

**CHECKLIST PEMENUHAN PERSYARATAN
KENAIKAN JABATAN AKADEMIK DOSEN
ASISTEN AHLI → LEKTOR
PEMENUHAN SYARAT TAMBAHAN BUKU MONOGRAF FIRST AUTHOR**

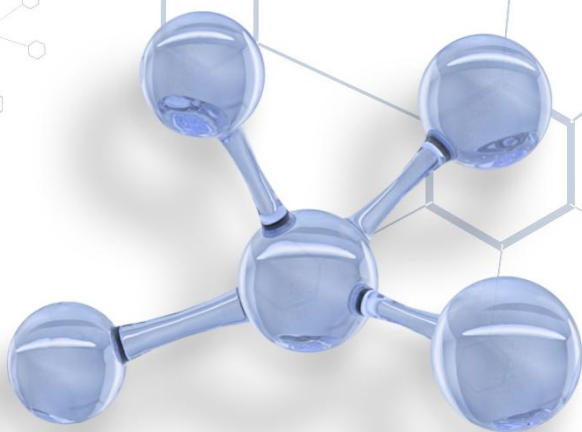
Nama Dosen	: Larasati Rizky Putri
NIDN/NUPTK	: 0320029201/8552770671230172
Program Studi	: Teknik mesin - FTI
Perguruan Tinggi	: Universitas Trisakti
Jabatan Akademik Saat Ini	: Asisten Ahli
Jabatan Akademik yang Diusulkan	: Lektor
Periode Pengusulan	: 2026

Daftar Checklist:

1. Cover & Identitas Buku
2. Full Book/Buku Monograf
3. Halaman Hak Cipta/ISBN
4. Sertifikat Penulis
5. Bukti ISBN Perpustnas
6. Bukti Perbitan/Publikasi Buku
7. Bukti Keaslian Karya (Buku Monograf)
8. Similarity Check + Exclude Sources
9. Bukti Distribusi Terindeks Google Scholar

ELEKTRODEPOSISI PADUAN MONEL PADA ALUMINIUM:

PROSES, KARAKTERISASI, DAN APLIKASI MATERIAL FUNGSIONAL



Penulis:

- 1. Cahaya Rosyidan**
- 2. Budhy Kurniawan**
- 3. Bambang Soegijono**
- 4. Ferry Budhi Susetyo**
- 5. Lisa Samura**
- 6. Mustamina Maulani**
- 7. Larasati Rizky Putri**
- 8. Kartika Fajarwati Hartono**

Editor: Fahmi Rizal

ELEKTRODEPOSISI PADUAN MONEL PADA ALUMINIUM: PROSES, KARAKTERISASI, DAN APLIKASI MATERIAL FUNGSIONAL

Penulis:

- 1. Cahaya Rosyidan**
- 2. Budhy Kurniawan**
- 3. Bambang Soegijono**
- 4. Ferry Budhi Susetyo**
- 5. Lisa Samura**
- 6. Mustamina Maulani**
- 7. Larasati Rizky Putri**
- 8. Kartika Fajarwati Hartono**

Editor: Fahmi Rizal



PT. Mustika Sri Rosadi

ELEKTRODEPOSISI PADUAN MONEL PADA ALUMINIUM: PROSES, KARAKTERISASI, DAN APLIKASI MATERIAL FUNGSIONAL

Penulis:

Cahaya Rosyidan; Budhy Kurniawan; Bambang Soegijono; Ferry Budhi Susetyo; Lisa Samura; Mustamina Maulani; Larasati Rizky Putri; Kartika Fajarwati Hartono

Editor: Fahmi Rizal

Layout: Tim PT. Mustika Sri Rosadi

Desain Sampul: Wida Ningsih

ISBN: 978-634-7535-64-1 (PDF)

Cetakan Pertama: 09 Febuari 2026

Hak Cipta 2026

Hak Cipta Dilindungi Oleh Undang-Undang

Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

Diterbitkan oleh Penerbit Mustika Sri Rosadi

Alamat Penerbit: Citra Indah City, Bukit Heliconia AG 23/32,
Kecamatan Jonggol, Kab. Bogor.

Email: mars.mustikasrirosadi@gmail.com

PRAKATA

Aluminium merupakan material yang banyak digunakan dalam berbagai sektor industri karena sifatnya yang ringan, mudah dibentuk, dan memiliki konduktivitas yang baik. Namun demikian, keterbatasan aluminium terhadap serangan korosi, terutama pada lingkungan agresif, menjadi tantangan serius dalam penerapannya. Oleh karena itu, diperlukan suatu pendekatan rekayasa yang efektif dan berkelanjutan untuk meningkatkan ketahanan korosi aluminium tanpa mengorbankan sifat mekanik dan fungsionalnya.

Buku monograf ini membahas salah satu solusi rekayasa industri melalui penerapan lapisan Monel sebagai pelindung aluminium dari korosi. Buku monograf dikembangkan dari penelitian. Beberapa penelitian ini diantaranya dengan judul :

1. Effect of Current Density on Magnetic and Hardness Properties of Ni-Cu Alloy Coated on Al via Electrodeposition.
2. Nickel Salt Dependency as Catalyst in the Plating Bath on the Film Properties of Cu/Cu-Ni
3. Effect Of Nickel Electroplating Process Time Variation Over Aluminum On Crystal Plane Orientation
4. Proses Pelapisan Ni Diatas Al Dengan Metode Elektroplating

Penulis berharap buku ini dapat menjadi referensi bagi mahasiswa, peneliti, akademisi, serta praktisi industri yang tertarik pada bidang rekayasa material, perlindungan korosi, dan pengembangan teknologi pelapisan. Selain itu, buku ini diharapkan dapat mendorong pengembangan inovasi teknologi material yang berkontribusi pada peningkatan umur pakai komponen industri dan efisiensi proses produksi.

Materi dalam buku ini diantaranya:

1. BAB 1 - Pengantar Rekayasa Paduan Monel dan Teknologi Elektrodeposisi.
2. BAB 2 - Dasar Ilmu Material: Aluminium, Ni, dan Cu.
3. BAB 3 - Teori dan Mekanisme Elektrodeposisi Logam dan Paduan.
4. BAB 4 - Metode Sintesis Lapisan Monel pada Substrat Aluminium.
5. BAB 5 - Karakterisasi Struktur Kristal dan Komposisi Lapisan Monel.
6. BAB 6 - Morfologi Permukaan, Ketebalan, dan Mikrostruktur Lapisan.
7. BAB 7 - Evaluasi Sifat Mekanik, Magnetik, dan Elektrokimia.
8. BAB 8 - Aplikasi Industri, Inovasi Teknologi, dan Arah Riset Masa Depan.

Semoga buku ini dapat memberikan manfaat dan kontribusi positif bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, khususnya di bidang rekayasa industri dan material.

1. Buku Sintesis Anorganik
2. Elektroplating

Penyajian buku diharapkan dapat memberikan pemahaman yang komprehensif, baik secara teoretis maupun aplikatif, bagi pembaca. Penulis mengucapkan terimakasih kepada kontributor dari penulis lainnya, dan Universitas Trisakti dalam membantu pembiayaan pembuatan buku monograf ini.

Jakarta, 18 Febuari 2026
Penulis

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga buku monograf berjudul “Elektrodeposisi Paduan Monel Pada Aluminium: Proses, Karakterisasi, dan Aplikasi Material Fungsional” ini dapat disusun dan diselesaikan dengan baik. Buku ini dihadirkan sebagai kontribusi ilmiah dalam pengembangan ilmu material, khususnya dalam bidang rekayasa permukaan, elektrodeposisi, dan aplikasi paduan logam dalam industri modern.

Perkembangan teknologi material menuntut hadirnya solusi yang tidak hanya unggul secara mekanik, tetapi juga efisien secara ekonomi, ringan, tahan korosi, serta memiliki performa fungsional yang tinggi. Dalam konteks tersebut, paduan Monel dan teknik elektrodeposisi menawarkan potensi besar untuk menghasilkan material multifungsi yang aplikatif di berbagai sektor, seperti industri maritim, energi, elektronik, dirgantara, dan manufaktur cerdas. Buku ini membahas secara terintegrasi aspek teoritis, metodologi sintesis, teknik karakterisasi, evaluasi sifat mekanik, magnetik, dan elektrokimia, hingga inovasi teknologi dan peluang aplikatif di masa depan.

Penulis berharap buku ini dapat menjadi referensi akademik dan praktis bagi mahasiswa, dosen, peneliti, serta praktisi industri yang tertarik pada pengembangan material maju dan teknologi pelapisan logam.

Jakarta, 18 Februari 2026

Penulis

DAFTAR ISI

PRAKATA	ii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vi
GLOSARIUM	x
BAB 1. PENGANTAR PADUAN NI-CU (MONEL) DAN TEKNOLOGI ELEKTRODEPOSISI - Cahaya Rosyidan	15
A. Peran Paduan Ni-Cu dalam Rekayasa Material....	15
B. Keterbatasan Monel sebagai Material Pejal dan Alternatif Pelapisan	16
C. Teknologi Pelapisan Logam dan Posisi Elektrodeposisi	16
D. Prinsip Dasar Elektrodeposisi Paduan Monel.....	17
E. Hubungan Parameter Proses dengan Struktur dan Sifat Lapisan	18
F. Karakteristik Fungsional Lapisan Monel dan Aplikasi Lapisan Monel dalam Industri dan Teknologi.....	19
BAB 2. DASAR ILMU MATERIAL: ALUMINIUM, NI, DAN CU - Budhy Kurniawan.....	21
A. Peran Ilmu Material dalam Rekayasa Teknik.....	21
B. Aluminium.....	21
C. Ni	27
D. Cu: Konduktivitas dan Keunggulan Fungsional....	29
E. Struktur Kristal Logam: Landasan Atomik Sifat Material	32
F. Konsep Paduan Logam dan Sistem Monel	33
G. Karakteristik Magnetik dan Elektrokimia Sistem Monel.....	34

BAB 3. TEORI DAN MEKANISME ELEKTRODEPOSISI LOGAM DAN PADUAN - Bambang Soegijono	37
A. Teori Dasar Elektrodposisi	37
B. Hukum Faraday dalam Elektrodposisi	38
C. Mekanisme Reaksi Elektrokimia	40
D. Transport Ion dan Dinamika Larutan	43
E. Nukleasi dalam Pembentukan Lapisan	44
F. Pertumbuhan Lapisan dan Evolusi Mikrostruktur	45
F. Elektrodposisi Paduan Logam	46
G. Faktor yang Mempengaruhi Kualitas Lapisan Elektrodposisi	46
H. Peran Elektrodposisi dalam Rekayasa Material Modern	47
BAB 4. SINTESIS LAPISAN MONEL PADA SUBSTRAT ALUMINIUM - Ferry Budhi Susetyo	48
A. Preparasi Substrat Aluminium	48
B. Komposisi Larutan Elektrolit	49
C. Parameter Deposisi	49
D. Prosedur Sintesis Lapisan Monel	54
E. Evaluasi Kualitas Lapisan	55
BAB 5. KARAKTERISASI STRUKTUR KRISTAL DAN KOMPOSISI LAPISAN MONEL - Lisa Samura	58
A. Analisis Struktur Kristal Menggunakan <i>X-ray Diffraction</i> (XRD)	58
B. Identifikasi Fase Kristal Lapisan Monel	61
C. Analisis Komposisi Unsur Menggunakan <i>Energy Dispersive Spectroscopy</i> (EDS)	63
D. Distribusi Unsur Ni dan Cu dalam Lapisan	64
E. Hubungan Struktur Kristal dan Komposisi terhadap Sifat Lapisan	64

**BAB 6. MORFOLOGI PERMUKAAN, KETEBALAN,
DAN MIKROSTRUKTUR LAPISAN - Mustamina**

Maulani	66
A. Analisis Morfologi Permukaan Menggunakan <i>Scanning Electron Microscopy</i>	66
B. Analisis Penampang dan Ketebalan Lapisan	67
C. Mikrostruktur Lapisan dan Ukuran Butir	68
D. Kekasaran Permukaan dan Homogenitas Lapisan	69
E. Hubungan Morfologi dengan Sifat Fungsional Lapisan.....	69

**BAB 7. EVALUASI SIFAT MEKANIK, MAGNETIK, DAN
ELEKTROKIMIA - Larasati Rizky Putri**

A. Evaluasi Sifat Mekanik Lapisan Monel	71
B. Evaluasi Sifat Magnetik Lapisan Monel	73
C. Evaluasi Ketahanan Korosi Lapisan Monel	74
D. Kinerja Elektrokimia dan Reaksi Evolusi Hidrogen (HER).....	75
E. Keterkaitan Sifat Mekanik, Magnetik, dan Elektrokimia	76
F. Implikasi Industri dan Aplikasi Teknologi	76

BAB 8. APLIKASI INDUSTRI DAN INOVASI

TEKNOLOGI - Kartika Fajarwati Hartono	78
A. Aplikasi Lapisan Monel dalam Industri Maritim dan Kelautan	78
B. Pemanfaatan dalam Industri Minyak, Gas, dan Petrokimia	79
C. Aplikasi pada Industri Dirgantara dan Otomotif..	80
D. Aplikasi dalam Industri Elektronik dan Sensor.....	80
E. Peran dalam Teknologi Energi dan Elektrokimia	81

F. Inovasi Teknologi dalam Elektrodeposisi Lapisan Monel.....	81
G. Integrasi dengan Manufaktur Cerdas (<i>Smart Manufacturing</i>).....	82
H. Tantangan dan Peluang Pengembangan Teknologi.....	83
I. Kontribusi terhadap Keberlanjutan dan Ekonomi Material.....	83
DAFTAR PUSTAKA.....	85
BIOGRAFI PENULIS.....	95
BIOGRAFI EDITOR.....	105
SINOPSIS.....	106

GLOSARIUM

Istilah	Definisi
Aditif	Bahan tambahan dalam larutan elektrolit untuk mengontrol struktur butir, tegangan internal, dan kualitas permukaan lapisan.
<i>Adhesion Strength</i> (Daya Rekat)	Kemampuan lapisan menempel kuat pada substrat, diukur melalui metode uji mekanik seperti peel test.
Aluminium (Al)	Logam ringan yang digunakan sebagai substrat dalam pelapisan karena konduktivitas dan ketahanan korosinya.
Anoda	Elektroda positif dalam proses elektrodposisi yang berfungsi sebagai sumber ion logam atau elektroda inert.
Arus Listrik	Aliran muatan listrik yang mengendalikan laju deposisi ion logam pada katoda.
Butir Kristal (<i>Grain</i>)	Unit struktur mikro kristal yang memengaruhi sifat mekanik dan elektrokimia material.
Daya Tahan Korosi	Kemampuan material untuk menahan degradasi akibat reaksi kimia dengan lingkungan.
<i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> (EIS)	Teknik analisis elektrokimia untuk mengevaluasi resistansi

Istilah	Definisi
	korosi dan karakteristik lapisan pelindung.
<i>Electrodeposition</i> (Elektrodeposisi)	Proses pembentukan lapisan logam melalui reduksi ion dalam larutan elektrolit menggunakan arus listrik.
<i>Electroplating</i>	Teknik pelapisan logam berbasis elektrokimia untuk meningkatkan sifat permukaan material.
<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i> (EDS)	Teknik karakterisasi untuk menentukan komposisi unsur dalam suatu material.
Feromagnetik	Sifat material yang dapat mempertahankan magnetisasi setelah medan magnet eksternal dihilangkan.
Hukum Faraday	Prinsip yang menyatakan bahwa massa logam yang terendapkan sebanding dengan jumlah muatan listrik yang mengalir.
<i>Hydrogen Evolution Reaction</i> (HER)	Reaksi elektrokimia yang menghasilkan gas hidrogen selama proses reduksi air.
Katoda	Elektroda negatif tempat terjadinya reduksi ion logam dan pembentukan lapisan.

Istilah	Definisi
Ketebalan Lapisan	Ukuran tebal material hasil deposisi yang memengaruhi sifat mekanik dan ketahanan korosi.
Komposisi Elektrolit	Susunan kimia larutan yang mengandung ion logam sebagai sumber pelapisan.
Monel	Paduan Ni–Cu dengan ketahanan korosi tinggi dan sifat mekanik unggul.
Morfologi Permukaan	Karakteristik bentuk dan tekstur permukaan lapisan hasil elektrodposisi.
Ni	Logam feromagnetik yang berkontribusi pada sifat magnetik dan ketahanan korosi Monel.
Nukleasi	Tahap awal pembentukan kristal pada permukaan substrat selama proses deposisi.
<i>Open Circuit Potential</i> (OCP)	Potensial elektroda saat tidak ada arus mengalir untuk mengevaluasi kestabilan elektrokimia.
<i>Overpotential</i>	Tegangan tambahan yang diperlukan untuk mempercepat reaksi elektrokimia.
Paduan Logam	Material yang tersusun dari dua atau lebih unsur logam untuk memperoleh sifat unggul.

Istilah	Definisi
Parameter Deposisi	Faktor proses seperti arus, tegangan, suhu, pH, dan waktu yang memengaruhi kualitas lapisan.
<i>Peel Test</i>	Metode uji mekanik untuk mengukur daya rekat lapisan pada substrat.
<i>Potentiodynamic Polarization</i>	Teknik elektrokimia untuk menentukan laju korosi dan perilaku redoks material.
<i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	Mikroskop elektron untuk menganalisis morfologi dan mikrostruktur permukaan material.
Struktur Kristal FCC	Struktur kristal Face-Centered Cubic yang umum pada logam seperti Ni dan Cu.
Substrat	Permukaan dasar tempat lapisan Monel dideposisikan, dalam buku ini berupa aluminium.
<i>Tafel Slope</i>	Parameter yang menggambarkan kinetika reaksi elektrokimia pada uji HER.
Tegangan Residual	Tegangan internal dalam lapisan yang dapat memengaruhi daya rekat dan stabilitas struktur.
<i>Vibrating Sample Magnetometer</i> (VSM)	Instrumen untuk mengukur sifat magnetik material berdasarkan respons magnetisasi.

Istilah	Definisi
<i>X-ray Diffraction</i> (XRD)	Teknik analisis untuk menentukan struktur kristal dan fase material.

BAB 1. PENGANTAR PADUAN NIKEL- TEMBAGA (MONEL) DAN TEKNOLOGI ELEKTRODEPOSISI

A. Peran Paduan Ni-Cu dalam Rekayasa Material

Paduan Ni dan Cu merupakan salah satu material logam yang memiliki peran penting dalam bidang keteknikan dan teknologi modern. Material ini dikenal luas karena memiliki kombinasi sifat mekanik, magnetik, dan elektrokimia yang unggul, sehingga banyak dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi industri.

Secara struktural, Ni dan Cu memiliki kesamaan yang signifikan, di antaranya struktur kristal *face-centered cubic* (FCC), nilai elektronegativitas yang relatif dekat, serta jari-jari atom yang hampir serupa. Kesamaan karakteristik ini memungkinkan kedua unsur tersebut membentuk paduan yang stabil dan homogen, dengan sifat fungsional yang lebih baik dibandingkan unsur penyusunnya secara terpisah.

Dalam praktik industri, paduan Ni-Cu dikenal dengan nama Monel, yang umumnya memiliki komposisi sekitar 70% Ni dan 30% Cu. Monel banyak digunakan pada sektor kelautan, konstruksi otomotif, pelapisan logam, sensor magnetik, dan aktuator, terutama karena ketahanannya terhadap korosi serta sifat feromagnetiknya yang stabil.

B. Keterbatasan Monel sebagai Material Pejal dan Alternatif Pelapisan

Meskipun Monel memiliki performa yang sangat baik, penggunaannya dalam bentuk material pejal (*bulk*) sering menghadapi kendala biaya produksi yang relatif tinggi. Hal ini mendorong pengembangan strategi alternatif yang lebih efisien, salah satunya adalah penggunaan lapisan paduan Monel pada substrat logam lain.

Pendekatan pelapisan memungkinkan pemanfaatan sifat unggul Monel tanpa harus menggunakan material tersebut secara keseluruhan. Dengan cara ini, material dasar yang lebih ringan dan ekonomis, seperti aluminium (Al), dapat dimodifikasi sehingga memiliki sifat mekanik, ketahanan korosi, dan karakteristik magnetik yang lebih baik.

Modifikasi permukaan Al dan paduannya telah menjadi strategi penting dalam rekayasa material modern. Teknik ini memungkinkan peningkatan sifat fisis, mekanik, listrik, dan estetika permukaan, sekaligus menambah nilai guna dan efisiensi biaya produksi.

C. Teknologi Pelapisan Logam dan Posisi Elektrodeposisi

Berbagai teknik telah dikembangkan untuk melapisi logam dengan paduan Monel, di antaranya *Chemical Vapor Deposition* (CVD), *Physical Vapor Deposition* (PVD), serta elektrodeposisi. Masing-masing metode memiliki keunggulan dan keterbatasan, baik dari segi biaya, kompleksitas peralatan, maupun kontrol terhadap hasil lapisan. Di antara metode tersebut,

elektrodeposisi menempati posisi strategis karena bersifat relatif hemat biaya, mudah dikendalikan, dan cocok diterapkan dalam skala laboratorium maupun industri. Metode ini memungkinkan pengaturan ketebalan lapisan, komposisi kimia, serta karakteristik mikrostruktur melalui pengendalian parameter proses seperti komposisi elektrolit, pH, temperatur, rapat arus, dan tegangan.

Elektrodeposisi juga dikenal sebagai teknik yang fleksibel untuk menghasilkan lapisan fungsional dengan sifat yang dapat disesuaikan sesuai kebutuhan aplikasi tertentu.

D. Prinsip Dasar Elektrodeposisi Paduan Monel

Elektrodeposisi merupakan proses pelapisan logam yang memanfaatkan arus listrik dalam larutan elektrolit. Dalam sistem pelapisan Monel, ion Ni^{2+} dan Cu^{2+} berada dalam larutan dan bergerak menuju permukaan katoda akibat pengaruh medan listrik.

Pada anoda, logam Ni dan Cu mengalami reaksi oksidasi dan melepaskan ion ke dalam larutan. Ion-ion tersebut kemudian mengalami reduksi di permukaan katoda dan membentuk lapisan logam atau paduan. Berdasarkan hukum Faraday, massa logam yang terendap sebanding dengan jumlah muatan listrik yang dialirkan selama proses berlangsung. Dengan mengatur rapat arus, waktu deposisi, dan komposisi larutan, karakteristik lapisan seperti ketebalan, struktur kristal, morfologi permukaan, serta sifat mekanik dan magnetik dapat dikendalikan secara sistematis.

Pembentukan lapisan paduan Monel melalui elektrodposisi tidak selalu mudah, terutama karena adanya perbedaan potensial reduksi antara ion Ni^{2+} dan Cu^{2+} . Perbedaan ini dapat menyebabkan deposisi yang tidak seimbang, sehingga memengaruhi komposisi dan homogenitas lapisan. Untuk mengatasi kendala tersebut, digunakan agen pengompleks seperti sitrat, pirofosfat, asetat, sulfamat, dan glisin. Agen ini berfungsi mengubah ion logam menjadi bentuk kompleks yang memiliki potensial reduksi lebih mendekati satu sama lain, sehingga deposisi dapat berlangsung lebih stabil dan seragam.

E. Hubungan Parameter Proses dengan Struktur dan Sifat Lapisan

Parameter elektrodposisi, khususnya rapat arus, memiliki pengaruh signifikan terhadap karakteristik lapisan Monel. Variasi rapat arus dapat memengaruhi laju deposisi, ukuran butir kristal, morfologi permukaan, kekasaran, kekerasan, sifat magnetik, serta ketahanan terhadap korosi. Secara umum, peningkatan rapat arus dapat mempercepat laju deposisi dan mengubah mekanisme pertumbuhan kristal. Proses deposisi biasanya diawali dengan pembentukan nukleasi pada kondisi metastabil, kemudian diikuti pertumbuhan lapisan yang lebih stabil seiring dengan peningkatan ketebalan. Hasil penelitian terdahulu menunjukkan bahwa ukuran butir, struktur kristal FCC, orientasi bidang kristal, serta sifat magnetik dan elektrokimia lapisan Monel sangat dipengaruhi oleh kondisi elektrodposisi yang digunakan.

