*) dari kedua daerah ini, peneliti dapat memperoleh informasi tentang kinetika korosi, termasuk laju pemindahan elektron pada reaksi anodic dan katodik. Selain itu, metode ini dapat digunakan untuk menentukan potensial korosi, yang mencerminkan keseimbangan antara laju oksidasi dan reduksi, serta arus korosi yang menggambarkan tingkat korosi material dalam lingkungan tertentu.

Faktor-faktor yang mempengaruhi hasil *Potentiodynamic Tafel polarization* mencakup resistivitas larutan, laju pemindaian potensial, serta kondisi metalurgi material yang diuji. Dengan menggunakan teknik ini, peneliti dapat mengevaluasi ketahanan korosi material terhadap berbagai kondisi, termasuk pengaruh ion agresif dalam larutan. *Potentiodynamic Tafel polarization* sangat berguna untuk menentukan ketahanan material terhadap korosi secara keseluruhan dan untuk memprediksi perilaku korosi dalam berbagai kondisi lingkungan. (Esmailzadeh, Aliofkhazraei, and Sarlak 2018).

Berdasarkan metode diatas, pengaruh perlakuan pelapisan pada Al 6061 dapat dianalisis secara lebih mendalam menggunakan rumus yang berlaku untuk perhitungan *corrosion rate* (laju korosi) dan *Rp* (Resistansi polarisasi). Rumus *corrosion rate* yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\text{Corrosion Rate} = k \times \frac{I_{corr}}{\rho} \times EW \quad (2.6)$$

Di mana:

- *k* adalah faktor konversi yang digunakan untuk mengubah satuan dari amperes per cm² ke mils per year (mpy).
- *I_{corr}* adalah densitas arus korosi yang diperoleh dari plot Tafel (A/cm²).
- *ρ* adalah massa jenis material dalam g/cm³.

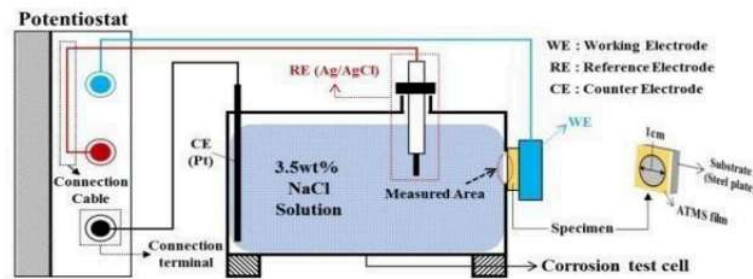
- EW adalah berat ekuivalen dari material yang diuji.

Selain itu, nilai R_p dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$R_p = \frac{\beta_a \times |\beta_c|}{2.303 I_{corr} (\beta_a + |\beta_c|)} \quad (2.7)$$

Dimana:

- β_a adalah *Tafel slope anodic* (V/dec).
- β_c adalah *Tafel slope cathodic* (V/dec).
- I_{corr} adalah densitas arus korosi (A/cm^2).



Gambar 2.14 Set up alat *Potentiodynamic Tafel Polarization*

Sumber : (Choe *et al.* 2015)

2.2 Hasil Penelitian Terdahulu

Penelitian sebelumnya menjadi sumber referensi utama yang digunakan untuk mendukung pengembangan lebih lanjut dalam penelitian berikutnya. Penelitian ini mengkaji topik Optimasi Pelapisan Material Aluminium Alloy 6061 dengan Penambahan Zat Aditif Asam Malonat Pada Metode *Plasma Electrolytic Oxidation* Untuk Peningkatan Kemampuan *Electromagnetic Wave Absorbance*. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini memanfaatkan penelitian terdahulu dengan cara membandingkan antara penelitian ini dan penelitian-penelitian sebelumnya yang disajikan dalam Tabel 2.4 berikut :

Tabel 2.4 Penelitian Terdahulu

No	Penulis, Tahun	Judul	Permasalahan	Metode	Hasil	Persamaan	Perbedaan
1	(Jadhav <i>et al.</i> 2022)	<i>Development of an Oxide Layer on Al 6061 Using Plasma Arc Electrolytic Oxidation in Silicate-Based Electrolyte</i>	Penelitian ini menghasilkan Lapisan oksida Al 6061 dibuat dengan PEO menggunakan elektrolit silikat, dianalisis dengan FESEM dan EDS, serta divalidasi melalui tiga kali pengulangan.	Lapisan oksida maksimum 200 μm tercapai pada 197 V, grafena berdampak minimal, kekasaran meningkat dengan jarak elektroda kecil, dan parameter optimal menghasilkan lapisan 102 μm dengan pendinginan menjaga suhu tetap stabil.	Lapisan oksida 200 μm pada Al 6061, elektrolit silikat berkelanjutan, peningkatan ketahanan aus dan korosi, tegangan 197 V dengan perubahan unsur signifikan, dan analisis detail menggunakan FESEM dan EDS.	Grafena dalam lapisan oksida sangat sedikit tanpa peningkatan absorpsi signifikan, pengendalian panas berlebih memengaruhi kualitas lapisan, durasi proses 20–40 menit kurang efisien untuk industri, dan variasi parameter eksperimen menyebabkan hasil tidak konsisten.	Memberikan gambaran pengaruh komposisi elektrolit, parameter (tegangan dan jarak elektroda), serta teknik karakterisasi seperti FESEM dan EDS untuk menganalisis struktur mikro dan distribusi unsur.
2	(Pillai <i>et al.</i> 2021)	<i>Development of vanadium impregnated flat absorber composite PEO coating on AA6061 alloy</i>	Penelitian ini menggunakan elektrolit silikat dan PEO untuk membentuk lapisan keramik pada AA6061, dengan karakterisasi	Pelapis dengan vanadyl sulfat sebagai aditif menunjukkan ketebalan dan sifat termo-optik unggul, dengan absorptansi	Pelapis dengan aditif vanadyl sulfat memiliki absorptansi solar dan emisivitas inframerah tinggi untuk pengelolaan	Penelitian ini memiliki keterbatasan mengenai analisis waktu proses, variabilitas morfologi permukaan, pengujian kinerja, kompleksitas	Penelitian ini berfokus pada peningkatan kemampuan absorpsi material dengan penggunaan zat aditif yang berbeda.