F. Karakteristik Fungsional Lapisan Monel dan Aplikasi Lapisan Monel dalam Industri dan Teknologi

Lapisan paduan Monel yang dihasilkan melalui elektrodposisi memiliki berbagai sifat fungsional. Karakteristik ini menjadikan lapisan Monel sebagai kandidat material pelindung dan material fungsional, di antaranya:

1. Struktur kristal FCC dengan orientasi tertentu
2. Morfologi permukaan yang dapat disesuaikan melalui parameter deposisi
3. Peningkatan kekerasan dan ketahanan aus
4. Respons magnetik yang dapat dikontrol melalui komposisi Ni
5. Ketahanan korosi yang lebih baik dibandingkan substrat aluminium tanpa pelapisan

Lapisan paduan Monel telah diaplikasikan dalam berbagai bidang, seperti:

1. Komponen kelautan yang memerlukan ketahanan korosi tinggi
2. Pelapisan dekoratif dan protektif pada produk manufaktur
3. Sensor magnetik dan aktuator, termasuk *actuator arm*
4. Komponen listrik dan elektronik yang membutuhkan stabilitas konduktivitas
5. Industri otomotif dan dirgantara, khususnya untuk material ringan dengan performa tinggi

Pemanfaatan Al sebagai substrat yang dilapisi Monel memberikan keuntungan tambahan berupa

bobot yang ringan dan efisiensi biaya, tanpa mengorbankan performa mekanik dan ketahanan lingkungan.

BAB 2. DASAR ILMU MATERIAL: ALUMINIUM, NIKEL, DAN TEMBAGA

A. Peran Ilmu Material dalam Rekayasa Teknik

Ilmu material merupakan cabang ilmu yang mempelajari hubungan antara struktur atom, komposisi kimia, proses manufaktur, serta sifat dan kinerja suatu bahan. Dalam dunia teknik modern, pemilihan material yang tepat menjadi faktor kunci dalam menentukan efisiensi, daya tahan, dan keberlanjutan suatu produk.

Logam dan paduannya menjadi material utama dalam berbagai sektor, termasuk otomotif, kelautan, energi, konstruksi, elektronik, serta teknologi fungsional. Pemahaman mendalam mengenai sifat dasar logam seperti aluminium (Al), Ni, dan Cu menjadi fondasi dalam pengembangan material paduan dan pelapisan permukaan berbasis Monel.

Bab ini membahas sifat dasar Al, Ni, dan Cu, serta konsep pembentukan paduan Monel yang menjadi dasar bagi aplikasi elektrodposisi dan rekayasa material fungsional.

B. Aluminium

1. Karakteristik

Al merupakan salah satu logam non-ferrous yang paling banyak dimanfaatkan dalam berbagai sektor industri modern. Popularitas Al didorong oleh kombinasi antara bobot yang ringan dan

performa mekanik yang relatif baik, sehingga menghasilkan rasio kekuatan terhadap berat yang unggul dibandingkan banyak logam lainnya. Dengan massa jenis sekitar $2,7 \text{ g/cm}^3$, Al memiliki berat yang jauh lebih rendah dibandingkan baja maupun Cu, menjadikannya pilihan ideal untuk aplikasi yang menuntut efisiensi energi dan pengurangan beban struktural.

Al juga dikenal memiliki konduktivitas listrik dan termal yang cukup tinggi, sehingga banyak digunakan dalam industri kelistrikan, pendinginan, dan sistem perpindahan panas. Kemampuan ini memungkinkan Al berfungsi sebagai material struktural sekaligus sebagai penghantar panas dan listrik dalam berbagai perangkat teknik.

Dari sisi ketahanan lingkungan, Al memiliki keunggulan berupa daya tahan alami terhadap korosi. Ketika terpapar udara, permukaan Al secara spontan membentuk lapisan oksida tipis yang stabil dan protektif. Lapisan ini berfungsi sebagai pelindung alami yang menghambat proses degradasi lebih lanjut, sehingga Al relatif tahan terhadap karat dan kondisi atmosfer normal. Keunggulan lain Al terletak pada kemudahan proses manufaktur. Material ini dapat dengan mudah dibentuk melalui berbagai metode seperti pengecoran, penempaan, ekstrusi, rolling, dan machining. Sifat keuletannya yang baik juga memungkinkan Al dibentuk menjadi komponen kompleks tanpa memerlukan energi

yang terlalu besar. Selain itu, Al bersifat non-magnetik, sehingga sangat sesuai digunakan dalam perangkat elektronik, peralatan sensitif medan magnet, dan aplikasi tertentu di bidang medis dan komunikasi.

Dari segi sifat termal, Al memiliki titik leleh yang relatif rendah, yaitu sekitar 660 °C, yang membuatnya lebih mudah diproses dibandingkan banyak logam teknik lainnya. Karakteristik ini turut mendukung efisiensi energi dalam proses produksi dan daur ulang.

Berkat kombinasi sifat-sifat tersebut, Al banyak diterapkan dalam berbagai industri strategis, termasuk otomotif, kedirgantaraan, transportasi umum, konstruksi ringan, kemasan, elektronik, dan manufaktur peralatan teknik. Kemampuannya untuk dikombinasikan dengan teknik modifikasi permukaan dan pelapisan logam juga menjadikan Al sebagai substrat yang sangat potensial dalam pengembangan material fungsional dan paduan teknik tingkat lanjut.

2. Sifat Kimia dan Ketahanan Korosi Aluminium

Al tergolong sebagai logam yang cukup reaktif, khususnya terhadap unsur oksigen. Ketika permukaannya bersentuhan dengan udara, Al secara alami membentuk lapisan oksida aluminium (Al_2O_3) yang sangat tipis namun stabil. Lapisan ini berperan sebagai pelindung pasif yang menghambat reaksi lanjutan antara Al dan lingkungan sekitarnya, sehingga secara efektif meningkatkan ketahanan terhadap korosi.

Keberadaan lapisan oksida tersebut memberikan Al perlindungan alami terhadap degradasi akibat udara lembap, air, dan lingkungan atmosfer normal. Inilah alasan mengapa Al banyak digunakan pada aplikasi luar ruang dan lingkungan dengan risiko korosi sedang, tanpa memerlukan pelapisan tambahan dalam beberapa kondisi tertentu. Namun demikian, meskipun lapisan oksida bermanfaat untuk perlindungan korosi, lapisan ini juga dapat menjadi hambatan dalam proses rekayasa permukaan, terutama ketika Al akan dilapisi dengan logam lain atau material fungsional.

Lapisan oksida yang stabil dapat mengurangi daya rekat antara substrat aluminium dan lapisan pelapis, sehingga berpotensi menurunkan kualitas hasil pelapisan. Untuk mengatasi kendala tersebut, diperlukan serangkaian perlakuan awal permukaan (*surface pretreatment*) sebelum proses pelapisan dilakukan. Tahapan perlakuan awal ini umumnya meliputi:

- a. Penghalusan atau pengamplasan mekanis, untuk menghilangkan lapisan oksida dan meningkatkan kekasaran permukaan
- b. Pembersihan kimia, guna menghilangkan minyak, lemak, dan kontaminan organik
- c. Aktivasi permukaan, yang bertujuan meningkatkan energi permukaan dan memperbaiki ikatan antara substrat dan lapisan pelapis

Langkah-langkah modifikasi permukaan ini berperan penting dalam memastikan adhesi lapisan yang optimal, meningkatkan ketahanan mekanik, serta memperbaiki sifat fungsional seperti ketahanan aus, ketahanan korosi lanjutan, dan stabilitas struktural.

3. Keterbatasan Aluminium dalam Aplikasi Teknik

Al dikenal sebagai material yang ringan, tahan korosi, dan mudah diproses, penggunaannya dalam aplikasi teknik tetap memiliki sejumlah keterbatasan yang perlu dipertimbangkan dalam proses desain dan rekayasa. Keterbatasan ini terutama berkaitan dengan performa mekanik dan ketahanan terhadap kondisi operasional ekstrem.

Salah satu kelemahan utama Al adalah tingkat kekerasan yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan logam teknik lain seperti baja dan paduan berbasis Ni. Kekerasan yang rendah ini membuat Al lebih rentan terhadap goresan, deformasi plastis, dan kerusakan akibat beban mekanik berulang.

Al memiliki ketahanan aus yang terbatas, sehingga kurang ideal untuk komponen yang mengalami gesekan intensif atau kontak mekanik terus-menerus, seperti bantalan, roda gigi, dan bagian mesin yang bergerak. Tanpa perlakuan tambahan, permukaan Al dapat mengalami degradasi lebih cepat dalam lingkungan kerja yang abrasif.

Dari segi kekuatan struktural, sifat mekanik Al umumnya berada di bawah baja dan paduan Ni, khususnya dalam hal kekuatan tarik, kekuatan luluh, dan ketahanan terhadap beban berat. Hal ini membatasi penggunaan Al pada aplikasi yang menuntut daya dukung tinggi, kecuali jika diperkuat dengan paduan khusus atau perlakuan mekanis tertentu.

Kinerja Al juga dapat menurun dalam lingkungan bersuhu tinggi, karena material ini mengalami penurunan kekuatan dan stabilitas mikrostruktur pada temperatur yang lebih rendah dibandingkan paduan logam suhu tinggi. Oleh sebab itu, Al kurang cocok untuk aplikasi yang melibatkan paparan panas ekstrem dalam jangka panjang.

Al sering dikombinasikan dengan teknologi peningkatan sifat material, seperti pembuatan paduan, perlakuan panas, serta modifikasi permukaan melalui pelapisan logam atau coating fungsional. Teknik pelapisan, misalnya dengan paduan Ni atau monel, dapat secara signifikan meningkatkan kekerasan permukaan, ketahanan aus, ketahanan korosi, serta memberikan sifat tambahan seperti karakteristik magnetik atau konduktivitas tertentu. Dengan penerapan strategi rekayasa material yang tepat, Al tetap dapat dimanfaatkan sebagai material dasar yang ringan namun berkinerja tinggi, terutama dalam aplikasi modern yang menuntut kombinasi antara efisiensi bobot, ketahanan, dan fungsionalitas.

C. Ni

1. Karakteristik Fisik, Mekanik, dan Termal Ni

Ni merupakan salah satu logam transisi yang memiliki peran strategis dalam dunia rekayasa material modern. Logam ini dikenal luas karena kombinasi unik antara kekuatan mekanik, kestabilan struktur, dan daya tahan terhadap lingkungan ekstrem, sehingga banyak dimanfaatkan dalam berbagai sektor industri berteknologi tinggi. Secara struktural, Ni memiliki kubus berpusat muka yang memberikan kestabilan mikrostruktur serta mendukung sifat mekanik yang baik, seperti keuletan dan ketangguhan. Struktur ini juga memungkinkan Ni mempertahankan karakteristik mekaniknya pada rentang suhu yang luas. Dari sisi mekanik, Ni menunjukkan ketahanan yang tinggi terhadap deformasi, baik akibat beban statis maupun dinamis. Sifat ini menjadikannya ideal untuk aplikasi yang menuntut kekuatan struktural jangka panjang serta keandalan operasional.

Dalam aspek kimia dan lingkungan, Ni memiliki resistansi yang sangat baik terhadap oksidasi dan korosi, terutama pada kondisi temperatur tinggi dan lingkungan agresif. Lapisan oksida tipis yang terbentuk di permukaannya bersifat protektif dan mampu memperlambat reaksi degradasi lebih lanjut, sehingga memperpanjang umur pakai material.

Ni termasuk logam yang memiliki sifat feromagnetik, yang membuatnya relevan dalam aplikasi teknologi magnetik, sensor, aktuator, dan perangkat elektromekanik. Keberadaan sifat magnetik ini memberikan nilai tambah fungsional yang tidak dimiliki oleh banyak logam teknik lainnya. Dalam dunia industri, Ni digunakan secara luas sebagai bahan dasar paduan, material pelapis (*coating*), serta komponen utama dalam superalloy dan material tahan panas yang diaplikasikan pada turbin, sistem energi, industri kimia, serta teknologi dirgantara. Kombinasi antara stabilitas termal, kekuatan, dan ketahanan lingkungan menjadikan Ni sebagai material strategis dalam rekayasa modern.

2. Peran Ni dalam Sistem Paduan Logam

Dalam rekayasa paduan logam, Ni memiliki fungsi fundamental sebagai unsur penguat dan penstabil struktur. Kehadirannya dalam suatu sistem paduan mampu meningkatkan berbagai sifat penting yang menentukan kinerja material. Secara mekanik, penambahan Ni berkontribusi pada peningkatan kekuatan, ketangguhan, dan ketahanan terhadap deformasi, baik pada suhu ruang maupun pada temperatur tinggi. Hal ini menjadikan paduan berbasis Ni sangat cocok untuk aplikasi struktural dan komponen teknik yang bekerja dalam kondisi berat.

Dari perspektif ketahanan lingkungan, Ni berperan besar dalam meningkatkan resistansi terhadap korosi dan oksidasi, terutama pada

lingkungan laut, atmosfer industri, serta media kimia agresif. Oleh karena itu, paduan yang mengandung Ni banyak digunakan dalam industri kelautan, petrokimia, dan pembangkit energi.

Ni juga berfungsi sebagai pembawa sifat magnetik dalam paduan tertentu, yang memungkinkan pengembangan material fungsional untuk aplikasi elektromagnetik, aktuator, sensor, dan sistem kontrol presisi. Selain itu, secara struktural Ni memiliki peran penting dalam menstabilkan fase kristal FCC, yang berdampak pada homogenitas mikrostruktur, kestabilan fasa, dan konsistensi sifat mekanik material. Stabilitas struktur ini sangat penting dalam paduan teknik yang menuntut keandalan jangka panjang.

Ni menjadi unsur utama dalam berbagai sistem paduan strategis, termasuk paduan Monel, paduan tahan panas, superalloy berbasis Ni, serta berbagai material teknik modern yang digunakan dalam industri berteknologi tinggi. Perannya tidak hanya sebagai unsur paduan struktural, tetapi juga sebagai komponen fungsional yang meningkatkan performa material secara menyeluruh.

D. Cu: Konduktivitas dan Keunggulan Fungsional

1. Karakteristik Dasar Cu

Cu merupakan salah satu logam teknik yang paling dikenal karena kemampuannya yang sangat baik dalam menghantarkan listrik dan panas. Keunggulan ini menjadikan Cu sebagai

material utama dalam industri kelistrikan, elektronik, sistem tenaga, serta berbagai perangkat yang membutuhkan efisiensi perpindahan energi.

Secara fisik, Cu memiliki daya hantar listrik dan termal yang sangat tinggi, hanya kalah dari perak dalam hal konduktivitas listrik. Hal ini memungkinkan Cu digunakan secara luas dalam kabel listrik, konduktor, kumparan motor, transformator, dan komponen elektronik presisi. Selain konduktivitasnya yang unggul, Cu juga memiliki tingkat keuletan dan ketangguhan yang tinggi, sehingga mudah dibentuk menjadi berbagai bentuk melalui proses rolling, drawing, ekstrusi, dan pembentukan plastis lainnya. Sifat ini mendukung efisiensi produksi serta fleksibilitas desain dalam aplikasi industri. Dari sisi ketahanan lingkungan, Cu menunjukkan resistansi yang baik terhadap korosi atmosfer, terutama dalam kondisi udara kering dan lingkungan normal. Permukaannya dapat membentuk patina alami yang berfungsi sebagai pelindung tambahan terhadap degradasi lingkungan. Secara struktural, Cu memiliki susunan kubus berpusat muka, yang berkontribusi terhadap stabilitas mikrostruktur serta sifat mekanik yang relatif baik. Struktur ini juga mendukung keuletan tinggi dan ketahanan terhadap retak selama proses deformasi.

Kemudahan dalam proses manufaktur menjadi keunggulan tambahan Cu, karena logam ini dapat diproses melalui berbagai teknik seperti

pengecoran, pembentukan, pemesian, dan pengelasan. Kombinasi sifat tersebut menjadikan Cu sebagai material penting dalam bidang energi, komunikasi, transportasi, serta teknologi berbasis listrik dan elektronik.

2. Peran Cu dalam Sistem Paduan Monel

Dalam sistem paduan Monel, Cu berperan sebagai unsur yang memberikan keseimbangan antara sifat mekanik, kimia, dan fungsional. Keberadaan Cu dalam paduan ini berkontribusi dalam meningkatkan ketahanan terhadap korosi, terutama di lingkungan lembap, laut, dan atmosfer agresif.

Cu juga membantu mempertahankan dan meningkatkan sifat konduktivitas listrik dan termal dalam paduan, sehingga material tetap memiliki kemampuan penghantaran energi yang baik meskipun telah dicampur dengan unsur lain. Hal ini penting dalam aplikasi yang memerlukan kombinasi antara kekuatan struktural dan performa listrik.

Dari aspek mekanik, penambahan Cu dapat mengurangi kecenderungan material menjadi getas, sehingga meningkatkan keuletan dan ketangguhan paduan secara keseluruhan. Dengan demikian, paduan Monel mampu mempertahankan keseimbangan antara kekuatan, fleksibilitas, dan daya tahan terhadap deformasi. Selain itu, Cu memiliki peran dalam mengatur karakteristik magnetik paduan Monel, terutama dalam sistem yang menggabungkan sifat

feromagnetik Ni dengan sifat non-magnetik Cu. Interaksi ini memungkinkan pengembangan material dengan sifat magnetik yang dapat dikendalikan untuk aplikasi sensor, aktuator, dan perangkat elektromagnetik.

Cu juga memberikan kontribusi estetika dan visual, karena memengaruhi warna dan tampilan permukaan paduan. Variasi kandungan Cu dapat menghasilkan gradasi warna tertentu, yang dimanfaatkan dalam aplikasi dekoratif, pelapisan koin, komponen arsitektural, serta material sensorik.

E. Struktur Kristal Logam: Landasan Atomik Sifat Material

Struktur kristal menggambarkan pola keteraturan atom dalam kisi tiga dimensi suatu logam, yang berperan penting dalam menentukan karakteristik mekanik, fisik, serta listrik material. Susunan atom ini memengaruhi bagaimana material merespons gaya eksternal, konduktivitas panas dan listrik, serta stabilitas terhadap deformasi plastis.

Logam seperti Al, Ni, dan Cu memiliki struktur kristal *face-centered cubic* (FCC), yaitu konfigurasi atom di mana setiap sudut dan pusat permukaan sel satuan ditempati oleh atom. Struktur FCC dikenal memiliki beberapa keunggulan, antara lain:

1. Tingkat kepadatan atom yang relatif tinggi
2. Keuletan dan ketangguhan yang baik
3. Kemampuan deformasi plastis yang tinggi tanpa mengalami kegagalan dini

Kesamaan struktur kristal FCC pada Ni dan Cu memungkinkan pembentukan larutan padat yang stabil dan homogen. Selain itu, kedekatan ukuran atom serta kompatibilitas energi ikatan mendukung terciptanya paduan dengan distribusi unsur yang merata dan sifat mekanik yang seimbang.

F. Konsep Paduan Logam dan Sistem Monel

Paduan logam terbentuk ketika dua atau lebih unsur logam dicampur untuk menghasilkan sifat yang lebih unggul dibanding logam murni. Pembentukan paduan dipengaruhi oleh:

1. Kesamaan struktur kristal
2. Perbedaan jari-jari atom
3. Elektronegativitas
4. Energi ikatan

Dalam konteks Ni dan Cu, kedua unsur memenuhi kriteria pembentukan paduan substitusional, di mana atom salah satu unsur dapat menggantikan posisi atom unsur lain dalam kisi kristal tanpa menyebabkan distorsi struktural yang signifikan. Hal ini menghasilkan paduan yang stabil secara termodinamik dan memiliki sifat mekanik yang konsisten.

Monel merupakan paduan berbasis Ni dan Cu yang umumnya mengandung sekitar 70% Ni dan 30% Cu, dengan sejumlah kecil unsur tambahan untuk mengoptimalkan performa. Paduan ini dikenal luas karena kombinasi sifat unggul yang meliputi:

1. Ketahanan korosi yang sangat baik, terutama di lingkungan laut dan kimia agresif

2. Kekuatan mekanik yang tinggi dibanding banyak paduan non-ferrous lainnya
3. Stabilitas termal yang baik pada suhu menengah hingga tinggi
4. Respons magnetik yang dapat disesuaikan melalui kontrol komposisi Ni

Meskipun Monel memiliki performa teknis yang sangat baik, penggunaan dalam bentuk material pejal seringkali terbatas oleh biaya produksi yang relatif tinggi dan bobot yang lebih besar. Oleh karena itu, pendekatan pelapisan Monel pada substrat Al menjadi alternatif inovatif yang menawarkan efisiensi biaya, pengurangan massa, serta peningkatan performa permukaan.

G. Karakteristik Magnetik dan Elektrokimia Sistem Monel

Ni merupakan unsur dengan sifat feromagnetik. Dalam paduan Monel, sifat magnetik dapat dikontrol dengan menyesuaikan rasio kandungan Ni, sehingga memungkinkan material memiliki tingkat respons magnetik tertentu sesuai kebutuhan aplikasi. Kemampuan ini membuka peluang penggunaan Monel dalam perangkat seperti sensor magnetik, aktuator, sistem elektromekanik, serta komponen industri yang membutuhkan kontrol medan magnet secara presisi.

Paduan Monel dikenal memiliki ketahanan korosi yang sangat baik, khususnya di lingkungan dengan kadar klorida tinggi seperti air laut, larutan garam, dan atmosfer lembap. Kombinasi Ni dan Cu menghasilkan stabilitas elektrokimia yang tinggi dengan menurunkan laju reaksi oksidasi dan degradasi permukaan. Sifat ini menjadikan Monel sebagai material yang sangat sesuai untuk aplikasi kelautan, industri kimia, sistem perpipaan, dan lingkungan dengan paparan bahan korosif.

Penerapan lapisan Monel pada substrat Al merupakan strategi rekayasa material yang menggabungkan keunggulan ringan Al dengan daya tahan superior Monel. Pendekatan ini memungkinkan terciptanya material multifungsi dengan performa tinggi dan efisiensi biaya yang lebih baik dibanding penggunaan Monel dalam bentuk massif.

Pelapisan Monel memberikan berbagai manfaat teknis, antara lain:

1. Peningkatan kekerasan dan ketahanan permukaan terhadap deformasi
2. Perlindungan terhadap keausan akibat gesekan dan abrasi
3. Peningkatan resistansi terhadap korosi dalam lingkungan agresif
4. Pemberian sifat magnetik fungsional sesuai kebutuhan aplikasi

Dengan kemajuan teknologi pelapisan modern, seperti *thermal spraying*, *electroplating*, dan *laser cladding*, pengembangan lapisan Monel.

BAB 3. TEORI DAN MEKANISME ELEKTRODEPOSISI LOGAM DAN PADUAN

Elektrodeposisi merupakan salah satu metode penting dalam rekayasa material untuk membentuk lapisan logam atau paduan di atas suatu permukaan konduktif melalui reaksi elektrokimia. Teknik ini banyak digunakan dalam industri untuk meningkatkan sifat permukaan material, seperti ketahanan korosi, kekerasan, konduktivitas listrik, sifat dekoratif, dan karakteristik fungsional lainnya.

Keunggulan utama elektrodeposisi terletak pada kemampuannya untuk menghasilkan lapisan dengan ketebalan yang terkontrol, komposisi yang dapat diatur, serta biaya produksi yang relatif efisien dibandingkan metode pelapisan lainnya. Oleh karena itu, pemahaman tentang teori dasar dan mekanisme elektrodeposisi menjadi kunci dalam mengoptimalkan kualitas lapisan logam dan paduan.

A. Teori Dasar Elektrodeposisi

Elektrodeposisi adalah proses reduksi ion logam dalam larutan elektrolit menjadi bentuk logam padat yang mengendap pada permukaan elektroda katoda. Proses ini berlangsung dalam suatu sistem elektrokimia yang terdiri dari:

1. Katoda (substrat yang dilapisi),
2. Anoda (sumber ion logam atau elektroda inert),
3. Larutan elektrolit yang mengandung ion logam,
4. Sumber arus listrik searah (DC).

Ketika arus listrik dialirkan, ion logam bermuatan positif dalam larutan akan bergerak menuju katoda, menerima elektron, dan tereduksi menjadi atom logam yang kemudian membentuk lapisan padat.

Elektrodeposisi tidak hanya digunakan untuk pelapisan logam murni, tetapi juga untuk pembentukan paduan logam dengan komposisi tertentu, yang memungkinkan rekayasa sifat mekanik, magnetik, dan elektrokimia secara lebih fleksibel.