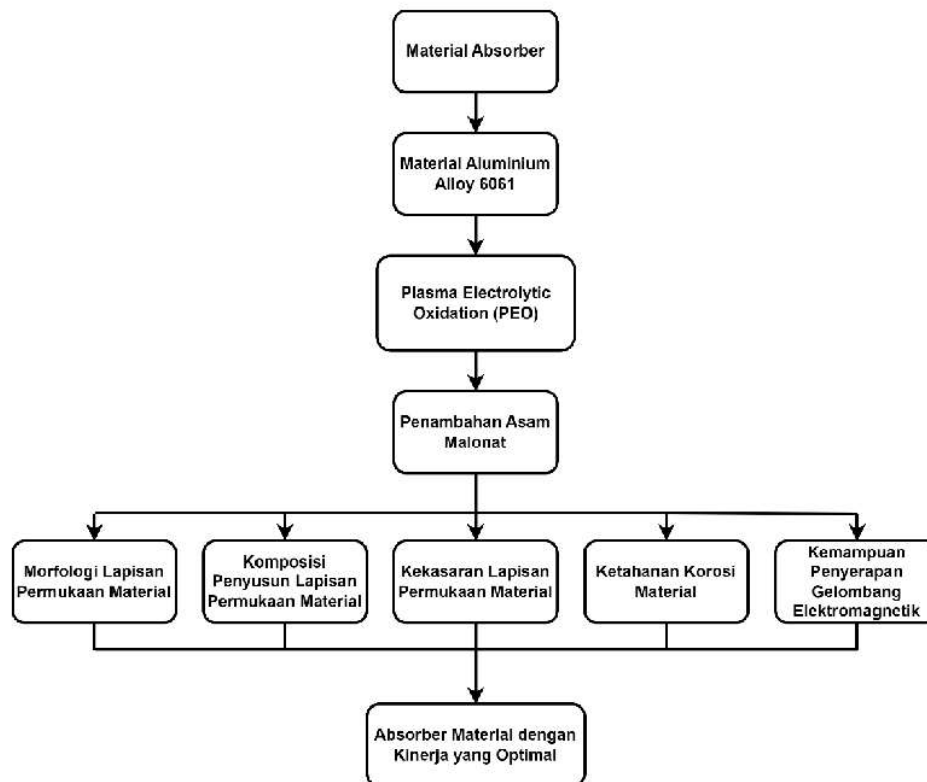
			melalui SEM, EDS, XPS dan pengukuran sifat optik untuk menilai kinerja termal.	dan emisivitas lebih tinggi untuk pengelolaan panas yang lebih baik; analisis XPS mengungkapkan perbedaan komposisi unsur dan keadaan oksidasi akibat waktu pemrosesan dan aditif.	termal, serta integritas struktural dan kinerja unggul yang mendukung aplikasi pesawat luar angkasa.	komposisi kimia, dan masalah lingkungan.	
3	(Kasalica et al. 2020)	<i>Mechanisms of Plasma Electrolytic Oxidation of aluminum at the multi-hour timescales</i>	Penelitian ini menggunakan OES, SEM-EDS, analisis spektral, dan isotop oksigen untuk mempelajari proses PEO pada aluminium, dengan fokus pada pembentukan dan karakteristik lapisan oksida.	Selama kejadian <i>discharge</i> , lapisan oksida baru terbentuk di dasar saluran <i>discharge</i> antara substrat logam dan lapisan Al_2O_3 yang sudah ada, dengan suhu elektron plasma yang bervariasi antara 4000 hingga 10.000 K. Penelitian juga mengonfirmasi adanya lapisan alumina nano-	Penelitian ini memberikan pemahaman mendalam tentang proses PEO, memperkenalkan model baru untuk evolusi <i>micro-discharge</i> yang berguna untuk penelitian dan aplikasi pelapisan permukaan di masa depan. Penggunaan	Penelitian ini memiliki keterbatasan terkait variabilitas kejadian <i>discharge</i> yang dapat memengaruhi konsistensi hasil, dengan penyebaran acak yang merusak kualitas spektrum yang tercatat. Selain itu, perubahan elektrolit dari waktu ke waktu dapat menyulitkan interpretasi sifat optik dan spektrum.	Memberikan wawasan tentang proses PEO, pengaruh zat aditif pada sifat pelapisan, dan hubungan antara karakteristik pelapisan (seperti daya serap dan daya pancar termal) dan kinerja.