B. Hukum Faraday dalam Elektrodeposisi

Proses elektrodeposisi secara kuantitatif dijelaskan melalui Hukum Faraday tentang elektrolisis, yang menjadi dasar dalam memahami hubungan antara arus listrik dan jumlah logam yang terendapkan pada permukaan elektroda. Hukum ini menjelaskan bahwa proses deposisi logam dikendalikan oleh muatan listrik yang mengalir dalam sistem elektrokimia.

Hukum Faraday menyatakan dua prinsip utama. Pertama, massa logam yang terendapkan pada elektroda berbanding lurus dengan total muatan listrik yang melewati larutan elektrolit selama proses berlangsung. Artinya, semakin besar rapat arus, semakin lama waktu pelapisan maka semakin tebal/berat lapisan logam. Kedua, untuk jumlah muatan listrik yang sama, massa logam yang dihasilkan bergantung pada massa ekuivalen logam tersebut, yang ditentukan oleh massa atom relatif

dan jumlah elektron yang terlibat dalam reaksi reduksi. Dengan demikian, logam dengan massa molar lebih besar atau jumlah elektron reaksi yang lebih kecil akan menghasilkan massa endapan yang lebih besar dibandingkan logam lainnya pada kondisi arus yang sama.

Secara matematis, hubungan ini dapat dinyatakan sebagai:

$$m = \frac{M \cdot I \cdot t}{n \cdot F}$$

- m = massa endapan (g)
- M = massa molar logam (g/mol)
- I = arus listrik (A)
- t = waktu deposisi (s)
- n = jumlah elektron yang terlibat dalam reaksi
- F = konstanta Faraday (96.485 C/mol)

Persamaan ini memberikan dasar perhitungan untuk memperkirakan ketebalan lapisan, menghitung laju deposisi, serta menentukan efisiensi arus dalam proses pelapisan logam. Dalam prakteknya, tidak semua muatan listrik yang digunakan secara efektif membentuk lapisan logam karena substrat tertutup gelembung akibat peristiwa evolusi gas hidrogen. Oleh karena itu, konsep efisiensi arus digunakan untuk mengevaluasi seberapa besar fraksi arus yang benar-benar berkontribusi terhadap pembentukan endapan logam.

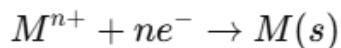
Penerapan Hukum Faraday memungkinkan perancangan proses elektrodposisi yang lebih presisi, seperti pengaturan ketebalan lapisan sesuai kebutuhan aplikasi, optimasi konsumsi energi, serta pengendalian kualitas dan keseragaman lapisan. Dengan memahami hubungan antara arus, waktu, dan massa endapan, operator dapat menyesuaikan parameter proses untuk memperoleh hasil pelapisan yang optimal.

Hukum Faraday berperan sebagai landasan teoritis utama dalam teknologi elektrodposisi, karena memberikan kerangka ilmiah dalam menghubungkan parameter listrik dengan hasil fisik lapisan logam dan paduan.

C. Mekanisme Reaksi Elektrokimia

Elektrodposisi merupakan proses yang dikendalikan oleh reaksi elektrokimia yang berlangsung pada antarmuka antara elektroda dan larutan elektrolit. Reaksi ini melibatkan perpindahan muatan listrik serta transformasi ion logam menjadi atom logam padat yang kemudian membentuk lapisan pada permukaan substrat.

Pada katoda (elektroda negatif), ion logam bermuatan positif dalam larutan akan mengalami reaksi reduksi, yaitu menerima elektron dan berubah menjadi bentuk logam netral. Secara umum, reaksi reduksi dapat dinyatakan sebagai berikut:



Dalam reaksi ini, ion logam (M^{n+}) menangkap sejumlah elektron (n) dan mengendap sebagai logam

padat (M), membentuk lapisan tipis di permukaan katoda. Pada anoda (elektroda positif), terjadi reaksi oksidasi, yang jenisnya bergantung pada sifat material elektroda yang digunakan. Jika anoda bersifat larut, maka logam anoda akan teroksidasi dan melepaskan ion logam ke dalam larutan, sehingga dapat berfungsi sebagai sumber ion untuk mempertahankan keseimbangan konsentrasi elektrolit. Sebaliknya, jika anoda bersifat inert (misalnya grafit atau platina), maka reaksi oksidasi umumnya melibatkan pelepasan gas, seperti oksigen dari dekomposisi molekul air.

Mekanisme reaksi elektrokimia dalam elektrodposisi mencakup beberapa tahap utama, yaitu:

1. Transport ion logam dari larutan menuju permukaan elektroda melalui difusi, migrasi, dan konveksi.
2. Adsorpsi ion pada permukaan elektroda sebelum terjadinya reaksi reduksi.
3. Transfer elektron, di mana ion logam menerima elektron dan berubah menjadi atom netral.
4. Integrasi atom ke dalam kisi kristal, membentuk inti kristal dan melanjutkan pertumbuhan lapisan.

Setiap tahap ini berkontribusi terhadap laju deposisi, struktur mikro, serta kualitas akhir lapisan yang terbentuk.

Kecepatan reaksi elektrokimia serta efisiensi deposisi dipengaruhi oleh berbagai parameter operasional dan kimia, di antaranya:

1. Konsentrasi Ion Logam
Konsentrasi ion dalam larutan menentukan ketersediaan spesies reaktif yang dapat tereduksi

di permukaan katoda. Konsentrasi yang lebih tinggi umumnya meningkatkan laju deposisi, selama tidak menimbulkan ketidakstabilan larutan.

2. Potensial Elektroda

Potensial elektroda mengontrol kecenderungan terjadinya reaksi reduksi dan oksidasi. Perbedaan potensial yang cukup diperlukan untuk mendorong reaksi berlangsung secara efektif.

3. Temperatur Larutan

Peningkatan temperatur dapat mempercepat kinetika reaksi dan meningkatkan mobilitas ion, sehingga mempercepat laju deposisi. Namun, temperatur yang terlalu tinggi juga dapat memengaruhi kualitas permukaan lapisan.

4. Derajat Keasaman (pH)

pH larutan memengaruhi stabilitas ion logam dan kemungkinan terjadinya reaksi samping, seperti pembentukan gas hidrogen. Pengendalian pH penting untuk menjaga kualitas dan homogenitas lapisan.

5. Rapat Arus Listrik

Rapat arus menentukan jumlah muatan listrik yang mengalir per satuan luas elektroda. Nilai rapat arus yang terlalu tinggi dapat mempercepat deposisi tetapi berpotensi meningkatkan kekasaran permukaan dan cacat lapisan.

6. Aditif dan Agen Pengompleks

Zat tambahan, seperti agen pengompleks, surfaktan, dan inhibitor, dapat mengatur kinetika reaksi dan memodifikasi struktur mikro lapisan.

Agen pengompleks, misalnya, berperan dalam menyeimbangkan potensial reduksi logam yang berbeda dalam elektrodposisi paduan.

Dengan mengatur parameter-parameter elektrokimia secara tepat, proses elektrodposisi dapat dioptimalkan untuk menghasilkan lapisan dengan:

1. Ketebalan seragam,
2. Struktur mikro yang lebih halus,
3. Daya rekat yang tinggi terhadap substrat,
4. Sifat mekanik dan fungsional yang unggul,
5. Ketahanan korosi yang lebih baik.

Pemahaman yang mendalam mengenai mekanisme reaksi elektrokimia menjadi dasar penting dalam rekayasa permukaan dan pengembangan lapisan logam serta paduan, terutama untuk aplikasi teknik yang menuntut performa tinggi.

D. Transport Ion dan Dinamika Larutan

Keberhasilan proses elektrodposisi sangat dipengaruhi oleh pergerakan ion logam dalam larutan elektrolit menuju permukaan elektroda. Transport ion ini berlangsung melalui tiga mekanisme utama, yaitu difusi, migrasi, dan konveksi, yang bekerja secara bersamaan dan saling melengkapi.

Difusi terjadi akibat adanya perbedaan konsentrasi ion di dalam larutan, di mana ion cenderung bergerak dari daerah berkonsentrasi tinggi menuju daerah berkonsentrasi rendah. Mekanisme ini menjadi dominan ketika suplai ion ke permukaan elektroda lebih lambat dibanding laju reaksi reduksi.

Migrasi merupakan pergerakan ion yang dipengaruhi oleh medan listrik yang terbentuk akibat beda potensial antara anoda dan katoda. Ion bermuatan positif akan bergerak menuju katoda, sedangkan ion bermuatan negatif bergerak menuju anoda.

Konveksi melibatkan perpindahan massa yang diakibatkan oleh aliran larutan, baik secara alami maupun melalui pengadukan mekanis. Konveksi berperan penting dalam memperbarui larutan di sekitar elektroda dan mengurangi keterbatasan difusi.

Keseimbangan antara ketiga mekanisme tersebut menentukan laju deposisi, efisiensi proses, serta keseragaman ketebalan lapisan. Dalam kondisi tertentu, deposisi dapat menjadi terbatas oleh difusi, sehingga diperlukan pengadukan, sirkulasi larutan, atau peningkatan temperatur untuk mempercepat suplai ion dan meningkatkan kualitas hasil pelapisan.

E. Nukleasi dalam Pembentukan Lapisan

Tahap awal terbentuknya lapisan pada elektrodposisi diawali dengan proses nukleasi, yaitu pembentukan inti kristal di permukaan substrat. Nukleasi berperan sebagai fondasi awal yang menentukan struktur mikro dan karakteristik akhir lapisan.

Secara umum, nukleasi dapat diklasifikasikan menjadi dua tipe utama:

1. Nukleasi instan, di mana banyak inti kristal terbentuk secara hampir bersamaan pada permukaan elektroda. Pola ini cenderung menghasilkan struktur yang lebih halus dan seragam.

2. Nukleasi progresif, di mana inti kristal terbentuk secara bertahap selama proses deposisi berlangsung. Jenis ini dapat menghasilkan variasi ukuran butir yang lebih besar.

Jenis dan distribusi nukleasi sangat memengaruhi kepadatan lapisan, ukuran butir, porositas, serta homogenitas mikrostruktur. Nukleasi yang terkendali dan merata umumnya menghasilkan lapisan yang lebih kompak, halus, dan memiliki sifat mekanik yang lebih baik.

F. Pertumbuhan Lapisan dan Evolusi Mikrostruktur

Setelah inti terbentuk, lapisan akan mengalami pertumbuhan kristal melalui pengendapan atom-atom logam secara berkelanjutan. Tahap ini menentukan:

1. Ukuran butir kristal,
2. Orientasi kristal,
3. Kekasaran permukaan,
4. Ketebalan dan kepadatan lapisan.

Laju pertumbuhan lapisan dipengaruhi oleh rapat arus dan kondisi larutan. Rapat arus yang lebih tinggi cenderung mempercepat deposisi, tetapi juga dapat meningkatkan kekasaran permukaan jika tidak dikontrol dengan baik.

Hubungan antara ukuran butir dan sifat mekanik mengikuti prinsip bahwa butir yang lebih kecil cenderung meningkatkan kekerasan dan kekuatan material. Konsep ini menjadi dasar dalam rekayasa struktur mikro lapisan elektrodposisi untuk menghasilkan material dengan performa mekanik yang lebih unggul.

F. Elektrodeposisi Paduan Logam

Berbeda dengan deposisi logam tunggal, elektrodeposisi paduan melibatkan pengendapan dua atau lebih jenis ion logam secara simultan. Tantangan utama dalam proses ini adalah perbedaan potensial reduksi antar logam. Untuk mengatasi perbedaan tersebut, digunakan strategi seperti:

1. Pengaturan komposisi larutan elektrolit,
2. Pemilihan agen pengompleks,
3. Kontrol rapat arus dan pH,
4. Penyesuaian temperatur proses.

Dengan pengendalian parameter yang tepat, paduan logam dapat terbentuk secara homogen dengan sifat yang lebih unggul dibandingkan logam murni.

G. Faktor yang Mempengaruhi Kualitas Lapisan Elektrodeposisi

Beberapa faktor utama yang menentukan kualitas lapisan meliputi:

1. Rapat arus dan tegangan,
2. Komposisi elektrolit,
3. Temperatur dan pH,
4. Waktu deposisi,
5. Kondisi permukaan substrat,
6. Aditif dan agen pengompleks.

Optimasi faktor-faktor tersebut memungkinkan produksi lapisan dengan ketebalan seragam, daya rekat tinggi, serta sifat mekanik dan fungsional yang optimal.

H. Peran Elektrodeposisi dalam Rekayasa Material Modern

Elektrodeposisi telah menjadi teknologi strategis dalam pengembangan material modern, termasuk dalam:

1. Pelapisan anti-korosi,
2. Material elektronik dan sensor,
3. Komponen magnetik dan aktuator,
4. Industri otomotif dan kedirgantaraan,
5. Rekayasa permukaan material ringan seperti aluminium.

Kemampuan untuk merekayasa struktur mikro dan sifat permukaan menjadikan elektrodeposisi sebagai metode kunci dalam menciptakan material multifungsi dengan efisiensi biaya dan performa tinggi.

BAB 4. SINTESIS LAPISAN MONEL PADA SUBSTRAT ALUMINIUM

Sintesis lapisan Monel pada substrat Al merupakan pendekatan rekayasa material yang bertujuan mengombinasikan sifat unggul Monel seperti ketahanan korosi dan kekuatan mekanik dengan keunggulan Al yang ringan dan ekonomis. Proses elektrodposisi dipilih sebagai metode pelapisan karena mampu menghasilkan lapisan dengan ketebalan terkontrol, struktur mikro yang dapat direkayasa, serta efisiensi biaya yang relatif tinggi.

A. Preparasi Substrat Aluminium

Persiapan substrat Al merupakan tahap krusial karena kualitas permukaan awal sangat menentukan daya rekat dan homogenitas lapisan hasil deposisi. Tahapan preparasi umumnya meliputi pembersihan mekanis, pembersihan kimia, serta aktivasi permukaan.

Pembersihan mekanis dilakukan dengan pengamplasan bertahap untuk menghilangkan oksida permukaan, goresan kasar, dan kontaminan. Selanjutnya, pembersihan kimia dilakukan menggunakan pelarut organik seperti etanol atau aseton untuk menghilangkan minyak dan residu lemak.

Setelah itu, substrat direndam dalam larutan asam ringan untuk menghilangkan lapisan oksida alami Al serta meningkatkan energi permukaan. Tahap aktivasi bertujuan untuk menciptakan permukaan yang lebih reaktif sehingga proses nukleasi dan pertumbuhan lapisan Monel dapat berlangsung lebih merata dan kuat.

B. Komposisi Larutan Elektrolit

Larutan elektrolit merupakan media utama dalam proses elektrodposisi, berfungsi sebagai sumber ion logam yang akan tereduksi dan membentuk lapisan paduan Monel. Komposisi larutan biasanya mengandung garam Ni dan Cu dalam perbandingan tertentu untuk mencapai rasio Monel yang diinginkan.

Selain ion utama, larutan elektrolit juga dapat mengandung bahan tambahan seperti agen pengompleks untuk mengontrol laju reaksi, penstabil pH untuk menjaga kestabilan kimia larutan, serta aditif organik yang berfungsi memperhalus struktur butir dan mengurangi tegangan internal lapisan.

Pemilihan jenis elektrolit dan konsentrasi setiap komponen harus mempertimbangkan kestabilan larutan, kompatibilitas ion logam, serta kemampuan untuk menghasilkan deposisi paduan yang homogen. Rasio Ni dan Cu dalam larutan menjadi faktor utama dalam menentukan komposisi akhir lapisan Monel.

C. Parameter Deposisi

Parameter deposisi merupakan faktor kunci yang menentukan keberhasilan proses elektrodposisi serta kualitas akhir lapisan Monel yang terbentuk pada

substrat Al. Setiap parameter memengaruhi kinetika reaksi elektrokimia, mekanisme nukleasi, laju pertumbuhan kristal, serta karakteristik mikrostruktur dan sifat fungsional lapisan. Oleh karena itu, pengaturan parameter deposisi harus dilakukan secara cermat untuk memperoleh lapisan yang homogen, padat, dan memiliki daya rekat yang baik.

1. Arus dan Tegangan

Arus listrik berperan langsung dalam mengendalikan jumlah muatan yang mengalir dalam sistem elektrodposisi, sehingga menentukan laju reduksi ion logam pada permukaan katoda. Rapat arus yang lebih tinggi umumnya meningkatkan kecepatan deposisi dan mempercepat pembentukan lapisan. Namun, jika rapat arus melampaui batas optimum, dapat terjadi deposisi tidak merata, pembentukan permukaan kasar, porositas meningkat, serta munculnya cacat seperti dendrit atau pembentukan struktur kristal yang tidak stabil.

Sebaliknya, rapat arus yang terlalu rendah dapat mengakibatkan laju deposisi yang lambat, pembentukan lapisan yang sangat tipis, serta pertumbuhan kristal yang kurang efisien. Oleh karena itu, pemilihan rapat arus harus mempertimbangkan keseimbangan antara kecepatan deposisi dan kualitas morfologi permukaan.

Tegangan berfungsi untuk mengatasi hambatan elektrokimia dalam sistem, termasuk

resistansi larutan, polarisasi elektroda, dan overpotensial reaksi. Tegangan yang diterapkan harus cukup tinggi untuk mendorong reaksi reduksi ion logam secara efektif, tetapi tetap dalam rentang yang aman untuk mencegah reaksi samping seperti evolusi gas hidrogen di katoda atau oksigen di anoda. Tegangan yang terlalu tinggi juga dapat mempercepat degradasi elektrolit dan mengurangi efisiensi deposisi.

2. Waktu Deposisi

Waktu deposisi menentukan jumlah total muatan listrik yang dilewatkan dalam sistem, yang secara langsung berkaitan dengan massa dan ketebalan lapisan yang terbentuk berdasarkan prinsip Hukum Faraday. Semakin lama durasi deposisi, semakin banyak material yang terendapkan, sehingga menghasilkan lapisan yang lebih tebal.

Meskipun demikian, deposisi yang berlangsung terlalu lama dapat menimbulkan akumulasi tegangan internal akibat pertumbuhan kristal yang berlebihan, yang berpotensi menyebabkan retakan mikro, delaminasi, atau penurunan daya rekat lapisan. Selain itu, pertumbuhan butir yang terlalu besar akibat deposisi berkepanjangan dapat mengurangi kekerasan dan homogenitas struktur mikro.

Oleh karena itu, waktu deposisi harus ditentukan berdasarkan kebutuhan aplikasi, target ketebalan lapisan, serta keseimbangan antara

kekuatan mekanik, ketahanan aus, dan stabilitas struktural.

3. Suhu Larutan

Suhu larutan memainkan peran penting dalam mengendalikan kinetika reaksi elektrokimia serta mobilitas ion dalam elektrolit. Peningkatan temperatur umumnya mempercepat difusi ion, menurunkan viskositas larutan, dan meningkatkan laju reaksi reduksi, sehingga dapat meningkatkan efisiensi deposisi dan menghasilkan lapisan yang lebih seragam.

Namun, suhu yang terlalu tinggi dapat menurunkan kestabilan kimia larutan elektrolit, mempercepat dekomposisi aditif organik, serta meningkatkan kemungkinan terbentuknya reaksi samping. Temperatur tinggi juga dapat memengaruhi ukuran butir kristal, yang dalam beberapa kasus dapat menyebabkan pertumbuhan butir kasar dan menurunkan kekuatan mekanik lapisan.

Pengendalian suhu yang stabil selama proses deposisi membantu menghasilkan struktur mikro yang lebih halus, meningkatkan kepadatan lapisan, serta memperbaiki sifat mekanik dan ketahanan korosi.

4. pH dan Kondisi Kimia Larutan

Nilai pH larutan elektrolit sangat memengaruhi kestabilan ion logam, spesiasi kimia, serta kemungkinan terjadinya reaksi samping selama proses elektrodposisi. pH yang terlalu rendah dapat meningkatkan korosivitas larutan

terhadap substrat dan peralatan, pH yang terlalu tinggi dapat menyebabkan presipitasi ion logam dalam bentuk hidroksida yang mengganggu proses deposisi.

pH juga berpengaruh terhadap overpotensial reaksi reduksi serta mekanisme pembentukan nukleus kristal. Kondisi pH yang optimal dapat mendukung deposisi yang lebih seragam, meningkatkan efisiensi arus, serta memperbaiki daya rekat dan kepadatan lapisan.

Untuk menjaga kestabilan kimia larutan selama proses berlangsung, sering digunakan sistem buffer atau bahan pengontrol pH yang mampu mempertahankan kondisi kimia dalam rentang yang diinginkan. Selain itu, keberadaan agen pengompleks dapat membantu menstabilkan ion logam dalam larutan dan mengontrol laju reduksi, sehingga komposisi paduan yang terbentuk menjadi lebih homogen.

5. Interaksi Antarparameter Deposisi

Selain pengaruh masing-masing parameter secara individual, kualitas lapisan juga ditentukan oleh interaksi antarparameter deposisi. Sebagai contoh, peningkatan rapat arus dapat memerlukan penyesuaian suhu dan komposisi elektrolit untuk mencegah deposisi tidak merata. Demikian pula, perubahan pH dapat memengaruhi efektivitas aditif dan agen pengompleks dalam larutan.

Oleh karena itu, optimasi proses deposisi sebaiknya dilakukan secara holistik dengan mempertimbangkan keterkaitan antara arus,

tegangan, waktu, suhu, dan kondisi kimia larutan untuk mencapai performa lapisan Monel yang optimal.

D. Prosedur Sintesis Lapisan Monel

Proses sintesis lapisan Monel pada substrat Al dilakukan melalui metode elektrodeposisi dengan tahapan yang terkontrol untuk memastikan kualitas lapisan yang optimal. Tahapan awal meliputi pemasangan substrat Al sebagai elektroda kerja (katoda) dan elektroda lawan sebagai anoda di dalam sel elektrokimia. Jenis anoda yang digunakan dapat berupa anoda larut atau inert, tergantung pada strategi pengendalian komposisi ion logam dalam larutan.

Larutan elektrolit disiapkan sesuai dengan komposisi yang telah dirancang dalam tahap desain eksperimen. Larutan ini umumnya mengandung ion Ni dan Cu sebagai sumber pembentuk paduan Monel, serta aditif tertentu seperti agen pengompleks, bahan penstabil, dan zat penghalus permukaan untuk mengontrol kinetika deposisi dan kualitas morfologi lapisan.

Sebelum proses deposisi dimulai, seluruh sistem diperiksa untuk memastikan kondisi listrik, suhu, dan larutan kimia berada dalam batas yang telah ditentukan. Substrat aluminium yang telah dipreparasi dicelupkan ke dalam larutan elektrolit, kemudian sumber daya listrik diaktifkan untuk mengalirkan arus sesuai rapat arus yang direncanakan. Selama proses berlangsung, parameter utama seperti arus, tegangan, suhu, dan pH larutan

dipantau secara berkala guna menjaga kestabilan reaksi elektrokimia.

Kontrol suhu dilakukan untuk mempertahankan kinetika reaksi yang stabil serta mencegah degradasi larutan elektrolit. Pengadukan larutan atau sirkulasi fluida dapat diterapkan untuk memastikan distribusi ion yang merata dan menghindari pembatasan difusi. Selain itu, pemantauan pH dilakukan untuk menjaga kestabilan ion logam serta mencegah terbentuknya presipitasi senyawa yang tidak diinginkan.

Setelah waktu deposisi yang telah ditentukan tercapai, sumber daya listrik dimatikan, dan sampel dikeluarkan dari sel elektrokimia. Sampel kemudian dibilas menggunakan air deionisasi untuk menghilangkan residu elektrolit yang menempel pada permukaan. Tahap selanjutnya adalah proses pengeringan menggunakan udara bersih atau oven bersuhu rendah guna mencegah kontaminasi dan oksidasi yang tidak diinginkan sebelum dilakukan tahapan karakterisasi lanjutan.

Prosedur sintesis ini dirancang untuk menghasilkan lapisan Monel yang memiliki ketebalan seragam, daya rekat yang baik terhadap substrat aluminium, serta sifat mekanik dan elektrokimia yang sesuai dengan kebutuhan aplikasi teknik dan industri.

E. Evaluasi Kualitas Lapisan

Evaluasi kualitas lapisan Monel merupakan tahapan penting untuk menentukan keberhasilan proses sintesis serta memastikan bahwa lapisan memenuhi kriteria

teknis dan fungsional yang diharapkan. Penilaian kualitas dilakukan dengan menggabungkan analisis morfologi, struktur mikro, komposisi kimia, sifat mekanik, serta ketahanan terhadap lingkungan korosif.

Salah satu parameter utama yang dievaluasi adalah ketebalan lapisan, yang berkaitan langsung dengan waktu deposisi dan efisiensi arus. Ketebalan dapat diukur menggunakan metode mikroskopi penampang, profilometri permukaan, atau teknik non-destruktif berbasis elektromagnetik. Ketebalan yang seragam menjadi indikator penting dari kestabilan proses deposisi.

Morfologi permukaan dianalisis untuk menilai tingkat kehalusan, kekasaran, kepadatan butir, serta keberadaan cacat seperti pori, retakan, atau struktur dendritik. Pengamatan ini umumnya dilakukan menggunakan mikroskop elektron atau mikroskop optik resolusi tinggi. Struktur mikro yang halus dan kompak menunjukkan proses deposisi yang terkendali dan kualitas lapisan yang baik.

Komposisi kimia lapisan dianalisis untuk memastikan rasio Ni dan Cu sesuai dengan target pembentukan paduan Monel. Teknik seperti *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS) atau spektroskopi sinar-X digunakan untuk memetakan distribusi unsur serta mendeteksi kemungkinan kontaminasi.

Daya rekat lapisan terhadap substrat Al menjadi faktor krusial dalam menentukan keandalan material dalam aplikasi praktis. Evaluasi daya rekat dapat dilakukan melalui uji tarik, uji gores, atau metode lentur. Lapisan dengan daya rekat yang baik menunjukkan

keberhasilan tahapan preparasi permukaan dan kestabilan pertumbuhan lapisan selama deposisi.

Selain itu, sifat mekanik seperti kekerasan dan ketahanan aus diuji untuk menilai peningkatan performa permukaan dibandingkan substrat Al murni. Uji mikrohardness dan tribologi sering digunakan untuk mengukur resistansi terhadap deformasi plastis dan keausan.

Ketahanan korosi merupakan aspek penting dalam aplikasi lingkungan agresif, seperti atmosfer laut atau larutan elektrolit. Evaluasi dilakukan menggunakan teknik elektrokimia seperti uji polarisasi potensiodinamik dan impedance spectroscopy untuk menentukan laju degradasi material serta stabilitas lapisan dalam jangka panjang.

Hasil evaluasi kualitas lapisan digunakan untuk menganalisis hubungan antara parameter deposisi dan karakteristik lapisan yang dihasilkan. Informasi ini menjadi dasar dalam mengoptimalkan kondisi proses, meningkatkan performa lapisan Monel, serta mengembangkan strategi sintesis yang lebih efisien dan aplikatif untuk kebutuhan industri dan riset material lanjutan.

BAB 5. KARAKTERISASI STRUKTUR KRISTAL DAN KOMPOSISI LAPISAN MONEL

Karakterisasi struktur kristal dan komposisi kimia merupakan tahapan penting dalam evaluasi kualitas lapisan Monel yang disintesis pada substrat aluminium. Analisis ini bertujuan untuk memahami fase kristal yang terbentuk, tingkat kristalinitas, distribusi unsur Ni dan Cu, serta hubungan antara struktur mikro dengan sifat mekanik dan ketahanan korosi lapisan.

Teknik utama yang digunakan dalam karakterisasi ini meliputi *X-ray Diffraction* (XRD) untuk analisis struktur kristal dan fase, serta *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS) untuk analisis komposisi unsur dan distribusinya pada permukaan lapisan.

A. Analisis Struktur Kristal Menggunakan *X-ray Diffraction* (XRD)

X-ray Diffraction (XRD) merupakan teknik karakterisasi non-destruktif yang digunakan secara luas untuk menganalisis struktur kristal material padat. Metode ini berperan penting dalam mengidentifikasi fase kristal, menentukan parameter kisi, mengevaluasi

tingkat kristalinitas, serta mengkaji perubahan struktur akibat proses sintesis atau perlakuan material.

Prinsip kerja XRD didasarkan pada fenomena difraksi sinar-X oleh bidang atom dalam kisi kristal, di mana sinar-X yang mengenai material akan dihamburkan oleh atom-atom yang tersusun secara periodik. Interferensi konstruktif antara gelombang sinar-X yang terhambur terjadi ketika memenuhi kondisi Hukum Bragg, yang dinyatakan sebagai:

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

di mana:

- n = orde difraksi (bilangan bulat positif),
- λ = panjang gelombang sinar-X yang digunakan,
- d = jarak antar bidang kristal,
- θ = sudut datang sinar-X terhadap bidang kristal.

Persamaan ini menunjukkan bahwa puncak difraksi hanya muncul pada sudut tertentu yang memenuhi hubungan geometris antara panjang gelombang sinar-X dan jarak antar bidang kristal. Dengan menganalisis posisi dan intensitas puncak difraksi pada pola XRD, dapat diperoleh informasi struktural yang sangat rinci mengenai material yang diuji.

Dalam konteks karakterisasi lapisan Monel pada substrat aluminium, analisis XRD memungkinkan identifikasi fase kristal yang terbentuk, khususnya untuk memastikan apakah paduan Monel membentuk larutan padat homogen dengan struktur *face-centered cubic*

(FCC). Perbandingan pola difraksi hasil eksperimen dengan data standar dari basis data seperti ICDD/JCPDS dapat digunakan untuk mengonfirmasi keberadaan fase Monel serta mendeteksi kemungkinan fase sekunder atau oksida yang tidak diinginkan.

Selain identifikasi fase, XRD juga memberikan informasi mengenai:

1. Struktur kristal lapisan Monel, termasuk jenis kisi dan simetri kristal.
2. Parameter kisi (lattice parameter), yang dapat digunakan untuk menilai perubahan komposisi dan distorsi kisi akibat substitusi atom Ni dan Cu.
3. Derajat kristalinitas, yang mencerminkan tingkat keteraturan struktur atom dalam lapisan dan berkaitan dengan stabilitas mekanik serta ketahanan korosi.
4. Ukuran kristalit, yang dapat dihitung menggunakan persamaan Scherrer, di mana ukuran kristalit yang lebih kecil umumnya berkorelasi dengan peningkatan kekerasan dan kekuatan mekanik.
5. Tegangan sisa (*residual stress*), yang dapat diestimasi dari pergeseran puncak difraksi dan berpengaruh terhadap stabilitas struktural serta risiko retak pada lapisan.

Lebar puncak difraksi (*peak broadening*) dapat memberikan indikasi adanya mikroregangan (*microstrain*) dan ukuran kristalit yang sangat halus, yang sering muncul pada lapisan hasil elektrodposisi akibat laju pertumbuhan kristal yang cepat. Sementara itu, perubahan intensitas relatif puncak difraksi dapat

menunjukkan adanya tekstur kristal (*preferred orientation*), yang berhubungan dengan mekanisme pertumbuhan lapisan selama proses deposisi.

Analisis XRD tidak hanya berfungsi untuk mengidentifikasi fase kristal, tetapi juga menjadi alat utama dalam memahami hubungan antara struktur kristal, parameter deposisi, dan sifat mekanik serta fungsional lapisan Monel. Data yang diperoleh dari karakterisasi ini menjadi dasar penting dalam optimasi proses sintesis dan peningkatan performa material.

B. Identifikasi Fase Kristal Lapisan Monel

Lapisan Monel, yang merupakan paduan berbasis Ni-Cu, umumnya membentuk struktur kristal *face-centered cubic* (FCC) sebagai hasil dari pembentukan larutan padat substitusional. Struktur ini terbentuk karena kesamaan jari-jari atom, struktur kristal dasar, serta kompatibilitas energi ikatan antara Ni dan Cu, sehingga memungkinkan atom Cu menggantikan posisi atom Ni dalam kisi kristal tanpa mengubah struktur dasar secara signifikan.

Identifikasi fase kristal pada lapisan Monel dilakukan melalui analisis pola difraksi sinar-X (XRD) dengan membandingkan posisi dan intensitas puncak difraksi terhadap data referensi dalam basis data standar seperti *Joint Committee on Powder Diffraction Standards* (JCPDS) atau *International Centre for Diffraction Data* (ICDD). Proses ini bertujuan untuk memastikan keberadaan fase Monel, mengonfirmasi homogenitas paduan, serta mendeteksi kemungkinan fase sekunder

seperti oksida atau intermetalik yang dapat memengaruhi sifat mekanik dan ketahanan korosi.

Keberadaan puncak difraksi khas Ni dan Cu yang saling tumpang tindih atau bergeser menjadi indikator utama terbentuknya larutan padat homogen. Tumpang tindih puncak mencerminkan bahwa kedua unsur menyatu dalam satu fase tunggal, bukan sebagai fase terpisah. Hal ini merupakan karakteristik penting dari paduan Monel yang stabil secara struktural dan kimia.

Perubahan posisi puncak difraksi (*peak shifting*) dapat memberikan informasi mendalam mengenai kondisi mikrostruktur lapisan, antara lain:

1. Variasi rasio komposisi Ni/Cu, di mana peningkatan fraksi Cu cenderung menyebabkan perubahan parameter kisi karena perbedaan ukuran atom antara Ni dan Cu.
2. Tegangan sisa (*residual stress*) yang terbentuk selama proses elektrodposisi, yang dapat berasal dari perbedaan laju pertumbuhan kristal, perubahan temperatur, atau ketidakseimbangan kinetika reaksi.

Distorsi kisi kristal (*lattice distortion*) akibat ketidak sempurnaan struktur, substitusi atom, serta keberadaan defek seperti dislokasi dan vakansi.

Selain posisi puncak, pelebaran puncak difraksi (*peak broadening*) juga merupakan parameter penting yang berkaitan dengan ukuran kristalit dan mikroregangan dalam lapisan. Pelebaran puncak dapat dianalisis menggunakan persamaan Scherrer, yang memungkinkan estimasi ukuran kristalit berdasarkan lebar setengah tinggi puncak (*Full Width at Half*

Maximum/FWHM). Ukuran kristalit yang lebih kecil umumnya dikaitkan dengan peningkatan kekerasan dan kekuatan mekanik, sesuai dengan prinsip Hall–Petch, di mana batas butir berperan sebagai penghalang pergerakan dislokasi.

Analisis XRD juga dapat digunakan untuk mengidentifikasi preferential orientation (tekstur kristal) pada lapisan Monel, yang sering muncul akibat mekanisme pertumbuhan anisotropik selama proses elektrodposisi. Tekstur ini dapat memengaruhi sifat mekanik, ketahanan aus, dan respon magnetik material.

C. Analisis Komposisi Unsur Menggunakan *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS)

Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) merupakan teknik analisis unsur yang terintegrasi dengan *Scanning Electron Microscopy*. Metode ini memungkinkan identifikasi unsur penyusun lapisan serta estimasi persentase komposisi masing-masing elemen.

Analisis EDS pada lapisan Monel bertujuan untuk:

1. Menentukan rasio Ni dan Cu dalam lapisan
2. Memastikan keberhasilan pembentukan paduan
3. Mendeteksi kemungkinan kontaminan atau unsur minor
4. Mengevaluasi keseragaman komposisi

Spektrum EDS menampilkan puncak karakteristik dari Ni dan Cu, di mana intensitas relatif puncak mencerminkan fraksi unsur dalam lapisan.

D. Distribusi Unsur Ni dan Cu dalam Lapisan

Distribusi spasial unsur Ni dan Cu dianalisis menggunakan mapping EDS, yang memberikan gambaran visual mengenai penyebaran unsur pada permukaan lapisan. Distribusi yang homogen menunjukkan keberhasilan proses elektrodeposisi dalam menghasilkan paduan yang merata.

Distribusi unsur yang tidak seragam dapat mengindikasikan:

1. Fluktuasi parameter deposisi
2. Perbedaan kinetika reduksi ion Ni dan Cu
3. Efek difusi dan migrasi ion dalam larutan elektrolit

Keseragaman distribusi Ni dan Cu berperan penting dalam menentukan sifat lapisan, termasuk:

1. Ketahanan korosi
2. Stabilitas elektrokimia
3. Respons magnetik
4. Kekuatan mekanik

E. Hubungan Struktur Kristal dan Komposisi terhadap Sifat Lapisan

Struktur kristal dan komposisi kimia lapisan Monel memiliki pengaruh langsung terhadap performa fungsionalnya. Ukuran kristalit yang lebih halus umumnya meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus, sedangkan distribusi unsur yang homogen meningkatkan stabilitas elektrokimia dan daya tahan terhadap lingkungan agresif.

Paduan Monel dengan komposisi optimal dapat menghasilkan:

1. Ketahanan korosi tinggi di lingkungan laut
2. Kombinasi kekuatan dan keuletan yang baik
3. Sifat magnetik yang dapat dikontrol
4. Stabilitas termal yang baik

Analisis struktur kristal dan komposisi unsur menjadi dasar penting dalam optimasi parameter sintesis dan peningkatan kualitas lapisan Monel.

BAB 6. MORFOLOGI PERMUKAAN, KETEBALAN, DAN MIKROSTRUKTUR LAPISAN

Karakteristik morfologi permukaan, ketebalan, dan mikrostruktur merupakan aspek penting dalam menilai kualitas dan kinerja lapisan hasil proses elektrodposisi. Parameter-parameter ini berpengaruh langsung terhadap sifat mekanik, ketahanan aus, ketahanan korosi, serta performa fungsional lapisan Monel pada substrat aluminium. Oleh karena itu, analisis visual dan mikrostruktural menjadi langkah utama dalam mengevaluasi keberhasilan sintesis lapisan.

Salah satu teknik utama yang digunakan untuk mengamati struktur permukaan dan penampang lapisan adalah dengan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* yang memungkinkan visualisasi detail morfologi hingga skala mikrometer dan nanometer.

A. Analisis Morfologi Permukaan Menggunakan *Scanning Electron Microscopy*

Scanning Electron Microscopy digunakan untuk mengamati topografi permukaan lapisan Monel secara detail. Teknik ini bekerja dengan memindai permukaan sampel menggunakan berkas elektron berenergi tinggi, sehingga menghasilkan citra beresolusi tinggi yang menampilkan struktur permukaan, pori, retakan, dan distribusi butir kristal.

Analisis citra SEM pada permukaan lapisan bertujuan untuk mengevaluasi:

1. Tingkat kehalusan atau kekasaran permukaan
2. Homogenitas distribusi partikel dan butir
3. Keberadaan cacat seperti pori, retakan, atau aglomerasi
4. Pola pertumbuhan kristal selama deposisi

Lapisan yang berkualitas tinggi umumnya menunjukkan permukaan yang halus, kompak, bebas pori besar, serta memiliki distribusi butir yang merata. Sebaliknya, permukaan yang kasar dan tidak homogen dapat mengindikasikan ketidakseimbangan parameter deposisi seperti rapat arus, suhu, atau komposisi elektrolit.

B. Analisis Penampang dan Ketebalan Lapisan

Selain permukaan, citra penampang melintang digunakan untuk mengukur ketebalan lapisan serta mengevaluasi kualitas antarmuka antara lapisan Monel dan substrat Al.

Pengukuran ketebalan lapisan memberikan informasi penting mengenai:

1. Laju deposisi selama proses elektrodposisi
2. Efisiensi pemanfaatan arus listrik
3. Konsistensi pertumbuhan lapisan sepanjang waktu deposisi

Ketebalan lapisan dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, antara lain:

1. Besarnya arus dan rapat arus
2. Waktu deposisi

3. Konsentrasi ion logam dalam elektrolit
4. Temperatur dan kondisi kimia larutan

Lapisan yang ideal memiliki ketebalan seragam, melekat kuat pada substrat, serta tidak menunjukkan adanya delaminasi atau rongga pada antarmuka.

C. Mikrostruktur Lapisan dan Ukuran Butir

Mikrostruktur mengacu pada susunan butir kristal dan batas butir dalam lapisan. Ukuran dan distribusi butir memiliki peran penting dalam menentukan sifat mekanik, seperti kekerasan dan ketahanan terhadap deformasi.

Ukuran butir yang lebih kecil umumnya dikaitkan dengan:

1. Peningkatan kekuatan dan kekerasan material
2. Peningkatan ketahanan aus
3. Struktur yang lebih padat dan kompak

Hubungan antara ukuran butir dan kekuatan mekanik dikenal sebagai prinsip *Hall-Petch*, yang menyatakan bahwa batas butir dapat menghambat pergerakan dislokasi dan meningkatkan kekuatan material.

Mikrostruktur lapisan dipengaruhi oleh:

1. Mekanisme nukleasi dan pertumbuhan kristal
2. Rapat arus selama deposisi
3. Suhu larutan
4. Keberadaan aditif atau agen pengompleks dalam elektrolit

Pengendalian parameter-parameter ini memungkinkan rekayasa mikrostruktur untuk

memperoleh lapisan dengan sifat mekanik yang lebih unggul.

D. Kekasaran Permukaan dan Homogenitas Lapisan

Kekasaran permukaan merupakan indikator penting dalam menentukan performa lapisan, terutama dalam aplikasi yang berkaitan dengan gesekan, keausan, dan adhesi. Permukaan yang terlalu kasar dapat meningkatkan laju keausan dan mempercepat degradasi material antara permukaan yang terlalu halus dapat memengaruhi daya rekat dalam aplikasi tertentu.

Faktor yang memengaruhi kekasaran permukaan meliputi:

- Laju deposisi
- Ukuran butir kristal
- Stabilitas arus dan tegangan
- Komposisi elektrolit

Homogenitas lapisan mencerminkan keseragaman struktur dan komposisi di seluruh permukaan. Lapisan yang homogen umumnya memiliki performa mekanik dan ketahanan korosi yang lebih konsisten serta umur pakai yang lebih panjang.

E. Hubungan Morfologi dengan Sifat Fungsional Lapisan

Morfologi, ketebalan, dan mikrostruktur saling berkaitan dan berkontribusi terhadap kinerja fungsional lapisan Monel, antara lain:

- Ketahanan aus, yang meningkat dengan struktur mikro yang halus dan padat

- Ketahanan korosi, yang lebih baik pada permukaan yang homogen dan bebas pori
- Sifat mekanik, yang dipengaruhi oleh ukuran butir dan kepadatan lapisan
- Respons magnetik dan elektrokimia, yang dipengaruhi oleh keseragaman struktur dan komposisi

Dengan memahami hubungan antara parameter proses dan karakteristik mikrostruktur, teknologi elektrodposisi dapat dioptimalkan untuk menghasilkan material berlapis yang ringan, kuat, tahan korosi, dan multifungsi.

BAB 7. EVALUASI SIFAT MEKANIK, MAGNETIK, DAN ELEKTROKIMIA

Lapisan Monel berbasis paduan Ni-Cu pada substrat Al dikembangkan untuk meningkatkan performa mekanik, ketahanan korosi, serta fungsi magnetik dan elektrokimia material ringan. Evaluasi sifat fungsional ini menjadi tahap penting untuk menentukan efektivitas proses elektrodeposisi dan potensi aplikasinya dalam industri modern.

Bab ini membahas metode pengujian serta analisis sifat mekanik, magnetik, dan elektrokimia lapisan Monel, termasuk hubungan antara parameter sintesis, mikrostruktur, dan kinerja material.

A. Evaluasi Sifat Mekanik Lapisan Monel

1. Uji Kekerasan Permukaan

Kekerasan merupakan indikator utama ketahanan terhadap deformasi plastis dan keausan. Lapisan Monel umumnya diuji menggunakan metode microhardness (Vickers) atau nanoindentation, yang memungkinkan pengukuran kekerasan pada lapisan tipis tanpa mempengaruhi substrat.

Faktor-faktor yang memengaruhi nilai kekerasan meliputi:

- Ukuran butir kristal
- Kepadatan dislokasi

- Tegangan residual
- Komposisi Ni/Cu dalam lapisan

Berdasarkan prinsip Hall–Petch semakin kecil ukuran butir, semakin tinggi kekerasan material. Oleh karena itu, kontrol nukleasi dan pertumbuhan kristal selama elektrodposisi menjadi strategi utama dalam meningkatkan performa mekanik.

2. Kekuatan dan Ketahanan Aus

Selain kekerasan, sifat mekanik lainnya yang penting adalah ketahanan aus. Lapisan Monel memberikan perlindungan tambahan terhadap degradasi mekanik akibat gesekan, abrasi, dan beban siklik. Pengujian aus dapat dilakukan menggunakan:

- *Pin-on-disc test*
- *Sliding wear test*
- *Tribological analysis*

Lapisan yang lebih homogen dan kompak cenderung memiliki ketahanan aus lebih baik karena mengurangi pembentukan retak mikro dan pelepasan partikel.

3. Daya Rekat Lapisan terhadap Substrat

Daya rekat antara lapisan Monel dan Al menentukan ketahanan terhadap delaminasi. Evaluasi dilakukan melalui uji:

- *Scratch test*
- *Peel test*
- *Adhesion strength measurement*

Daya rekat dipengaruhi oleh:

- Preparasi permukaan substrat
- Kondisi deposisi
- Tegangan residual
- Transisi mikrostruktur pada antarmuka

Lapisan dengan adhesi tinggi memiliki umur pakai lebih lama dalam kondisi operasi ekstrem.

B. Evaluasi Sifat Magnetik Lapisan Monel

1. Dasar Sifat Magnetik dalam Sistem Monel
Ni memiliki sifat feromagnetik, sedangkan Cu bersifat non-magnetik. Dalam paduan Monel, sifat magnetik dapat dikendalikan melalui komposisi Ni dan kondisi mikrostruktur. Dengan mengatur rasio Ni/Cu, material dapat direkayasa untuk menghasilkan respons magnetik yang stabil dan terkendali.
2. Pengukuran Magnetik Menggunakan *Vibrating Sample Magnetometer* (VSM)
Pengujian sifat magnetik dilakukan menggunakan *Vibrating Sample Magnetometer* (VSM), yang mengukur respons magnetisasi material terhadap medan magnet eksternal. Parameter utama yang dianalisis meliputi:
 - a. Magnetisasi saturasi
 - b. Remanensi magnetik
 - c. Koersivitas
 - d. Bentuk kurva hysteresis
 Kurva hysteresis memberikan gambaran karakter magnetik lapisan, termasuk kestabilan magnetisasi dan potensi penggunaannya dalam sensor dan perangkat elektromagnetik.

3. Hubungan Mikrostruktur dengan Respons Magnetik

Sifat magnetik sangat dipengaruhi oleh:

- a. Ukuran butir kristal
- b. Distribusi fasa Ni
- c. Tegangan residual
- d. Homogenitas lapisan

Lapisan dengan struktur mikro halus dan komposisi merata cenderung menunjukkan respons magnetik yang lebih stabil dan reproducible.

C. Evaluasi Ketahanan Korosi Lapisan Monel

1. Peran Monel dalam Perlindungan Korosi

Monel dikenal memiliki ketahanan korosi tinggi, khususnya di lingkungan laut, larutan garam, dan atmosfer agresif. Kombinasi Ni dan Cu meningkatkan kestabilan elektrokimia dan memperlambat laju reaksi degradasi. Lapisan Monel pada aluminium berfungsi sebagai:

- a. Penghalang difusi ion agresif
- b. Proteksi terhadap oksidasi
- c. Lapisan pasif elektrokimia

2. Metode Pengujian Korosi

Evaluasi ketahanan korosi dilakukan melalui metode elektrokimia, seperti:

- a. *Potentiodynamic polarization*
- b. *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS)
- c. *Open Circuit Potential* (OCP)

Parameter yang dianalisis meliputi:

- a. Laju korosi

- b. Potensial korosi
- c. Resistansi transfer muatan
- d. Kapasitansi lapisan pasif

Lapisan yang lebih kompak dan homogen umumnya menunjukkan resistansi korosi yang lebih tinggi.

3. Mekanisme Perlindungan Korosi pada Lapisan Monel

Ketahanan korosi dipengaruhi oleh:

- a. Pembentukan film pasif stabil
- b. Rendahnya porositas lapisan
- c. Distribusi Ni yang merata
- d. Minimnya cacat mikro

Pengendalian parameter deposisi menjadi kunci dalam menghasilkan lapisan dengan performa perlindungan maksimal.