				porous di bawah pelapis PEO yang tumbuh tegak lurus terhadap permukaan aluminium.	teknik canggih seperti SEM dan OES memungkinkan analisis rinci mengenai morfologi pelapis dan karakteristik plasma.		
4	(Fernández-López <i>et al.</i> 2024)	<i>Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) as a Promising Technology for the Development of High-Performance Coatings on Cast Al-Si Alloys: A Review</i>	Penelitian ini mengembangkan pelapisan PEO pada Al-Si menggunakan elektrolit aluminat yang unggul. Proses dengan catu daya AC 50 Hz dan polarisasi bipolar menganalisis NaAlO_2 . Eisa meningkatkan pertumbuhan lapisan, dan penyegelan meningkatkan ketahanan korosi, hidrofobik, kekerasan, dan ketahanan aus.	Teknologi PEO menghasilkan pelapis tebal, padat, dan kuat, dengan elektrolit yang mempengaruhi kualitas pelapis. Perlakuan permukaan meningkatkan efisiensi dan ketahanan terhadap korosi serta tribokorosi. Pelapis PEO cocok untuk aplikasi di lingkungan ekstrem, seperti industri otomotif.	Proses PEO lebih mudah diterapkan dibandingkan anodisasi, dengan pra-perlakuan yang minimal. Hasil pelapisan lebih tebal, padat, dan tidak merusak batas kelelahan paduan, menggunakan elektrolit alkali berbasis air yang ramah lingkungan serta memberikan ketahanan aus dan korosi yang baik.	PEO mengonsumsi lebih banyak energi dibandingkan teknik lain, dapat menghasilkan kekasaran permukaan yang tinggi, dan memerlukan kontrol parameter yang tepat untuk mencapai hasil yang konsisten.	Memberikan pengetahuan tentang dampak adiitif pada sifat pelapis, seperti morfologi, ketebalan, dan struktural, yang sangat penting untuk meningkatkan kinerja termal. Sebagai referensi dalam melakukan karakterisasi permukaan material.

5	(Poznyak <i>et al.</i> 2021)	<i>Peculiar Aluminum Porous oxide Films Produced via Electrochemical Anodizing in Malonic Acid Solution with Arsenazo-I Additive</i>	Penelitian ini mengkaji anodisasi elektrokimia aluminium foil dalam asam malonat dengan arsenazo-I, mempelajari efek konsentrasi arsenazo-I pada film oksida berpori. Analisis kimia dan XPS digunakan untuk mengevaluasi kandungan karbon dan komponen organik, serta efisiensi arus untuk menilai efektivitas anodisasi.	Penelitian ini menemukan bahwa penambahan arsenazo-I pada anodisasi aluminium murni meningkatkan pelarutan, ekspansi volume film oksida berpori, dan kandungan karbon. Juga terbentuk senyawa arsenik, konduktivitas ionik meningkat, dan struktur film menjadi tidak teratur akibat kerusakan dielektrik.	Penelitian ini mengungkapkan keuntungan penggunaan arsenazo-I sebagai aditif dalam anodisasi aluminium, yang meningkatkan sifat film seperti kekuatan mekanis dan konduktivitas ionik. Penelitian ini juga memberikan wawasan tentang senyawa arsenik yang terbentuk serta perubahan mekanisme pertumbuhan film.	Penelitian ini memiliki keterbatasan, termasuk fokus terbatas pada arsenazo-I, gangguan mekanisme pertumbuhan teratur, peningkatan cacat pada film, serta potensi masalah lingkungan dan keselamatan. Selain itu, tidak ada data tentang stabilitas jangka panjang film anodisasi yang dihasilkan.	Menggambarkan pengaruh asam malonat pada morfologi, struktur, dan perilaku elektrokimia dari lapisan aluminium oksida yang dianodisasi.
---	------------------------------	--	--	--	--	--	---

Sumber : Diolah oleh peneliti

2.3 Kerangka Berpikir



Gambar 2.15 Kerangka berpikir penelitian

Sumber: Diolah oleh peneliti

2.4 Hipotesis

- Penambahan konsentrasi asam malonat menghasilkan lapisan oksida aluminium 6061 yang lebih halus, padat, dan berpori kecil.
- Peningkatan konsentrasi asam malonat meningkatkan ketahanan korosi aluminium 6061 melalui pembentukan lapisan oksida yang lebih tebal, padat, dan berpori rendah.
- Peningkatan konsentrasi asam malonat meningkatkan kemampuan aluminium 6061 dalam menyerap gelombang elektromagnetik melalui struktur lapisan oksida yang padat dan sesuai.