D. Kinerja Elektrokimia dan Reaksi Evolusi Hidrogen (HER)

1. Elektrodposisi dan Aktivitas Elektrokatalitik
Lapisan Monel juga berpotensi sebagai material elektrokatalis, terutama untuk *Hydrogen Evolution Reaction* (HER) dalam sistem energi hidrogen dan elektrolisis air. Ni dikenal sebagai katalis yang baik untuk HER, berkontribusi dalam meningkatkan stabilitas permukaan.
2. Parameter Kinerja Elektrokimia
Evaluasi HER dilakukan dengan mengukur:
 - a. *Overpotential*
 - b. *Tafel slope*
 - c. *Exchange current density*

d. Stabilitas siklik

Lapisan dengan permukaan aktif tinggi dan mikrostruktur halus menunjukkan performa elektrokatalitik yang lebih baik.

3. Hubungan Struktur Mikro dengan Aktivitas HER
Faktor yang meningkatkan performa HER meliputi:

- a. Luas permukaan spesifik tinggi
- b. Distribusi Ni aktif
- c. Kekasaran mikro yang terkontrol
- d. Struktur pori yang optimal

Dengan rekayasa elektrodeposisi yang tepat, lapisan Monel dapat berfungsi sebagai katalis efisien dan berbiaya rendah.

E. Keterkaitan Sifat Mekanik, Magnetik, dan Elektrokimia

Sifat mekanik, magnetik, dan elektrokimia saling berkaitan melalui struktur mikro material. Lapisan dengan:

- a. Ukuran butir halus
- b. Komposisi homogen
- c. Tegangan residual rendah

Kepadatan tinggi cenderung menunjukkan performa unggul dalam berbagai aspek fungsional.

Pendekatan multidisiplin dalam evaluasi ini memungkinkan optimalisasi material untuk aplikasi industri lanjutan.

F. Implikasi Industri dan Aplikasi Teknologi

Lapisan Monel pada aluminium berpotensi diterapkan dalam berbagai sektor, antara lain:

- a. Industri maritim dan offshore
- b. Komponen otomotif ringan
- c. Perangkat elektronik dan sensor magnetik
- d. Sistem energi hidrogen
- e. Aerospace dan transportasi

Kombinasi bobot ringan, ketahanan tinggi, dan fungsi magnetik menjadikan material ini unggul untuk aplikasi modern.

BAB 8. APLIKASI INDUSTRI DAN INOVASI TEKNOLOGI

Perkembangan teknologi material modern menuntut hadirnya material yang memiliki performa tinggi, daya tahan kuat, bobot ringan, serta efisiensi biaya. Salah satu pendekatan yang banyak digunakan untuk memenuhi kebutuhan tersebut adalah rekayasa permukaan melalui pelapisan logam, termasuk pemanfaatan lapisan Monel pada substrat aluminium.

Lapisan Monel, yang berbasis paduan Ni-Cu, dikenal memiliki ketahanan korosi yang sangat baik, kekuatan mekanik yang tinggi, serta stabilitas kimia dan termal yang unggul. Kombinasi antara keunggulan Monel dan ringan serta ekonomisnya aluminium menjadikan sistem ini sangat potensial untuk berbagai aplikasi industri dan inovasi teknologi masa depan.

A. Aplikasi Lapisan Monel dalam Industri Maritim dan Kelautan

Lingkungan laut merupakan salah satu lingkungan paling agresif terhadap material logam akibat paparan air asin, ion klorida, dan kelembapan tinggi. Oleh karena itu, material yang digunakan di sektor maritim harus memiliki ketahanan korosi yang sangat baik.

Lapisan Monel banyak digunakan untuk:

- Komponen kapal dan peralatan laut
- Pipa dan sistem perpompaan air laut

- Katup, sambungan, dan fitting kelautan
- Struktur pelindung di pelabuhan dan fasilitas pesisir

Ketahanan Monel terhadap korosi celah, korosi sumuran, dan korosi galvanik menjadikannya pilihan yang unggul dibandingkan baja karbon atau baja tahan karat dalam lingkungan laut ekstrem.

Penggunaan lapisan Monel pada aluminium memungkinkan terciptanya komponen yang:

- Lebih ringan
- Lebih tahan korosi
- Lebih hemat biaya dibanding Monel pejal

B. Pemanfaatan dalam Industri Minyak, Gas, dan Petrokimia

Industri minyak dan gas beroperasi dalam kondisi ekstrem, seperti:

- Suhu tinggi
- Tekanan tinggi
- Lingkungan kimia agresif
- Paparan gas korosif seperti H_2S dan CO_2

Lapisan Monel digunakan pada:

- Peralatan pengeboran
- Sistem perpipaan fluida korosif
- Katup tekanan tinggi
- Heat exchanger dan reaktor kimia

Ketahanan Monel terhadap retak akibat korosi tegangan (*stress corrosion cracking*) dan degradasi kimia menjadikannya sangat cocok untuk industri petrokimia.

Pelapisan Monel pada aluminium dapat mengurangi bobot peralatan tanpa mengorbankan ketahanan kimia.

C. Aplikasi pada Industri Dirgantara dan Otomotif

Sektor dirgantara dan otomotif sangat mengutamakan material ringan namun kuat, guna meningkatkan efisiensi bahan bakar dan performa kendaraan. Lapisan Monel pada Al berpotensi digunakan untuk:

- Komponen struktural pesawat
- Sistem perlindungan korosi pada rangka Al
- Bagian mesin dan komponen panas
- Kendaraan listrik dan mobil performa tinggi

Keunggulan utama sistem ini meliputi:

- Rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi
- Ketahanan aus dan korosi
- Umur pakai lebih panjang
- Efisiensi energi dan biaya perawatan lebih rendah

D. Aplikasi dalam Industri Elektronik dan Sensor

Paduan Monel memiliki sifat elektrik dan magnetik yang dapat dikontrol, sehingga berpotensi digunakan dalam:

- Sensor magnetik
- Perangkat aktuator
- Komponen elektronik presisi
- Pelindung elektromagnetik (*EMI shielding*)

Lapisan Monel dapat direkayasa untuk menghasilkan:

- Respons magnetik tertentu
- Konduktivitas listrik yang stabil
- Ketahanan terhadap degradasi lingkungan

Hal ini membuka peluang pemanfaatan dalam *Internet of Things* (IoT), robotika, serta perangkat elektronik generasi baru.

E. Peran dalam Teknologi Energi dan Elektrokimia

Lapisan Monel juga memiliki potensi dalam bidang energi dan elektrokimia, khususnya dalam:

- Elektroliser air untuk produksi hidrogen
- Elektrokatalis reaksi evolusi hidrogen (HER)
- Sel bahan bakar (*fuel cell*)
- Superkapasitor dan baterai

Ketahanan elektrokimia Monel memungkinkan penggunaannya dalam lingkungan reaktif, sementara substrat aluminium membantu mengurangi bobot dan biaya produksi.

Inovasi dalam bidang ini mendukung transisi menuju energi bersih dan teknologi ramah lingkungan.

F. Inovasi Teknologi dalam Elektrodeposisi Lapisan Monel

Teknologi elektrodeposisi terus berkembang dengan pendekatan inovatif, antara lain:

1. Elektrodeposisi Presisi Tinggi

Penggunaan sistem kontrol digital untuk mengatur:

- a. Rapat arus
- b. Tegangan
- c. Suhu
- d. pH
- e. Komposisi larutan

Teknologi ini memungkinkan produksi lapisan dengan ketebalan seragam dan struktur mikro terkendali.

2. Elektrodeposisi Berbasis Nano
Pengembangan lapisan nano-terstruktur untuk meningkatkan:
 - a. Kekerasan
 - b. Ketahanan aus
 - c. Aktivitas katalitik
 - d. Respons magnetik
3. Elektrodeposisi Ramah Lingkungan
Inovasi menuju:
 - a. Elektrolit rendah toksisitas
 - b. Pengurangan limbah kimia
 - c. Efisiensi energi lebih tinggi
 - d. Proses daur ulang logam

G. Integrasi dengan Manufaktur Cerdas (*Smart Manufacturing*)

Teknologi pelapisan modern semakin terintegrasi dengan:

1. Otomatisasi industri
2. Sensor pemantauan real-time
3. Kecerdasan buatan (AI)
4. *Internet of Things* (IoT)

Integrasi ini memungkinkan:

1. Kontrol kualitas otomatis
2. Prediksi kegagalan material
3. Optimasi parameter produksi
4. Efisiensi proses yang lebih tinggi

Dengan demikian, elektrodeposisi Monel dapat menjadi bagian dari ekosistem manufaktur cerdas di era Industri 4.0.

H. Tantangan dan Peluang Pengembangan Teknologi

1. Tantangan Utama
 - a. Biaya bahan baku Ni
 - b. Kompleksitas kontrol komposisi paduan
 - c. Optimasi stabilitas larutan elektrolit
 - d. Skala produksi industri
2. Peluang Masa Depan
 - a. Pengembangan paduan Monel alternatif berbiaya lebih rendah
 - b. Pelapisan multifungsi (korosi + magnetik + katalitik)
 - c. Integrasi dengan material komposit dan struktur ringan
 - d. Penerapan dalam teknologi energi terbarukan

I. Kontribusi terhadap Keberlanjutan dan Ekonomi Material

Pemanfaatan lapisan Monel pada aluminium mendukung:

- Pengurangan konsumsi logam mahal
- Efisiensi sumber daya
- Perpanjangan umur pakai komponen
- Pengurangan limbah industri

Dengan pendekatan ini, teknologi pelapisan tidak hanya meningkatkan performa material, tetapi juga

berkontribusi pada ekonomi sirkular dan keberlanjutan lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Albasre, Nur Mashitah, and Mohd Hazwan Hussin. 2021. "The Study of Electroless Ni-Cu-P Plating on Corrosion Resistance of Aluminium The Study of Electroless Ni-Cu-P Plating on Corrosion Resistance of Aluminium in 3 . 5 % NaCl." 9(March): 12–26.
- Alizadeh, Morteza, and Hamed Safaei. 2018. "Characterization of Ni-Cu Matrix, Al₂O₃ Reinforced Nano-Composite Coatings Prepared by Electrodeposition." *Applied Surface Science* 456(June): 195–203. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.06.095>.
- Basori, Basori et al. 2023. "Effect of KOH Concentration on Corrosion Behavior and Surface Morphology of Stainless Steel 316L for HHO Generator Application." *Journal of Electrochemical Science and Engineering* 13(3): 451–67.
- Basori, B., Ajiriyanto, M. K., Kriswarini, R., Hardiyanti, H., Rosyidan, C., Yudanto, S. D., ... & Susetyo, F. B. (2025). Rotating speed and magnetic pole dependency assisted on copper deposition onto aluminum alloy substrate for bacterial eradication application. *Communications in Science and Technology*, 10(1), 17-28.

- Budi, Setia et al. 2020. "Saccharin-Assisted Galvanostatic Electrodeposition of Nanocrystalline FeCo Films on a Flexible Substrate." *International Journal of Electrochemical Science* 15: 6682–94.
- Callister, William D., and David G. Rethwisch. 2014. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 9th ed. eds. Daniel Sayfe, James Metzger, and MaryAnn Price. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Durmus, Yasin Emre et al. 2019. "Influence of Al Alloying on the Electrochemical Behavior of Zn Electrodes for Zn–Air Batteries With Neutral Sodium Chloride Electrolyte." *Frontiers in Chemistry* 7(November): 1–13.
- Evans, R. F.L. et al. 2014. "Atomistic Spin Model Simulations of Magnetic Nanomaterials." *Journal of Physics Condensed Matter* 26(10).
- Fukunaka, Y., H. Doi, and Y. Kondo. 1990. "Structural Variation of Electrodeposited Copper Film with the Addition of an Excess Amount of H₂ SO₄." *Journal of The Electrochemical Society* 137(1): 88–93.
- Ganesan, Muthusankar et al. 2021. "Post-Supercritical CO₂ Electrodeposition Approach for Ni-Cu Alloy Fabrication: An Innovative Eco-Friendly Strategy for High-Performance Corrosion Resistance with Durability." *Applied Surface Science* (November).

- Geramipour, F., S. M. Mousavi Khoei, and H. Shooshtari Gughtapeh. 2021. "Effect of Shaped Waveform on Structure and Electrochemical Corrosion Behavior of Pulse Electrodeposited Ni[Sbnd]Cu Alloy Coatings." *Surface and Coatings Technology* 424(August).
- Di Gianfrancesco, Augusto. 2017. *Materials for Ultra-Supercritical and Advanced Ultra-Supercritical Power Plants Technologies for Chemical Analyses, Microstructural and Inspection Investigations*. Rome: Elsevier Ltd.
- Goranova, D., R. Rashkov, G. Avdeev, and V. Tonchev. 2016. "Electrodeposition of Ni–Cu Alloys at High Current Densities: Details of the Elements Distribution." *Journal of Materials Science* 51(18): 8663–73.
- Goranova, Desislava, Georgi Avdeev, and Rashko Rashkov. 2014. "Electrodeposition and Characterization of Ni-Cu Alloys." *Surface and Coatings Technology* 240: 204–10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.12.014>.
- Goyal, Bindu et al. 2018. "Electroplating of Nickel and Chromium on Aluminum 6082-T6 Alloy." (February 2018).
- Grimshaw, Pengpeng, Joseph M. Calo, and George Hradil. 2011. "III. Co-Electrodeposition/Removal of Copper and Nickel in a Spouted Electrochemical

- Reactor." *Industrial and Engineering Chemistry Research* 50(16): 9532–38.
- Hamidah, Ida et al. 2021. "Corrosion of Copper Alloys in KOH, NaOH, NaCl, and HCl Electrolyte Solutions and Its Impact to the Mechanical Properties." *Alexandria Engineering Journal* 60(2): 2235–43.
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.12.027>.
- Handayani, Ade Silvia et al. 2020. "Pemanfaatan Aplikasi Simulasi Rangkaian Listrik Sebagai Media Pembelajaran Fisika." *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*.
- Huang, You guo et al. 2016. "The Effect of Graphene for the Hydrogen Evolution Reaction in Alkaline Medium." *International Journal of Hydrogen Energy* 41(6): 3786–93.
- Karunakaran, M., M. Pugazhvadivu, V. Gunasegaran, and G. Gowtham. 2018. "Electrodeposition of Cu-Ni-P-W Composite on Al-6063 Substrate." *International Journal of Scientific Research in Physics and Applied Sciences*.
- Korchef, Atef, and Abdelkrim Kahoul. 2013. "Corrosion Behavior of Commercial Aluminum Alloy Processed by Equal Channel Angular Pressing." *International Journal of Corrosion*.
- Lee, Wen His, and K. C. Chung. 2020. "Investigation of a Copper–Nickel Alloy Resistor Using Co-Electrodeposition." *Journal of Applied Electrochemistry* 50(5): 535–47.

- Li, Baosong, Tianyong Mei, Dandan Li, Shengsong Du, et al. 2019. "Structural and Corrosion Behavior of Ni-Cu and Ni-Cu/ZrO₂ Composite Coating Electrodeposited from Sulphate-Citrate Bath at Low Cu Concentration with Additives." *Journal of Alloys and Compounds* 804: 192–201. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.381>.
- Lotfi, N., T. Shahrabi, Y. Yaghoubinezhad, and Gh Barati Darband. 2019. "Surface Modification of Ni Foam by the Dendrite Ni-Cu Electrode for Hydrogen Evolution Reaction in an Alkaline Solution." *Journal of Electroanalytical Chemistry* 848.
- Mae, Yoshiharu. 2016. "What the Darken–Gurry Plot Means About the Solubility of Elements in Metals." *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science* 47(12): 6498–6506.
- Mahallawy, N. A. El, M. A. Shoeib, and M. H. Abouelenain. 2011. "AZ91 Magnesium Alloys: Anodizing of Using Environmental Friendly Electrolytes." *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology* 01(02): 62–72.
- Mahmood, Javeed et al. 2017. "An Efficient and PH-Universal Ruthenium-Based Catalyst for the Hydrogen Evolution Reaction." *Nature Nanotechnology* 12(5): 441–46. <http://dx.doi.org/10.1038/nnano.2016.304>.

- Marrone, Pierpaolo. 2013. 15 Etica e Politica Chambers, RT.
- Mohamad, W. M. F. W., Tamaldin, N., Mansor, M. R., Ajiriyanto, M. K., Nugroho, A., Kriswarini, R., ... & Susetyo, F. B. (2025). Investigation Of Alkaline Solution Temperature Increment Influence Onto SS316L Surface. 淡江理工學刊, 28(10), 2177-2186.
- Nady, H., and M. Negem. 2016. "Ni-Cu Nano-Crystalline Alloys for Efficient Electrochemical Hydrogen Production in Acid Water." RSC Advances 6(56): 51111–19.
- Nath, Prekshya, Deepak Kumar Sahu, and Archana Mallik. 2016. "Physicochemical and Corrosion Properties of Sono-Electrodeposited Cu-Ni Thin Films." Surface and Coatings Technology 307: 772–80. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.09.085>.
- Newbury, Dale E., and Nicholas W.M. Ritchie. 2019. "Electron-Excited X-Ray Microanalysis by Energy Dispersive Spectrometry at 50: Analytical Accuracy, Precision, Trace Sensitivity, and Quantitative Compositional Mapping." Microscopy and Microanalysis.
- Pellicer, Eva et al. 2010. "983-991 Nanocrystalline Electroplated Cu-Ni: Metallic Thin Films with Enhanced Mechanical Properties and Tunable Magnetic Behavior." Advanced Functional Materials 20(6): 983–91.

- Pingale, Ajay D. et al. 2021. "Recent Researches on Cu-Ni Alloy Matrix Composites through Electrodeposition and Powder Metallurgy Methods: A Review." *Materials Today: Proceedings* 47: 3301–8.
- Pingale, Ajay D., Sachin U. Belgamwar, and Jitendra S. Rathore. 2020. "Effect of Graphene Nanoplatelets Addition on the Mechanical, Tribological and Corrosion Properties of Cu–Ni/Gr Nanocomposite Coatings by Electro-Co-Deposition Method." *Transactions of the Indian Institute of Metals* 73(1): 99–107. <https://doi.org/10.1007/s12666-019-01807-9>.
- Pingale, Ajay D., Sachin U. Belgamwar, and Jitendra S. Rathore. 2020. "Synthesis and Characterization of Cu–Ni/Gr Nanocomposite Coatings by Electro-Co-Deposition Method: Effect of Current Density." *Bulletin of Materials Science* 43(1): 1–9. <https://doi.org/10.1007/s12034-019-2031-x>.
- Pranjono, Torowati, Banawa Sri Galuh, and Lilis Windaryati. 2015. "Pengukuran Kekasaran Permukaan Pelet UO₂ Menggunakan Alat Roughness Tester Surtronic 25."
- Putra, Valentinus Galih Vidia, Endah Purnomosari, and Ngadiyono. 2019. *Pengantar Praktikum Mekatronika Tekstil Pengantar Praktikum Mekatronika Tekstil*.

- Rees, William S. 1995. "Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings: Science, Technology and Applications, 2nd Edition: Edited By Rointan F. Bunshah, Noyes, Park Ridge, NJ, 1994, XXVI, 861 Pp., Hardcover, \$ 98.00, ISBN 0-81 55-13372." *Advanced Materials* 7(1): 96–96.
- Rosyidan, C., Kurniawan, B., Soegijono, B., Maulani, M., Samura, L., Nababan, F. G., ... & Susetyo, F. B. (2024). Nickel Salt Dependency as Catalyst in the Plating Bath on the Film Properties of Cu/Cu-Ni. *Science and Technology Indonesia*, 9(3), 529-538.
- Rosyidan, C., Kurniawan, B., Soegijono, B., Vidia, P. V., Munazat, D. R., & Susetyo, F. B. (2024). Effect of current density on magnetic and hardness properties of Ni-Cu alloy coated on Al via electrodeposition.
- Rwawiire, Samson. 2014. "Prediction of Polyester/Cotton Ring Spun Yarn Unevenness Using Adaptive Neuro Fuzzy Inference System." *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management* 8(4).
- Samura, L., Maulani, M., & Rosyidan, C. BUKU PEDOMAN PEMBELAJARAN INTEGRAL FUNGSI SATU VARIABEL DAN PENERAPANNYA.
- Sarac, Umut, and M. Celalettin Baykul. 2013. "Morphological and Microstructural Properties of Two-Phase Ni-Cu Films Electrodeposited at Different Electrolyte

- Temperatures." *Journal of Alloys and Compounds*.
- Sarac, Umut, and M. Celalettin Baykul. 2014. "Microstructural and Morphological Characterizations of Nanocrystalline Ni-Cu-Fe Thin Films Electrodeposited from Electrolytes with Different Fe Ion Concentrations." *Journal of Materials Science*:
- Susetyo, F. B., B. Soegijono, and Yusmaniar. 2021. "Effect of a Constant Magnet Position and Intensity on a Copper Layer Obtained by DC Electrodeposition." *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition* 10(2): 766–82.
- Syamsuir, S et al. 2023. "Electrolyte Temperature Dependency of Electrodeposited Nickel in Sulfate Solution on the Hardness and Corrosion Behaviors." 36(06): 1193–1200.
- Syamsuir, S., Susetyo, F. B., Soegijono, B., Yudanto, S. D., Basori, B., Ajiriyanto, M. K., ... & Rosyidan, C. (2023). Rotating-Magnetic-Field-Assisted Electrodeposition of Copper for Ambulance Medical Equipment. *Automotive Experiences*, 6(2), 290-302.
- Tang, Xue Ti, Gwo Ching Wang, and Mutsuhiro Shima. 2007. "Magnetic Layer Thickness Dependence of Magnetization Reversal in Electrodeposited CoNi/Cu Multilayer Nanowires." *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 309(2): 188–96.

- Wang, Chao, Md Emran Hossain Bhuiyan, Salvador Moreno, and Majid Minary-Jolandan. 2020. "Direct-Write Printing Copper-Nickel (Cu/Ni) Alloy with Controlled Composition from a Single Electrolyte Using Co-Electrodeposition." *ACS Applied Materials and Interfaces* 12(16): 18683–91.
- Wang, Dan et al. 2014. "Corrosion Control of Copper in 3.5 Wt.% NaCl Solution by Domperidone: Experimental and Theoretical Study." *Corrosion Science* 85: 77–86.
- Wang, T., and W. Chen. 2015. "Effects of Rotating Magnetic Fields on Nickel Electro-Deposition." *ECS Electrochemistry Letters* 4(6): D14–17.
- Zhang, Yong et al. 2014. "Microstructures and Properties of High-Entropy Alloys." *Progress in Materials Science* 61(October 2013): 1–93. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.10.001>.

BIOGRAFI PENULIS

1. Dr. Cahaya Rosyidan, S.Si., M.Sc.



Penulis dilahirkan di Semarang, 23 Januari 1986. Menempuh pendidikan Sarjana (S1) di Jurusan Fisika, Universitas Negeri Semarang (UNNES) pada tahun 2009, Magister Fisika di Universitas Gadjah Mada Tahun 2012, dan Doktor di Universitas Indonesia 2024 pada program studi Ilmu Bahan. Sejak tahun 2013, beliau aktif sebagai dosen pada Program Studi Teknik Perminyakan, Fakultas Teknologi Kebumihan dan Energi (FTKE), Universitas Trisakti, dengan fokus pada pengembangan pendidikan, penelitian, dan penguatan kapasitas akademik di bidang material terapan.

Di tingkat institusional, saat ini menjabat sebagai Kepala Pusat Publikasi dan Karya Ilmiah LPPM Universitas Trisakti, dan Ketua Jaminan Mutu Fakultas Universitas Trisakti. Rekam jejak pendanaan riset meliputi perolehan satu Hibah Buku Ajar dari Kemenristekdikti (2018), dan penelitian BIMA (2024–2025) baik sebagai anggota maupun menjadi ketua. Hingga kini, telah menghasilkan buku ajar di bidang matematika dan buku monograf, serta berperan sebagai Chief Editor Jurnal PETRO: Jurnal Ilmiah Teknik Perminyakan SINTA 4. Selain itu pada tahun 2026 menghasilkan paten sederhana (granted).

2. Dr. Budhy Kurniawan



Penulis dilahirkan pada 16 Juli 1968. Menyelesaikan pendidikan Sarjana (S1) di Jurusan Fisika, Universitas Indonesia (UI) pada tahun 1992. Pada tahun 1995 menyelesaikan pendidikan Magister (S2) pada Program Studi Fisika di Universitas Indonesia (UI). Menyelesaikan program Doktor di Tokyo Institute of Technology pada tahun 2000. Beliau aktif sebagai dosen pada Program Studi S2 & S3 Ilmu Bahan, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA), Universitas Indonesia. Bidang keahlian beliau Fisika Zat Terkondensasi (Eksperimental) dan Bidang Riset Terkini: Kajian sifat listrik dan magnetik material fungsional berbasis senyawa manganit lantanum .

Selain mengajar beliau juga banyak menghasilkan karya tulis, sebanyak 127 artikel telah dipublikasikan dengan disitasi lebih dari 1000 kali. Beberapa penghargaan juga diperoleh diantaranya : *Referee for Hidrogen Energy Journal, Referee for Progress in Organic Coatings, Referee for Arabian Journal of Chemistry, Referee for Koren Magnetic Society, Referee for International Journal of Nano and Biomaterials, Referee for Key Engineering Materials, Referee for Materials Sciene and Engineering B, Referee for Ceramics International, Referee for Materials Express, Referee for South African Journal of Chemical Engnnering, Referee for Atmospheric Pollution Research.*

3. Prof. Dr. Bambang Soegijono



Penulis lahir tahun 1956. Pendidikan Sarjana Fisika dan Magister Ilmu Material di Universitas Indonesia, serta Doktoral di Ecole Centrale de Lyon Perancis, lulus tahun 1992.

Kariernya dimulai sejak tahun 1982, sebagai pegawai negeri sipil di departemen Fisika Universitas Indonesia. Selain sebagai PNS, terlibat di berbagai kegiatan konsultan Pendidikan sampai tahun 1986. Tahun 1995 sampai 2002, sebagai ketua Departemen Fisika, Tahun 2002-2007 terlibat sebagai anggota Majelis Wali Amanat Universitas Indonesia. Tahun 2023, sebagai Dekan Fakultas Sains dan Teknik Informatik di Institut Sains dan Teknologi (ISTN)

Saat ini, selain memegang structural di ISTN, juga terlibat di perusahaan pengolahan air limbah. Artificial Intellengence sebagai salah satu kegiatan pembelajaran yang ditekuni sampai hari tua.

Bambang Soegijono menikah tahun 1992 dan mempunyai 2 orang putra dan putri yang sudah menjadi dokter. Hobinya berburu ilmu pengetahuan dan teknologi serta Science fiction

4. Dr. Ferry Budhi Susetyo, MT., M.Si



Penulis dilahirkan di Jakarta pada 2 Februari 1982. Berpengalaman mengajar di Fakultas Teknik Universitas Negeri Jakarta dari Tahun 2011 sampai dengan saat ini. Pendidikan yang pernah di tempuh, menamatkan Pendidikan Sarjana Teknik di Universitas Lampung Tahun 2005, Magister Teknik di Universitas Pancasila Tahun 2008, Magister Sains di Universitas Indonesia Tahun 2010 dan Doktor di Universitas Indonesia 2021. Pernah bekerja di PT. Selamat Sempurna Tbk Tahun 2006-2008 sebagai Staf Engineering Process dan PT. National Energy Solutions Tahun 2009-2011 sebagai Corrosion Engineering. Saat ini Penulis fokus meneliti bidang Welding dan Material Engineering.

5. Dra. Lisa Samura, MT



Penulis menyelesaikan pendidikan Sarjana (S1) di Jurusan Matematika, Institut Teknologi Bandung (ITB) pada tahun 1991. Pada tahun 2024 menyelesaikan pendidikan Magister (S2) pada Program Studi Teknik Industri. Beliau aktif sebagai dosen pada Program Studi Teknik Perminyakan, Fakultas Teknologi Kebumihan dan Energi (FTKE), Universitas Trisakti, dengan fokus pada pengembangan pendidikan, penelitian, dan penguatan kapasitas akademik di bidang matematika terapan dan rekayasa industri dalam konteks energi dan kebumihan.

Pada tahun 2018 memperoleh Hibah Buku Ajar dan Pedoman Kemenristekdikti dan hibah penelitian BIMA pada tahun 2024-2025. Beliau telah menghasilkan dua buku ajar Integral Fungsi Satu Variabel dan Integral Dalam Ruang Dimensi 2&3 serta dua buku monograf : Persamaan Diferensial Biasa Orde n dan Sistem Persamaan Linier dengan n Variabel.

6. Dra. Mustamina Maulani, MT



Penulis menempuh pendidikan Sarjana (S1) di Jurusan Matematika, Institut Teknologi Bandung (ITB) pada tahun 1986 dan melanjutkan pendidikan Magister (S2) pada Program Studi Teknik Industri, Universitas Trisakti, yang diselesaikan pada tahun 2003. Sejak tahun 2016, beliau aktif sebagai dosen pada Program Studi Teknik Perminyakan, Fakultas Teknologi Kebumihan dan Energi (FTKE), Universitas Trisakti, dengan fokus pada pengembangan pendidikan, penelitian, dan penguatan kapasitas akademik di bidang matematika terapan dan rekayasa industri dalam konteks energi dan kebumihan.

Di tingkat institusional, saat ini menjabat sebagai Kepala Pusat Pendidikan dan Sarana Prasarana LPPM Universitas Trisakti, Wakil Direktur Badan Afiliasi Universitas Trisakti, serta Ketua Promosi FTKE Universitas Trisakti. Rekam jejak pendanaan riset dan pengabdian meliputi perolehan dua Hibah Buku Ajar dari Kemenristekdikti (2018), keikutsertaan dalam Hibah Konsorsium Riset dan Inovasi (2020, Tahap I dan II), serta Hibah Pengabdian kepada Masyarakat (PkM) MBKM (2022) serta hibah PkM dan penelitian BIMA (2023–2025). Hingga kini, buku yang dihasilkan

empat buku ajar di bidang matematika dan dua buku monograf, serta berperan sebagai Chief Editor Jurnal Penelitian dan Karya Ilmiah LPPM Universitas Trisakti.

7. Larasati Rizky Putri, S.Pd, M.Pd.



Penulis merupakan Dosen, penulis, dan peneliti bidang sains, pendidikan fisika dan instrumentasi fisika di bidang Teknik Mesin. Penulis kelahiran Tangerang (1992). Meraih gelar sarjana (S.Pd.) dari Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Jurusan Pendidikan Fisika, Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. Hamka (2014). Melanjutkan studi magister (M.Pd.) di Universitas Negeri Jakarta, Jurusan Pendidikan Fisika (2020). Sejak tahun 2016 penulis aktif sebagai Dosen Fisika Teknik di Universitas Muhammadiyah Tangerang dan Dosen Pendidikan diantaranya mata kuliah Strategi Pembelajaran IPA, Konsep Dasar IPA dan Keterampilan Menulis di Universitas Terbuka (2024). Penulis berperan aktif dalam kegiatan kuliah umum, seminar, memberikan pelatihan pembelajaran dan inovasi teknologi pendidikan fisika kepada Masyarakat. Penulis berhasil memperoleh juara pada lomba inovasi IT dalam kegiatan pendidikan dan pengajaran (Juara 2) dan aktif menulis buku, modul dan artikel penelitian di bidang teknologi dan sains, serta telah melahirkan hak kekayaan intelektual berupa Modul Pembelajaran Praktikum Fisika Gerak Harmonik Sederhana Berbasis Aplikasi *Phyphox* dan Modul Percobaan Fisika: Roket Air, baik cetak maupun digital.

Saat ini, penulis bekerja sebagai Dosen tetap di Jurusan Teknik Mesin, Universitas Trisakti Jakarta dan diamanahkan sebagai Koordinator Laboratorium Fisika di Fakultas Teknologi Industri. Penulis mengampu beberapa mata kuliah di bidang Fisika Teknik yang diantaranya, Fisika Mekanika, Fisika Panas, Fisika Listrik dan Magnet, Fisika Gelombang Bunyi Optik dan Praktikum Fisika Teknik. Penulis telah terlibat dalam pembuatan buku referensi Fisika Mekanika dan buku ajar Perpindahan Panas yang diterbitkan pada tahun 2023 bersama rekan dosen Fisika di Universitas Trisakti.

8. Dr. Kartika Fajarwati Hartono, ST., MT



Penulis menempuh pendidikan Sarjana (S1) di Jurusan Teknik Kimia, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) pada tahun 2006 dan melanjutkan pendidikan Magister (S2) pada Program Studi Teknik Perminyakan, Institut Teknologi Bandung (ITB) sebagai penerima *Total E&P Scholarship*, yang diselesaikan pada tahun 2012 yang kemudian sempat bekerja di dunia Industri multinasional Oil and Gas PT. Chevron Pacific Indonesia di Duri, Riau. Tahun 2015, penulis aktif sebagai dosen tetap pada Program Studi Teknik Perminyakan, Fakultas Teknologi Kebumihan dan Energi (FTKE), Universitas Trisakti. Pada tahun 2019, beliau melanjutkan studi Doktorat di Program Studi Teknik Perminyakan Institut Teknologi Bandung (ITB) dengan konsentrasi riset pada bidang *Enhanced Oil Recovery (EOR)* – Teknik Reservoir dan lulus pada tahun 2024. Saat ini, penulis aktif di Dewan Riset dan Pengabdian Masyarakat sebagai Kepala Pelaksana Harian Fakultas.

BIOGRAFI EDITOR

Fahmi Rizal, S.Si., M.Biomed



Editor merupakan dosen dan akademisi di bidang kimia dan biomedik dengan latar belakang keilmuan dalam Kimia FMIPA dan Ilmu Biomedik (Kimia Klinik) dari Universitas Hasanuddin. Ia lahir di Maros pada 27 Maret 1989 dan memiliki pengalaman luas dalam pendidikan tinggi, penelitian, serta penulisan ilmiah.

Saat ini, editor aktif sebagai dosen di Jurusan D3 keperawatan Fakultas Kedokteran dan Ilmu Kesehatan dan pernah aktif juga sebagai dosen di Jurusan Kimia Fakultas Teknik serta Program studi Kedokteran Universitas Bangka Belitung. Pengalaman profesionalnya mencakup peran sebagai asisten laboratorium Kimia Dasar dan Kimia Anorganik di Universitas Hasanuddin, serta keterlibatan di sektor industri.

Sebagai editor ilmiah, memiliki kompetensi dalam pengolahan data kualitatif dan kuantitatif, penulisan karya ilmiah, serta penguasaan perangkat lunak pendukung seperti Microsoft Office dan SPSS. Dengan pengalaman organisasi yang kuat dan dedikasi terhadap mutu akademik, editor berkomitmen mendukung kualitas naskah ilmiah, buku akademik, dan publikasi penelitian.

SINOPSIS

Buku monograf ini menyajikan pembahasan komprehensif mengenai paduan Ni–Cu (Monel) dan penerapannya dalam teknologi elektrodeposisi pada substrat aluminium sebagai solusi inovatif dalam rekayasa material modern. Disusun secara sistematis, buku ini mengintegrasikan teori dasar ilmu material, mekanisme elektrokimia, metode sintesis, teknik karakterisasi, serta evaluasi sifat fungsional material.

Pembahasan diawali dengan pengantar tentang peran strategis Monel dalam industri dan keterbatasannya sebagai material pejal, diikuti dengan uraian sifat aluminium, Ni, dan Cu dari perspektif struktur kristal, magnetik, dan elektrokimia. Buku ini kemudian menjelaskan teori dan mekanisme elektrodeposisi, termasuk hukum Faraday, transport ion, nukleasi, dan pertumbuhan lapisan, yang menjadi dasar dalam pembentukan lapisan paduan berkualitas tinggi.

Proses sintesis lapisan Monel dijelaskan secara rinci, mencakup preparasi substrat, komposisi elektrolit, parameter deposisi, serta prosedur eksperimental. Teknik karakterisasi seperti *X-ray Diffraction* (XRD), *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS), dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) digunakan untuk menganalisis struktur kristal, komposisi, morfologi, dan ketebalan lapisan.

Selanjutnya, buku ini mengulas sifat mekanik, magnetik, dan elektrokimia lapisan Monel, termasuk ketahanan korosi dan kinerja elektrokimia. Sebagai

penutup, buku ini membahas aplikasi industri dan inovasi teknologi, mulai dari sektor maritim hingga energi dan manufaktur cerdas. Buku ini ditujukan sebagai referensi ilmiah bagi akademisi, peneliti, dan praktisi industri yang tertarik pada rekayasa material dan teknologi pelapisan modern.

Buku monograf ini menyajikan pembahasan komprehensif mengenai paduan nikel-tembaga (Monel) dan penerapannya dalam teknologi elektrodeposisi pada substrat aluminium sebagai solusi inovatif dalam rekayasa material modern.

Disusun secara sistematis, buku ini mengintegrasikan teori dasar ilmu material, mekanisme elektrokimia, metode sintesis, teknik karakterisasi, serta evaluasi sifat fungsional material.

Pembahasan diawali dengan pengantar tentang peran strategis Monel dalam industri dan keterbatasannya sebagai material pejal, diikuti dengan uraian sifat aluminium, nikel, dan tembaga dari perspektif struktur kristal, magnetik, dan elektrokimia. Buku ini kemudian menjelaskan teori dan mekanisme elektrodeposisi, termasuk hukum Faraday, transport ion, nukleasi, dan pertumbuhan lapisan, yang menjadi dasar dalam pembentukan lapisan paduan berkualitas tinggi.

Proses sintesis lapisan Monel dijelaskan secara rinci, mencakup preparasi substrat, komposisi elektrolit, parameter deposisi, serta prosedur eksperimental. Teknik karakterisasi seperti X-ray Diffraction (XRD), Energy Dispersive Spectroscopy (EDS), dan Scanning Electron Microscopy (SEM) digunakan untuk menganalisis struktur kristal, komposisi, morfologi, dan ketebalan lapisan.

Selanjutnya, buku ini mengulas sifat mekanik, magnetik, dan elektrokimia lapisan Monel, termasuk ketahanan korosi dan kinerja elektrokimia. Sebagai penutup, buku ini membahas aplikasi industri dan inovasi teknologi, mulai dari sektor maritim hingga energi dan manufaktur cerdas. Buku ini ditujukan sebagai referensi ilmiah bagi akademisi, peneliti, dan praktisi industri yang tertarik pada rekayasa material dan teknologi pelapisan modern.



Penerbit PT Mustika Sri Rosadi

SERTIFIKAT

No: 007/Penulis-Buku/MARS/II/2026

Diberikan Kepada

Larasati Rizky Putri

Sebagai Penulis Buku "ELEKTRODEPOSISI PADUAN MONEL PADA ALUMINIUM: PROSES, KARAKTERISASI, DAN

APLIKASI MATERIAL FUNGSIONAL"

ISBN: 978-634-7535-64-1 (PDF)

Bogor, 09 Februari 2026

Nina Sri, S.ST., M. Kes
Direktur

SURAT PENGALIHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini :

N a m a : Larasati Rizky Putri

Alamat : Jl. Saman III No. 52 RT. 02/07, Kel. Gaga, Kec. Larangan, Kota Tangerang, Banten

Adalah **Pihak I** selaku pencipta, dengan ini menyerahkan karya ciptaan saya kepada :

N a m a : PT. Mustika Sri Rosadi

Alamat : Citra Indah City, Bukit Heliconia AG 23/32 RT. 003 RW. 012 Kelurahan Singajaya, Kecamatan Jonggol, Kabupaten Bogor, Provinsi Jawa Barat.

Adalah **Pihak II** selaku Pemegang Hak Cipta berupa **Karya Tulis**: Elektrodeposisi Paduan Monel pada Aluminium: Proses, Karakterisasi, dan Aplikasi Material Fungsional untuk didaftarkan di Direktorat Hak Cipta dan Desain Industri, Direktorat Jenderal Kekayaan Intelektual, Kementerian Hukum dan Hak Asasi Manusia Republik Indonesia.

Demikianlah surat pengalihan hak ini kami buat, agar dapat dipergunakan sebagaimana mestinya.

Jakarta, 27 Februari 2026
Pencipta



Larasati Rizky Putri

Catatan: Khusus penulis pertama menandatangani diatas meterai



Hasil Pencarian

[Semua Filter](#)[Elektrodepos](#)[⊗ Hapus Semua Filter](#)[Pencarian Lanjut](#) Show entries

Judul	Jenis Media	Kepengarangan	Pe
Elektrodeposisi paduan monel pada aluminium : proses, karakterisasi, dan aplikasi material fungsional	cetak	Cahaya Rosyidan, Budhy Kurniawan, Bambang Soegijono, Ferry Budhi Susetyo, Lisa Samura [dan 3 lainnya] ; editor, Fahmi Rizal	PT. I Sri F
Elektrodeposisi paduan monel pada aluminium : proses, karakterisasi, dan aplikasi material fungsional	digital pdf	penulis, Cahaya Rosyidan, Budhy Kurniawan, Bambang Soegijono, Ferry Budhi Susetyo, Lisa Samura [dan 3 lainnya] ; editor, Fahmi Rizal	PT. I Sri F



Top 7 Penerbit

PT. Mustika Sri Rosadi

2

Top 7 Kota, Penerbit Terbanyak

Kabupaten Bogor

2



ISBN

PERPUSTAKAAN NASIONAL REPUBLIK INDONESIA Pusat Bibliografi
dan Pengolahan Bahan Perpustakaan

Jl. Salemba Raya 28A Daerah khusus Ibukota Jakarta 10430 –
Indonesia

Tim ISBN/KDT ©2024.



diayani setiap hari kerja
pada:

Senin-Jumat

Pukul 08.00-15.30 WIB

isbn@mail.perpusnas.go.id

<https://lapor.go.id>

<https://isbn.perpusnas.go.id>

Layanan konsultasi ISBN dan
KDT secara onsite tersedia
pada:

Senin-Kamis

Pukul 08.00-15.30 WIB

Link Terkait

Perpusnas RI

Pusbiola

DDPKP

Bibliografi Nasional

Indonesia (BNI)

E-Deposit

SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini, pemegang hak cipta:

N a m a : Larasati Rizky Putri
Kewarganegaraan : **Indonesia**
Alamat : Jl. Saman III No. 52 RT. 02/07, Kel. Gaga, Kec. Larangan, Kota Tangerang, Banten

Dengan ini menyatakan bahwa:

1. Karya Cipta yang saya mohonkan:
Berupa : **Karya Tulis**
Berjudul : Elektrodeposisi Paduan Monel pada Aluminium: Proses, Karakterisasi, dan Aplikasi Material Fungsional

Tidak meniru dan tidak sama secara esensial dengan Karya Cipta milik pihak lain atau obyek kekayaan intelektual lainnya sebagaimana dimaksud dalam Pasal 68 ayat (2);

- Bukan merupakan Ekspresi Budaya Tradisional sebagaimana dimaksud dalam Pasal 38;
 - Bukan merupakan Ciptaan yang tidak diketahui penciptanya sebagaimana dimaksud dalam Pasal 39;
 - Bukan merupakan hasil karya yang tidak dilindungi Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 41 dan 42;
 - Bukan merupakan Ciptaan seni lukis yang berupa logo atau tanda pembeda yang digunakan sebagai merek dalam perdagangan barang/jasa atau digunakan sebagai lambang organisasi, badan usaha, atau badan hukum sebagaimana dimaksud dalam Pasal 65 dan;
 - Bukan merupakan Ciptaan yang melanggar norma agama, norma susila, ketertiban umum, pertahanan dan keamanan negara atau melanggar peraturan perundang-undangan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 74 ayat (1) huruf d Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta.
2. Sebagai pemohon mempunyai kewajiban untuk menyimpan asli contoh ciptaan yang dimohonkan dan harus memberikan apabila dibutuhkan untuk kepentingan penyelesaian sengketa perdata maupun pidana sesuai dengan ketentuan perundang-undangan.
 3. Karya Cipta yang saya mohonkan pada Angka 1 tersebut di atas tidak pernah dan tidak sedang dalam sengketa pidana dan/atau perdata di Pengadilan.
 4. Dalam hal ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Angka 1 dan Angka 3 tersebut di atas saya / kami langgar, maka saya / kami bersedia secara sukarela bahwa:
 - a. permohonan karya cipta yang saya ajukan dianggap ditarik kembali; atau
 - b. Karya Cipta yang telah terdaftar dalam Daftar Umum Ciptaan Direktorat Hak Cipta, Direktorat Jenderal Hak Kekayaan Intelektual, Kementerian Hukum Dan Hak Asasi Manusia R.I dihapuskan sesuai dengan ketentuan perundang-undangan yang berlaku.
 - c. Dalam hal kepemilikan Hak Cipta yang dimohonkan secara elektronik sedang dalam berperkara dan/atau sedang dalam gugatan di Pengadilan maka status kepemilikan surat pencatatan elektronik tersebut ditangguhkan menunggu putusan Pengadilan yang berkekuatan hukum tetap.

Demikian Surat pernyataan ini saya/kami buat dengan sebenarnya dan untuk dipergunakan sebagaimana mestinya.

Jakarta, 27 Februari 2026



Larasati Rizky Putri
Pemegang Hak Cipta

Catatan: Seluruh penulis menandatangani diatas meterai

Larasati Rizky FTI

ELEKTRODEPOSISI PADUAN MONEL PADA ALUMINIUM: PROSES, KARAKTERISASI, DAN APLIKASI MATERIAL FUNGSI...

 GENAP 2025-2026 (2)

Document Details

Submission ID

trn:oid:::3618:149737329

Submission Date

Aug 28, 2026, 1:02 PM GMT+7

Download Date

Aug 28, 2026, 1:38 PM GMT+7

File Name

asli Elektrodeposisi Paduan Monel pada Aluminium-Proses, Karakterisasi, dan Aplikasi MaterialPDF

File Size

1.2 MB

110 Pages

14,901 Words

101,603 Characters

2% Overall Similarity

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

Filtered from the Report

- Bibliography
- Quoted Text
- Small Matches (less than 10 words)

Exclusions

- 12 Excluded Matches

Top Sources

- 1%  Internet sources
- 1%  Publications
- 2%  Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags

0 Integrity Flags for Review

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

Top Sources

- 1% Internet sources
- 1% Publications
- 2% Submitted works (Student Papers)

Top Sources

The sources with the highest number of matches within the submission. Overlapping sources will not be displayed.

1	Internet	sciencetechindonesia.com	<1%
2	Student papers	Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung on 2026-07-27	<1%
3	Student papers	Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung on 2026-07-23	<1%
4	Student papers	Universitas Sebelas Maret on 2026-05-21	<1%
5	Student papers	Universitas Sebelas Maret on 2026-07-01	<1%
6	Student papers	Gyeongsang National University on 2020-08-18	<1%
7	Student papers	STIFAR Semarang on 2026-04-29	<1%
8	Student papers	Universitas Islam Riau on 2026-06-17	<1%
9	Student papers	UPN Veteran Yogyakarta on 2026-05-26	<1%
10	Internet	digilib.polban.ac.id	<1%
11	Internet	www.karyailmiah.trisakti.ac.id	<1%

12	Student papers	Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung on 2026-07-28	<1%
13	Student papers	Sriwijaya University on 2019-11-26	<1%
14	Student papers	Universitas Indonesia on 2022-12-15	<1%
15	Student papers	Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung on 2026-07-20	<1%
16	Student papers	Universitas Islam Riau on 2026-04-30	<1%
17	Internet	docplayer.info	<1%
18	Internet	repositori.unibos.ac.id	<1%
19	Internet	text-id.123dok.com	<1%



ELEKTRODEPOSISI PADUAN MONEL PADA ALUMINIUM: PROSES, KARAKTERISASI, DAN APLIKASI MATERIAL FUNGSIONAL



Penulis:

- 1. Cahaya Rosyidan**
- 2. Budhy Kurniawan**
- 3. Bambang Soegijono**
- 4. Ferry Budhi Susetyo**
- 5. Lisa Samura**
- 6. Mustamina Maulani**
- 7. Larasati Rizky Putri**
- 8. Kartika Fajarwati Hartono**

Editor: Fahmi Rizal

ELEKTRODEPOSISI PADUAN MONEL PADA ALUMINIUM: PROSES, KARAKTERISASI, DAN APLIKASI MATERIAL FUNGSIONAL

Penulis:

- 1. Cahaya Rosyidan**
- 2. Budhy Kurniawan**
- 3. Bambang Soegijono**
- 4. Ferry Budhi Susetyo**
- 5. Lisa Samura**
- 6. Mustamina Maulani**
- 7. Larasati Rizky Putri**
- 8. Kartika Fajarwati Hartono**

Editor: Fahmi Rizal



PT. Mustika Sri Rosadi

ELEKTRODEPOSISI PADUAN MONEL PADA ALUMINIUM: PROSES, KARAKTERISASI, DAN APLIKASI MATERIAL FUNGSIONAL

Penulis:

Cahaya Rosyidan; Budhy Kurniawan; Bambang Soegijono; Ferry Budhi Susetyo; Lisa Samura; Mustamina Maulani; Larasati Rizky Putri; Kartika Fajarwati Hartono

Editor: Fahmi Rizal

Layout: Tim PT. Mustika Sri Rosadi

Desain Sampul: Wida Ningsih

ISBN: 978-634-7535-64-1 (PDF)

Cetakan Pertama: 09 Febuari 2026

Hak Cipta 2026

Hak Cipta Dilindungi Oleh Undang-Undang

Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

Diterbitkan oleh Penerbit Mustika Sri Rosadi

Alamat Penerbit: Citra Indah City, Bukit Heliconia AG 23/32,
Kecamatan Jonggol, Kab. Bogor.

Email: mars.mustikasrirosadi@gmail.com

PRAKATA

Aluminium merupakan material yang banyak digunakan dalam berbagai sektor industri karena sifatnya yang ringan, mudah dibentuk, dan memiliki konduktivitas yang baik. Namun demikian, keterbatasan aluminium terhadap serangan korosi, terutama pada lingkungan agresif, menjadi tantangan serius dalam penerapannya. Oleh karena itu, diperlukan suatu pendekatan rekayasa yang efektif dan berkelanjutan untuk meningkatkan ketahanan korosi aluminium tanpa mengorbankan sifat mekanik dan fungsionalnya.

Buku monograf ini membahas salah satu solusi rekayasa industri melalui penerapan lapisan Monel sebagai pelindung aluminium dari korosi. Buku monograf dikembangkan dari penelitian. Beberapa penelitian ini diantaranya dengan judul :

1. Effect of Current Density on Magnetic and Hardness Properties of Ni-Cu Alloy Coated on Al via Electrodeposition.
1. Nickel Salt Dependency as Catalyst in the Plating Bath on the Film Properties of Cu/Cu-Ni
11. Effect Of Nickel Electroplating Process Time Variation Over Aluminum On Crystal Plane Orientation
4. Proses Pelapisan Ni Diatas Al Dengan Metode Elektroplating

Penulis berharap buku ini dapat menjadi referensi bagi mahasiswa, peneliti, akademisi, serta praktisi industri yang tertarik pada bidang rekayasa material, perlindungan korosi, dan pengembangan teknologi pelapisan. Selain itu, buku ini diharapkan dapat mendorong pengembangan inovasi teknologi material yang berkontribusi pada peningkatan umur pakai komponen industri dan efisiensi proses produksi.

Materi dalam buku ini diantaranya:

1. BAB 1 - Pengantar Rekayasa Paduan Monel dan Teknologi Elektrodeposisi.
2. BAB 2 - Dasar Ilmu Material: Aluminium, Ni, dan Cu.
3. BAB 3 - Teori dan Mekanisme Elektrodeposisi Logam dan Paduan.
4. BAB 4 - Metode Sintesis Lapisan Monel pada Substrat Aluminium.
5. BAB 5 - Karakterisasi Struktur Kristal dan Komposisi Lapisan Monel.
6. BAB 6 - Morfologi Permukaan, Ketebalan, dan Mikrostruktur Lapisan.
7. BAB 7 - Evaluasi Sifat Mekanik, Magnetik, dan Elektrokimia.
8. BAB 8 - Aplikasi Industri, Inovasi Teknologi, dan Arah Riset Masa Depan.

Semoga buku ini dapat memberikan manfaat dan kontribusi positif bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, khususnya di bidang rekayasa industri dan material.

1. Buku Sintesis Anorganik
2. Elektroplating

Penyajian buku diharapkan dapat memberikan pemahaman yang komprehensif, baik secara teoretis maupun aplikatif, bagi pembaca. Penulis mengucapkan terimakasih kepada kontributor dari penulis lainnya, dan Universitas Trisakti dalam membantu pembiayaan pembuatan buku monograf ini.

Jakarta, 18 Febuari 2026
Penulis

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga buku monograf berjudul “Elektrodeposisi Paduan Monel Pada Aluminium: Proses, Karakterisasi, dan Aplikasi Material Fungsional” ini dapat disusun dan diselesaikan dengan baik. Buku ini dihadirkan sebagai kontribusi ilmiah dalam pengembangan ilmu material, khususnya dalam bidang rekayasa permukaan, elektrodeposisi, dan aplikasi paduan logam dalam industri modern.

Perkembangan teknologi material menuntut hadirnya solusi yang tidak hanya unggul secara mekanik, tetapi juga efisien secara ekonomi, ringan, tahan korosi, serta memiliki performa fungsional yang tinggi. Dalam konteks tersebut, paduan Monel dan teknik elektrodeposisi menawarkan potensi besar untuk menghasilkan material multifungsi yang aplikatif di berbagai sektor, seperti industri maritim, energi, elektronik, dirgantara, dan manufaktur cerdas. Buku ini membahas secara terintegrasi aspek teoritis, metodologi sintesis, teknik karakterisasi, evaluasi sifat mekanik, magnetik, dan elektrokimia, hingga inovasi teknologi dan peluang aplikatif di masa depan.

Penulis berharap buku ini dapat menjadi referensi akademik dan praktis bagi mahasiswa, dosen, peneliti, serta praktisi industri yang tertarik pada pengembangan material maju dan teknologi pelapisan logam.

Jakarta, 18 Februari 2026

Penulis

v

DAFTAR ISI

PRAKATA	ii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vi
GLOSARIUM	x
BAB 1. PENGANTAR PADUAN NI-CU (MONEL) DAN TEKNOLOGI ELEKTRODEPOSISI - Cahaya Rosyidan	15
A. Peran Paduan Ni-Cu dalam Rekayasa Material....	15
B. Keterbatasan Monel sebagai Material Pejal dan Alternatif Pelapisan	16
C. Teknologi Pelapisan Logam dan Posisi Elektrodeposisi	16
D. Prinsip Dasar Elektrodeposisi Paduan Monel.....	17
E. Hubungan Parameter Proses dengan Struktur dan Sifat Lapisan	18
F. Karakteristik Fungsional Lapisan Monel dan Aplikasi Lapisan Monel dalam Industri dan Teknologi.....	19
BAB 2. DASAR ILMU MATERIAL: ALUMINIUM, NI, DAN CU - Budhy Kurniawan.....	21
A. Peran Ilmu Material dalam Rekayasa Teknik	21
B. Aluminium.....	21
C. Ni	27
D. Cu: Konduktivitas dan Keunggulan Fungsional....	29
E. Struktur Kristal Logam: Landasan Atomik Sifat Material	32
F. Konsep Paduan Logam dan Sistem Monel	33
G. Karakteristik Magnetik dan Elektrokimia Sistem Monel.....	34

BAB 3. TEORI DAN MEKANISME ELEKTRODEPOSISI LOGAM DAN PADUAN - Bambang Soegijono	37
A. Teori Dasar Elektrodposisi	37
B. Hukum Faraday dalam Elektrodposisi	38
C. Mekanisme Reaksi Elektrokimia	40
D. Transport Ion dan Dinamika Larutan	43
E. Nukleasi dalam Pembentukan Lapisan	44
F. Pertumbuhan Lapisan dan Evolusi Mikrostruktur	45
F. Elektrodposisi Paduan Logam	46
G. Faktor yang Mempengaruhi Kualitas Lapisan Elektrodposisi	46
H. Peran Elektrodposisi dalam Rekayasa Material Modern	47
BAB 4. SINTESIS LAPISAN MONEL PADA SUBSTRAT ALUMINIUM - Ferry Budhi Susetyo	48
A. Preparasi Substrat Aluminium	48
B. Komposisi Larutan Elektrolit	49
C. Parameter Deposisi	49
D. Prosedur Sintesis Lapisan Monel	54
E. Evaluasi Kualitas Lapisan	55
BAB 5. KARAKTERISASI STRUKTUR KRISTAL DAN KOMPOSISI LAPISAN MONEL - Lisa Samura	58
A. Analisis Struktur Kristal Menggunakan <i>X-ray Diffraction</i> (XRD)	58
B. Identifikasi Fase Kristal Lapisan Monel	61
C. Analisis Komposisi Unsur Menggunakan <i>Energy Dispersive Spectroscopy</i> (EDS)	63
D. Distribusi Unsur Ni dan Cu dalam Lapisan	64
E. Hubungan Struktur Kristal dan Komposisi terhadap Sifat Lapisan	64

BAB 6. MORFOLOGI PERMUKAAN, KETEBALAN, DAN MIKROSTRUKTUR LAPISAN - Mustamina

Maulani	66
A. Analisis Morfologi Permukaan Menggunakan <i>Scanning Electron Microscopy</i>	66
B. Analisis Penampang dan Ketebalan Lapisan	67
C. Mikrostruktur Lapisan dan Ukuran Butir	68
D. Kekasaran Permukaan dan Homogenitas Lapisan	69
E. Hubungan Morfologi dengan Sifat Fungsional Lapisan.....	69

BAB 7. EVALUASI SIFAT MEKANIK, MAGNETIK, DAN ELEKTROKIMIA - Larasati Rizky Putri

A. Evaluasi Sifat Mekanik Lapisan Monel	71
B. Evaluasi Sifat Magnetik Lapisan Monel	73
C. Evaluasi Ketahanan Korosi Lapisan Monel	74
D. Kinerja Elektrokimia dan Reaksi Evolusi Hidrogen (HER).....	75
E. Keterkaitan Sifat Mekanik, Magnetik, dan Elektrokimia	76
F. Implikasi Industri dan Aplikasi Teknologi	76

BAB 8. APLIKASI INDUSTRI DAN INOVASI TEKNOLOGI - Kartika Fajarwati Hartono

A. Aplikasi Lapisan Monel dalam Industri Maritim dan Kelautan	78
B. Pemanfaatan dalam Industri Minyak, Gas, dan Petrokimia	79
C. Aplikasi pada Industri Dirgantara dan Otomotif..	80
D. Aplikasi dalam Industri Elektronik dan Sensor.....	80
E. Peran dalam Teknologi Energi dan Elektrokimia	81

F. Inovasi Teknologi dalam Elektrodeposisi Lapisan Monel.....	81
G. Integrasi dengan Manufaktur Cerdas (<i>Smart Manufacturing</i>).....	82
H. Tantangan dan Peluang Pengembangan Teknologi.....	83
I. Kontribusi terhadap Keberlanjutan dan Ekonomi Material.....	83
DAFTAR PUSTAKA.....	85
BIOGRAFI PENULIS.....	95
BIOGRAFI EDITOR.....	105
SINOPSIS.....	106

GLOSARIUM

Istilah	Definisi
Aditif	Bahan tambahan dalam larutan elektrolit untuk mengontrol struktur butir, tegangan internal, dan kualitas permukaan lapisan.
<i>Adhesion Strength</i> (Daya Rekat)	Kemampuan lapisan menempel kuat pada substrat, diukur melalui metode uji mekanik seperti peel test.
Aluminium (Al)	Logam ringan yang digunakan sebagai substrat dalam pelapisan karena konduktivitas dan ketahanan korosinya.
Anoda	Elektroda positif dalam proses elektrodposisi yang berfungsi sebagai sumber ion logam atau elektroda inert.
Arus Listrik	Aliran muatan listrik yang mengendalikan laju deposisi ion logam pada katoda.
Butir Kristal (<i>Grain</i>)	Unit struktur mikro kristal yang memengaruhi sifat mekanik dan elektrokimia material.
Daya Tahan Korosi	Kemampuan material untuk menahan degradasi akibat reaksi kimia dengan lingkungan.
<i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> (EIS)	Teknik analisis elektrokimia untuk mengevaluasi resistansi

Istilah	Definisi
	korosi dan karakteristik lapisan pelindung.
<i>Electrodeposition</i> (Elektrodeposisi)	Proses pembentukan lapisan logam melalui reduksi ion dalam larutan elektrolit menggunakan arus listrik.
<i>Electroplating</i>	Teknik pelapisan logam berbasis elektrokimia untuk meningkatkan sifat permukaan material.
<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i> (EDS)	Teknik karakterisasi untuk menentukan komposisi unsur dalam suatu material.
Feromagnetik	Sifat material yang dapat mempertahankan magnetisasi setelah medan magnet eksternal dihilangkan.
Hukum Faraday	Prinsip yang menyatakan bahwa massa logam yang terendapkan sebanding dengan jumlah muatan listrik yang mengalir.
<i>Hydrogen Evolution Reaction</i> (HER)	Reaksi elektrokimia yang menghasilkan gas hidrogen selama proses reduksi air.
Katoda	Elektroda negatif tempat terjadinya reduksi ion logam dan pembentukan lapisan.

Istilah	Definisi
Ketebalan Lapisan	Ukuran tebal material hasil deposisi yang memengaruhi sifat mekanik dan ketahanan korosi.
Komposisi Elektrolit	Susunan kimia larutan yang mengandung ion logam sebagai sumber pelapisan.
Monel	Paduan Ni–Cu dengan ketahanan korosi tinggi dan sifat mekanik unggul.
Morfologi Permukaan	Karakteristik bentuk dan tekstur permukaan lapisan hasil elektrodposisi.
Ni	Logam feromagnetik yang berkontribusi pada sifat magnetik dan ketahanan korosi Monel.
Nukleasi	Tahap awal pembentukan kristal pada permukaan substrat selama proses deposisi.
<i>Open Circuit Potential</i> (OCP)	Potensial elektroda saat tidak ada arus mengalir untuk mengevaluasi kestabilan elektrokimia.
<i>Overpotential</i>	Tegangan tambahan yang diperlukan untuk mempercepat reaksi elektrokimia.
Paduan Logam	Material yang tersusun dari dua atau lebih unsur logam untuk memperoleh sifat unggul.

Istilah	Definisi
Parameter Deposisi	Faktor proses seperti arus, tegangan, suhu, pH, dan waktu yang memengaruhi kualitas lapisan.
<i>Peel Test</i>	Metode uji mekanik untuk mengukur daya rekat lapisan pada substrat.
<i>Potentiodynamic Polarization</i>	Teknik elektrokimia untuk menentukan laju korosi dan perilaku redoks material.
<i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	Mikroskop elektron untuk menganalisis morfologi dan mikrostruktur permukaan material.
Struktur Kristal FCC	Struktur kristal Face-Centered Cubic yang umum pada logam seperti Ni dan Cu.
Substrat	Permukaan dasar tempat lapisan Monel dideposisikan, dalam buku ini berupa aluminium.
<i>Tafel Slope</i>	Parameter yang menggambarkan kinetika reaksi elektrokimia pada uji HER.
Tegangan Residual	Tegangan internal dalam lapisan yang dapat memengaruhi daya rekat dan stabilitas struktur.
<i>Vibrating Sample Magnetometer</i> (VSM)	Instrumen untuk mengukur sifat magnetik material berdasarkan respons magnetisasi.

Istilah	Definisi
<i>X-ray Diffraction</i> (XRD)	Teknik analisis untuk menentukan struktur kristal dan fase material.

BAB 1. PENGANTAR PADUAN NIKEL- TEMBAGA (MONEL) DAN TEKNOLOGI ELEKTRODEPOSISI

A. Peran Paduan Ni-Cu dalam Rekayasa Material

Paduan Ni dan Cu merupakan salah satu material logam yang memiliki peran penting dalam bidang keteknikan dan teknologi modern. Material ini dikenal luas karena memiliki kombinasi sifat mekanik, magnetik, dan elektrokimia yang unggul, sehingga banyak dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi industri.

Secara struktural, Ni dan Cu memiliki kesamaan yang signifikan, di antaranya struktur kristal *face-centered cubic* (FCC), nilai elektronegativitas yang relatif dekat, serta jari-jari atom yang hampir serupa. Kesamaan karakteristik ini memungkinkan kedua unsur tersebut membentuk paduan yang stabil dan homogen, dengan sifat fungsional yang lebih baik dibandingkan unsur penyusunnya secara terpisah.

Dalam praktik industri, paduan Ni-Cu dikenal dengan nama Monel, yang umumnya memiliki komposisi sekitar 70% Ni dan 30% Cu. Monel banyak digunakan pada sektor kelautan, konstruksi otomotif, pelapisan logam, sensor magnetik, dan aktuator, terutama karena ketahanannya terhadap korosi serta sifat feromagnetiknya yang stabil.

B. Keterbatasan Monel sebagai Material Pejal dan Alternatif Pelapisan

Meskipun Monel memiliki performa yang sangat baik, penggunaannya dalam bentuk material pejal (*bulk*) sering menghadapi kendala biaya produksi yang relatif tinggi. Hal ini mendorong pengembangan strategi alternatif yang lebih efisien, salah satunya adalah penggunaan lapisan paduan Monel pada substrat logam lain.

Pendekatan pelapisan memungkinkan pemanfaatan sifat unggul Monel tanpa harus menggunakan material tersebut secara keseluruhan. Dengan cara ini, material dasar yang lebih ringan dan ekonomis, seperti aluminium (Al), dapat dimodifikasi sehingga memiliki sifat mekanik, ketahanan korosi, dan karakteristik magnetik yang lebih baik.

Modifikasi permukaan Al dan paduannya telah menjadi strategi penting dalam rekayasa material modern. Teknik ini memungkinkan peningkatan sifat fisis, mekanik, listrik, dan estetika permukaan, sekaligus menambah nilai guna dan efisiensi biaya produksi.

C. Teknologi Pelapisan Logam dan Posisi Elektrodeposisi

Berbagai teknik telah dikembangkan untuk melapisi logam dengan paduan Monel, di antaranya *Chemical Vapor Deposition* (CVD), *Physical Vapor Deposition* (PVD), serta elektrodeposisi. Masing-masing metode memiliki keunggulan dan keterbatasan, baik dari segi biaya, kompleksitas peralatan, maupun kontrol terhadap hasil lapisan. Di antara metode tersebut,

elektrodeposisi menempati posisi strategis karena bersifat relatif hemat biaya, mudah dikendalikan, dan cocok diterapkan dalam skala laboratorium maupun industri. Metode ini memungkinkan pengaturan ketebalan lapisan, komposisi kimia, serta karakteristik mikrostruktur melalui pengendalian parameter proses seperti komposisi elektrolit, pH, temperatur, rapat arus, dan tegangan.

Elektrodeposisi juga dikenal sebagai teknik yang fleksibel untuk menghasilkan lapisan fungsional dengan sifat yang dapat disesuaikan sesuai kebutuhan aplikasi tertentu.

D. Prinsip Dasar Elektrodeposisi Paduan Monel

Elektrodeposisi merupakan proses pelapisan logam yang memanfaatkan arus listrik dalam larutan elektrolit. Dalam sistem pelapisan Monel, ion Ni^{2+} dan Cu^{2+} berada dalam larutan dan bergerak menuju permukaan katoda akibat pengaruh medan listrik.

Pada anoda, logam Ni dan Cu mengalami reaksi oksidasi dan melepaskan ion ke dalam larutan. Ion-ion tersebut kemudian mengalami reduksi di permukaan katoda dan membentuk lapisan logam atau paduan. Berdasarkan hukum Faraday, massa logam yang terendap sebanding dengan jumlah muatan listrik yang dialirkan selama proses berlangsung. Dengan mengatur rapat arus, waktu deposisi, dan komposisi larutan, karakteristik lapisan seperti ketebalan, struktur kristal, morfologi permukaan, serta sifat mekanik dan magnetik dapat dikendalikan secara sistematis.

Pembentukan lapisan paduan Monel melalui elektrodposisi tidak selalu mudah, terutama karena adanya perbedaan potensial reduksi antara ion Ni^{2+} dan Cu^{2+} . Perbedaan ini dapat menyebabkan deposisi yang tidak seimbang, sehingga memengaruhi komposisi dan homogenitas lapisan. Untuk mengatasi kendala tersebut, digunakan agen pengompleks seperti sitrat, pirofosfat, asetat, sulfamat, dan glisin. Agen ini berfungsi mengubah ion logam menjadi bentuk kompleks yang memiliki potensial reduksi lebih mendekati satu sama lain, sehingga deposisi dapat berlangsung lebih stabil dan seragam.

E. Hubungan Parameter Proses dengan Struktur dan Sifat Lapisan

Parameter elektrodposisi, khususnya rapat arus, memiliki pengaruh signifikan terhadap karakteristik lapisan Monel. Variasi rapat arus dapat memengaruhi laju deposisi, ukuran butir kristal, morfologi permukaan, kekasaran, kekerasan, sifat magnetik, serta ketahanan terhadap korosi. Secara umum, peningkatan rapat arus dapat mempercepat laju deposisi dan mengubah mekanisme pertumbuhan kristal. Proses deposisi biasanya diawali dengan pembentukan nukleasi pada kondisi metastabil, kemudian diikuti pertumbuhan lapisan yang lebih stabil seiring dengan peningkatan ketebalan. Hasil penelitian terdahulu menunjukkan bahwa ukuran butir, struktur kristal FCC, orientasi bidang kristal, serta sifat magnetik dan elektrokimia lapisan Monel sangat dipengaruhi oleh kondisi elektrodposisi yang digunakan.

F. Karakteristik Fungsional Lapisan Monel dan Aplikasi Lapisan Monel dalam Industri dan Teknologi

Lapisan paduan Monel yang dihasilkan melalui elektrodposisi memiliki berbagai sifat fungsional. Karakteristik ini menjadikan lapisan Monel sebagai kandidat material pelindung dan material fungsional, di antaranya:

1. Struktur kristal FCC dengan orientasi tertentu
2. Morfologi permukaan yang dapat disesuaikan melalui parameter deposisi
3. Peningkatan kekerasan dan ketahanan aus
4. Respons magnetik yang dapat dikontrol melalui komposisi Ni
5. Ketahanan korosi yang lebih baik dibandingkan substrat aluminium tanpa pelapisan

Lapisan paduan Monel telah diaplikasikan dalam berbagai bidang, seperti:

1. Komponen kelautan yang memerlukan ketahanan korosi tinggi
2. Pelapisan dekoratif dan protektif pada produk manufaktur
3. Sensor magnetik dan aktuator, termasuk *actuator arm*
4. Komponen listrik dan elektronik yang membutuhkan stabilitas konduktivitas
5. Industri otomotif dan dirgantara, khususnya untuk material ringan dengan performa tinggi

Pemanfaatan Al sebagai substrat yang dilapisi Monel memberikan keuntungan tambahan berupa

bobot yang ringan dan efisiensi biaya, tanpa mengorbankan performa mekanik dan ketahanan lingkungan.

BAB 2. DASAR ILMU MATERIAL: ALUMINIUM, NIKEL, DAN TEMBAGA

A. Peran Ilmu Material dalam Rekayasa Teknik

Ilmu material merupakan cabang ilmu yang mempelajari hubungan antara struktur atom, komposisi kimia, proses manufaktur, serta sifat dan kinerja suatu bahan. Dalam dunia teknik modern, pemilihan material yang tepat menjadi faktor kunci dalam menentukan efisiensi, daya tahan, dan keberlanjutan suatu produk.

Logam dan paduannya menjadi material utama dalam berbagai sektor, termasuk otomotif, kelautan, energi, konstruksi, elektronik, serta teknologi fungsional. Pemahaman mendalam mengenai sifat dasar logam seperti aluminium (Al), Ni, dan Cu menjadi fondasi dalam pengembangan material paduan dan pelapisan permukaan berbasis Monel.

Bab ini membahas sifat dasar Al, Ni, dan Cu, serta konsep pembentukan paduan Monel yang menjadi dasar bagi aplikasi elektrodeposisi dan rekayasa material fungsional.

B. Aluminium

1. Karakteristik

Al merupakan salah satu logam non-ferrous yang paling banyak dimanfaatkan dalam berbagai sektor industri modern. Popularitas Al didorong oleh kombinasi antara bobot yang ringan dan

performa mekanik yang relatif baik, sehingga menghasilkan rasio kekuatan terhadap berat yang unggul dibandingkan banyak logam lainnya. Dengan massa jenis sekitar $2,7 \text{ g/cm}^3$, Al memiliki berat yang jauh lebih rendah dibandingkan baja maupun Cu, menjadikannya pilihan ideal untuk aplikasi yang menuntut efisiensi energi dan pengurangan beban struktural.

Al juga dikenal memiliki konduktivitas listrik dan termal yang cukup tinggi, sehingga banyak digunakan dalam industri kelistrikan, pendinginan, dan sistem perpindahan panas. Kemampuan ini memungkinkan Al berfungsi sebagai material struktural sekaligus sebagai penghantar panas dan listrik dalam berbagai perangkat teknik.

Dari sisi ketahanan lingkungan, Al memiliki keunggulan berupa daya tahan alami terhadap korosi. Ketika terpapar udara, permukaan Al secara spontan membentuk lapisan oksida tipis yang stabil dan protektif. Lapisan ini berfungsi sebagai pelindung alami yang menghambat proses degradasi lebih lanjut, sehingga Al relatif tahan terhadap karat dan kondisi atmosfer normal. Keunggulan lain Al terletak pada kemudahan proses manufaktur. Material ini dapat dengan mudah dibentuk melalui berbagai metode seperti pengecoran, penempaan, ekstrusi, rolling, dan machining. Sifat keuletannya yang baik juga memungkinkan Al dibentuk menjadi komponen kompleks tanpa memerlukan energi

yang terlalu besar. Selain itu, Al bersifat non-magnetik, sehingga sangat sesuai digunakan dalam perangkat elektronik, peralatan sensitif medan magnet, dan aplikasi tertentu di bidang medis dan komunikasi.

Dari segi sifat termal, Al memiliki titik leleh yang relatif rendah, yaitu sekitar 660 °C, yang membuatnya lebih mudah diproses dibandingkan banyak logam teknik lainnya. Karakteristik ini turut mendukung efisiensi energi dalam proses produksi dan daur ulang.

Berkat kombinasi sifat-sifat tersebut, Al banyak diterapkan dalam berbagai industri strategis, termasuk otomotif, kedirgantaraan, transportasi umum, konstruksi ringan, kemasan, elektronik, dan manufaktur peralatan teknik. Kemampuannya untuk dikombinasikan dengan teknik modifikasi permukaan dan pelapisan logam juga menjadikan Al sebagai substrat yang sangat potensial dalam pengembangan material fungsional dan paduan teknik tingkat lanjut.

2. Sifat Kimia dan Ketahanan Korosi Aluminium

Al tergolong sebagai logam yang cukup reaktif, khususnya terhadap unsur oksigen. Ketika permukaannya bersentuhan dengan udara, Al secara alami membentuk lapisan oksida aluminium (Al_2O_3) yang sangat tipis namun stabil. Lapisan ini berperan sebagai pelindung pasif yang menghambat reaksi lanjutan antara Al dan lingkungan sekitarnya, sehingga secara efektif meningkatkan ketahanan terhadap korosi.

Keberadaan lapisan oksida tersebut memberikan Al perlindungan alami terhadap degradasi akibat udara lembap, air, dan lingkungan atmosfer normal. Inilah alasan mengapa Al banyak digunakan pada aplikasi luar ruang dan lingkungan dengan risiko korosi sedang, tanpa memerlukan pelapisan tambahan dalam beberapa kondisi tertentu. Namun demikian, meskipun lapisan oksida bermanfaat untuk perlindungan korosi, lapisan ini juga dapat menjadi hambatan dalam proses rekayasa permukaan, terutama ketika Al akan dilapisi dengan logam lain atau material fungsional.

Lapisan oksida yang stabil dapat mengurangi daya rekat antara substrat aluminium dan lapisan pelapis, sehingga berpotensi menurunkan kualitas hasil pelapisan. Untuk mengatasi kendala tersebut, diperlukan serangkaian perlakuan awal permukaan (*surface pretreatment*) sebelum proses pelapisan dilakukan. Tahapan perlakuan awal ini umumnya meliputi:

- a. Penghalusan atau pengamplasan mekanis, untuk menghilangkan lapisan oksida dan meningkatkan kekasaran permukaan
- b. Pembersihan kimia, guna menghilangkan minyak, lemak, dan kontaminan organik
- c. Aktivasi permukaan, yang bertujuan meningkatkan energi permukaan dan memperbaiki ikatan antara substrat dan lapisan pelapis

Langkah-langkah modifikasi permukaan ini berperan penting dalam memastikan adhesi lapisan yang optimal, meningkatkan ketahanan mekanik, serta memperbaiki sifat fungsional seperti ketahanan aus, ketahanan korosi lanjutan, dan stabilitas struktural.

3. Keterbatasan Aluminium dalam Aplikasi Teknik

Al dikenal sebagai material yang ringan, tahan korosi, dan mudah diproses, penggunaannya dalam aplikasi teknik tetap memiliki sejumlah keterbatasan yang perlu dipertimbangkan dalam proses desain dan rekayasa. Keterbatasan ini terutama berkaitan dengan performa mekanik dan ketahanan terhadap kondisi operasional ekstrem.

Salah satu kelemahan utama Al adalah tingkat kekerasan yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan logam teknik lain seperti baja dan paduan berbasis Ni. Kekerasan yang rendah ini membuat Al lebih rentan terhadap goresan, deformasi plastis, dan kerusakan akibat beban mekanik berulang.

Al memiliki ketahanan aus yang terbatas, sehingga kurang ideal untuk komponen yang mengalami gesekan intensif atau kontak mekanik terus-menerus, seperti bantalan, roda gigi, dan bagian mesin yang bergerak. Tanpa perlakuan tambahan, permukaan Al dapat mengalami degradasi lebih cepat dalam lingkungan kerja yang abrasif.

Dari segi kekuatan struktural, sifat mekanik Al umumnya berada di bawah baja dan paduan Ni, khususnya dalam hal kekuatan tarik, kekuatan luluh, dan ketahanan terhadap beban berat. Hal ini membatasi penggunaan Al pada aplikasi yang menuntut daya dukung tinggi, kecuali jika diperkuat dengan paduan khusus atau perlakuan mekanis tertentu.

Kinerja Al juga dapat menurun dalam lingkungan bersuhu tinggi, karena material ini mengalami penurunan kekuatan dan stabilitas mikrostruktur pada temperatur yang lebih rendah dibandingkan paduan logam suhu tinggi. Oleh sebab itu, Al kurang cocok untuk aplikasi yang melibatkan paparan panas ekstrem dalam jangka panjang.

Al sering dikombinasikan dengan teknologi peningkatan sifat material, seperti pembuatan paduan, perlakuan panas, serta modifikasi permukaan melalui pelapisan logam atau coating fungsional. Teknik pelapisan, misalnya dengan paduan Ni atau monel, dapat secara signifikan meningkatkan kekerasan permukaan, ketahanan aus, ketahanan korosi, serta memberikan sifat tambahan seperti karakteristik magnetik atau konduktivitas tertentu. Dengan penerapan strategi rekayasa material yang tepat, Al tetap dapat dimanfaatkan sebagai material dasar yang ringan namun berkinerja tinggi, terutama dalam aplikasi modern yang menuntut kombinasi antara efisiensi bobot, ketahanan, dan fungsionalitas.

C. Ni

1. Karakteristik Fisik, Mekanik, dan Termal Ni

Ni merupakan salah satu logam transisi yang memiliki peran strategis dalam dunia rekayasa material modern. Logam ini dikenal luas karena kombinasi unik antara kekuatan mekanik, kestabilan struktur, dan daya tahan terhadap lingkungan ekstrem, sehingga banyak dimanfaatkan dalam berbagai sektor industri berteknologi tinggi. Secara struktural, Ni memiliki kubus berpusat muka yang memberikan kestabilan mikrostruktur serta mendukung sifat mekanik yang baik, seperti keuletan dan ketangguhan. Struktur ini juga memungkinkan Ni mempertahankan karakteristik mekaniknya pada rentang suhu yang luas. Dari sisi mekanik, Ni menunjukkan ketahanan yang tinggi terhadap deformasi, baik akibat beban statis maupun dinamis. Sifat ini menjadikannya ideal untuk aplikasi yang menuntut kekuatan struktural jangka panjang serta keandalan operasional.

Dalam aspek kimia dan lingkungan, Ni memiliki resistansi yang sangat baik terhadap oksidasi dan korosi, terutama pada kondisi temperatur tinggi dan lingkungan agresif. Lapisan oksida tipis yang terbentuk di permukaannya bersifat protektif dan mampu memperlambat reaksi degradasi lebih lanjut, sehingga memperpanjang umur pakai material.

Ni termasuk logam yang memiliki sifat feromagnetik, yang membuatnya relevan dalam aplikasi teknologi magnetik, sensor, aktuator, dan perangkat elektromekanik. Keberadaan sifat magnetik ini memberikan nilai tambah fungsional yang tidak dimiliki oleh banyak logam teknik lainnya. Dalam dunia industri, Ni digunakan secara luas sebagai bahan dasar paduan, material pelapis (*coating*), serta komponen utama dalam superalloy dan material tahan panas yang diaplikasikan pada turbin, sistem energi, industri kimia, serta teknologi dirgantara. Kombinasi antara stabilitas termal, kekuatan, dan ketahanan lingkungan menjadikan Ni sebagai material strategis dalam rekayasa modern.

2. Peran Ni dalam Sistem Paduan Logam

Dalam rekayasa paduan logam, Ni memiliki fungsi fundamental sebagai unsur penguat dan penstabil struktur. Kehadirannya dalam suatu sistem paduan mampu meningkatkan berbagai sifat penting yang menentukan kinerja material. Secara mekanik, penambahan Ni berkontribusi pada peningkatan kekuatan, ketangguhan, dan ketahanan terhadap deformasi, baik pada suhu ruang maupun pada temperatur tinggi. Hal ini menjadikan paduan berbasis Ni sangat cocok untuk aplikasi struktural dan komponen teknik yang bekerja dalam kondisi berat.

Dari perspektif ketahanan lingkungan, Ni berperan besar dalam meningkatkan resistansi terhadap korosi dan oksidasi, terutama pada

lingkungan laut, atmosfer industri, serta media kimia agresif. Oleh karena itu, paduan yang mengandung Ni banyak digunakan dalam industri kelautan, petrokimia, dan pembangkit energi.

Ni juga berfungsi sebagai pembawa sifat magnetik dalam paduan tertentu, yang memungkinkan pengembangan material fungsional untuk aplikasi elektromagnetik, aktuator, sensor, dan sistem kontrol presisi. Selain itu, secara struktural Ni memiliki peran penting dalam menstabilkan fase kristal FCC, yang berdampak pada homogenitas mikrostruktur, kestabilan fasa, dan konsistensi sifat mekanik material. Stabilitas struktur ini sangat penting dalam paduan teknik yang menuntut keandalan jangka panjang.

Ni menjadi unsur utama dalam berbagai sistem paduan strategis, termasuk paduan Monel, paduan tahan panas, superalloy berbasis Ni, serta berbagai material teknik modern yang digunakan dalam industri berteknologi tinggi. Perannya tidak hanya sebagai unsur paduan struktural, tetapi juga sebagai komponen fungsional yang meningkatkan performa material secara menyeluruh.

D. Cu: Konduktivitas dan Keunggulan Fungsional

1. Karakteristik Dasar Cu

Cu merupakan salah satu logam teknik yang paling dikenal karena kemampuannya yang sangat baik dalam menghantarkan listrik dan panas. Keunggulan ini menjadikan Cu sebagai

material utama dalam industri kelistrikan, elektronik, sistem tenaga, serta berbagai perangkat yang membutuhkan efisiensi perpindahan energi.

Secara fisik, Cu memiliki daya hantar listrik dan termal yang sangat tinggi, hanya kalah dari perak dalam hal konduktivitas listrik. Hal ini memungkinkan Cu digunakan secara luas dalam kabel listrik, konduktor, kumparan motor, transformator, dan komponen elektronik presisi. Selain konduktivitasnya yang unggul, Cu juga memiliki tingkat keuletan dan ketangguhan yang tinggi, sehingga mudah dibentuk menjadi berbagai bentuk melalui proses rolling, drawing, ekstrusi, dan pembentukan plastis lainnya. Sifat ini mendukung efisiensi produksi serta fleksibilitas desain dalam aplikasi industri. Dari sisi ketahanan lingkungan, Cu menunjukkan resistansi yang baik terhadap korosi atmosfer, terutama dalam kondisi udara kering dan lingkungan normal. Permukaannya dapat membentuk patina alami yang berfungsi sebagai pelindung tambahan terhadap degradasi lingkungan. Secara struktural, Cu memiliki susunan kubus berpusat muka, yang berkontribusi terhadap stabilitas mikrostruktur serta sifat mekanik yang relatif baik. Struktur ini juga mendukung keuletan tinggi dan ketahanan terhadap retak selama proses deformasi.

Kemudahan dalam proses manufaktur menjadi keunggulan tambahan Cu, karena logam ini dapat diproses melalui berbagai teknik seperti

pengecoran, pembentukan, pemesinan, dan pengelasan. Kombinasi sifat tersebut menjadikan Cu sebagai material penting dalam bidang energi, komunikasi, transportasi, serta teknologi berbasis listrik dan elektronik.

2. Peran Cu dalam Sistem Paduan Monel

Dalam sistem paduan Monel, Cu berperan sebagai unsur yang memberikan keseimbangan antara sifat mekanik, kimia, dan fungsional. Keberadaan Cu dalam paduan ini berkontribusi dalam meningkatkan ketahanan terhadap korosi, terutama di lingkungan lembap, laut, dan atmosfer agresif.

Cu juga membantu mempertahankan dan meningkatkan sifat konduktivitas listrik dan termal dalam paduan, sehingga material tetap memiliki kemampuan penghantaran energi yang baik meskipun telah dicampur dengan unsur lain. Hal ini penting dalam aplikasi yang memerlukan kombinasi antara kekuatan struktural dan performa listrik.

Dari aspek mekanik, penambahan Cu dapat mengurangi kecenderungan material menjadi getas, sehingga meningkatkan keuletan dan ketangguhan paduan secara keseluruhan. Dengan demikian, paduan Monel mampu mempertahankan keseimbangan antara kekuatan, fleksibilitas, dan daya tahan terhadap deformasi. Selain itu, Cu memiliki peran dalam mengatur karakteristik magnetik paduan Monel, terutama dalam sistem yang menggabungkan sifat

feromagnetik Ni dengan sifat non-magnetik Cu. Interaksi ini memungkinkan pengembangan material dengan sifat magnetik yang dapat dikendalikan untuk aplikasi sensor, aktuator, dan perangkat elektromagnetik.

Cu juga memberikan kontribusi estetika dan visual, karena memengaruhi warna dan tampilan permukaan paduan. Variasi kandungan Cu dapat menghasilkan gradasi warna tertentu, yang dimanfaatkan dalam aplikasi dekoratif, pelapisan koin, komponen arsitektural, serta material sensorik.

E. Struktur Kristal Logam: Landasan Atomik Sifat Material

Struktur kristal menggambarkan pola keteraturan atom dalam kisi tiga dimensi suatu logam, yang berperan penting dalam menentukan karakteristik mekanik, fisik, serta listrik material. Susunan atom ini memengaruhi bagaimana material merespons gaya eksternal, konduktivitas panas dan listrik, serta stabilitas terhadap deformasi plastis.

Logam seperti Al, Ni, dan Cu memiliki struktur kristal *face-centered cubic* (FCC), yaitu konfigurasi atom di mana setiap sudut dan pusat permukaan sel satuan ditempati oleh atom. Struktur FCC dikenal memiliki beberapa keunggulan, antara lain:

1. Tingkat kepadatan atom yang relatif tinggi
2. Keuletan dan ketangguhan yang baik
3. Kemampuan deformasi plastis yang tinggi tanpa mengalami kegagalan dini

Kesamaan struktur kristal FCC pada Ni dan Cu memungkinkan pembentukan larutan padat yang stabil dan homogen. Selain itu, kedekatan ukuran atom serta kompatibilitas energi ikatan mendukung terciptanya paduan dengan distribusi unsur yang merata dan sifat mekanik yang seimbang.

F. Konsep Paduan Logam dan Sistem Monel

Paduan logam terbentuk ketika dua atau lebih unsur logam dicampur untuk menghasilkan sifat yang lebih unggul dibanding logam murni. Pembentukan paduan dipengaruhi oleh:

1. Kesamaan struktur kristal
2. Perbedaan jari-jari atom
3. Elektronegativitas
4. Energi ikatan

Dalam konteks Ni dan Cu, kedua unsur memenuhi kriteria pembentukan paduan substitusional, di mana atom salah satu unsur dapat menggantikan posisi atom unsur lain dalam kisi kristal tanpa menyebabkan distorsi struktural yang signifikan. Hal ini menghasilkan paduan yang stabil secara termodinamik dan memiliki sifat mekanik yang konsisten.

Monel merupakan paduan berbasis Ni dan Cu yang umumnya mengandung sekitar 70% Ni dan 30% Cu, dengan sejumlah kecil unsur tambahan untuk mengoptimalkan performa. Paduan ini dikenal luas karena kombinasi sifat unggul yang meliputi:

1. Ketahanan korosi yang sangat baik, terutama di lingkungan laut dan kimia agresif

2. Kekuatan mekanik yang tinggi dibanding banyak paduan non-ferrous lainnya
3. Stabilitas termal yang baik pada suhu menengah hingga tinggi
4. Respons magnetik yang dapat disesuaikan melalui kontrol komposisi Ni

Meskipun Monel memiliki performa teknis yang sangat baik, penggunaan dalam bentuk material pejal seringkali terbatas oleh biaya produksi yang relatif tinggi dan bobot yang lebih besar. Oleh karena itu, pendekatan pelapisan Monel pada substrat Al menjadi alternatif inovatif yang menawarkan efisiensi biaya, pengurangan massa, serta peningkatan performa permukaan.

G. Karakteristik Magnetik dan Elektrokimia Sistem Monel

Ni merupakan unsur dengan sifat feromagnetik. Dalam paduan Monel, sifat magnetik dapat dikontrol dengan menyesuaikan rasio kandungan Ni, sehingga memungkinkan material memiliki tingkat respons magnetik tertentu sesuai kebutuhan aplikasi. Kemampuan ini membuka peluang penggunaan Monel dalam perangkat seperti sensor magnetik, aktuator, sistem elektromekanik, serta komponen industri yang membutuhkan kontrol medan magnet secara presisi.

Paduan Monel dikenal memiliki ketahanan korosi yang sangat baik, khususnya di lingkungan dengan kadar klorida tinggi seperti air laut, larutan garam, dan atmosfer lembap. Kombinasi Ni dan Cu menghasilkan stabilitas elektrokimia yang tinggi dengan menurunkan laju reaksi oksidasi dan degradasi permukaan. Sifat ini menjadikan Monel sebagai material yang sangat sesuai untuk aplikasi kelautan, industri kimia, sistem perpipaan, dan lingkungan dengan paparan bahan korosif.

Penerapan lapisan Monel pada substrat Al merupakan strategi rekayasa material yang menggabungkan keunggulan ringan Al dengan daya tahan superior Monel. Pendekatan ini memungkinkan terciptanya material multifungsi dengan performa tinggi dan efisiensi biaya yang lebih baik dibanding penggunaan Monel dalam bentuk massif.

Pelapisan Monel memberikan berbagai manfaat teknis, antara lain:

1. Peningkatan kekerasan dan ketahanan permukaan terhadap deformasi
2. Perlindungan terhadap keausan akibat gesekan dan abrasi
3. Peningkatan resistansi terhadap korosi dalam lingkungan agresif
4. Pemberian sifat magnetik fungsional sesuai kebutuhan aplikasi

Dengan kemajuan teknologi pelapisan modern, seperti *thermal spraying*, *electroplating*, dan *laser cladding*, pengembangan lapisan Monel.

BAB 3. TEORI DAN MEKANISME ELEKTRODEPOSISI LOGAM DAN PADUAN

Elektrodeposisi merupakan salah satu metode penting dalam rekayasa material untuk membentuk lapisan logam atau paduan di atas suatu permukaan konduktif melalui reaksi elektrokimia. Teknik ini banyak digunakan dalam industri untuk meningkatkan sifat permukaan material, seperti ketahanan korosi, kekerasan, konduktivitas listrik, sifat dekoratif, dan karakteristik fungsional lainnya.

Keunggulan utama elektrodeposisi terletak pada kemampuannya untuk menghasilkan lapisan dengan ketebalan yang terkontrol, komposisi yang dapat diatur, serta biaya produksi yang relatif efisien dibandingkan metode pelapisan lainnya. Oleh karena itu, pemahaman tentang teori dasar dan mekanisme elektrodeposisi menjadi kunci dalam mengoptimalkan kualitas lapisan logam dan paduan.

A. Teori Dasar Elektrodeposisi

Elektrodeposisi adalah proses reduksi ion logam dalam larutan elektrolit menjadi bentuk logam padat yang mengendap pada permukaan elektroda katoda. Proses ini berlangsung dalam suatu sistem elektrokimia yang terdiri dari:

1. Katoda (substrat yang dilapisi),
2. Anoda (sumber ion logam atau elektroda inert),
3. Larutan elektrolit yang mengandung ion logam,
4. Sumber arus listrik searah (DC).

8

Ketika arus listrik dialirkan, ion logam bermuatan positif dalam larutan akan bergerak menuju katoda, menerima elektron, dan tereduksi menjadi atom logam yang kemudian membentuk lapisan padat.

Elektrodeposisi tidak hanya digunakan untuk pelapisan logam murni, tetapi juga untuk pembentukan paduan logam dengan komposisi tertentu, yang memungkinkan rekayasa sifat mekanik, magnetik, dan elektrokimia secara lebih fleksibel.

B. Hukum Faraday dalam Elektrodeposisi

Proses elektrodeposisi secara kuantitatif dijelaskan melalui Hukum Faraday tentang elektrolisis, yang menjadi dasar dalam memahami hubungan antara arus listrik dan jumlah logam yang terendapkan pada permukaan elektroda. Hukum ini menjelaskan bahwa proses deposisi logam dikendalikan oleh muatan listrik yang mengalir dalam sistem elektrokimia.

13

Hukum Faraday menyatakan dua prinsip utama. Pertama, massa logam yang terendapkan pada elektroda berbanding lurus dengan total muatan listrik yang melewati larutan elektrolit selama proses berlangsung. Artinya, semakin besar rapat arus, semakin lama waktu pelapisan maka semakin tebal/berat lapisan logam. Kedua, untuk jumlah muatan listrik yang sama, massa logam yang dihasilkan bergantung pada massa ekuivalen logam tersebut, yang ditentukan oleh massa atom relatif

dan jumlah elektron yang terlibat dalam reaksi reduksi. Dengan demikian, logam dengan massa molar lebih besar atau jumlah elektron reaksi yang lebih kecil akan menghasilkan massa endapan yang lebih besar dibandingkan logam lainnya pada kondisi arus yang sama.

Secara matematis, hubungan ini dapat dinyatakan sebagai:

$$m = \frac{M \cdot I \cdot t}{n \cdot F}$$

- m = massa endapan (g)
- M = massa molar logam (g/mol)
- I = arus listrik (A)
- t = waktu deposisi (s)
- n = jumlah elektron yang terlibat dalam reaksi
- F = konstanta Faraday (96.485 C/mol)

Persamaan ini memberikan dasar perhitungan untuk memperkirakan ketebalan lapisan, menghitung laju deposisi, serta menentukan efisiensi arus dalam proses pelapisan logam. Dalam prakteknya, tidak semua muatan listrik yang digunakan secara efektif membentuk lapisan logam karena substrat tertutup gelembung akibat peristiwa evolusi gas hidrogen. Oleh karena itu, konsep efisiensi arus digunakan untuk mengevaluasi seberapa besar fraksi arus yang benar-benar berkontribusi terhadap pembentukan endapan logam.

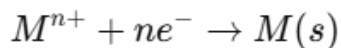
Penerapan Hukum Faraday memungkinkan perancangan proses elektrodeposisi yang lebih presisi, seperti pengaturan ketebalan lapisan sesuai kebutuhan aplikasi, optimasi konsumsi energi, serta pengendalian kualitas dan keseragaman lapisan. Dengan memahami hubungan antara arus, waktu, dan massa endapan, operator dapat menyesuaikan parameter proses untuk memperoleh hasil pelapisan yang optimal.

Hukum Faraday berperan sebagai landasan teoritis utama dalam teknologi elektrodeposisi, karena memberikan kerangka ilmiah dalam menghubungkan parameter listrik dengan hasil fisik lapisan logam dan paduan.

C. Mekanisme Reaksi Elektrokimia

Elektrodeposisi merupakan proses yang dikendalikan oleh reaksi elektrokimia yang berlangsung pada antarmuka antara elektroda dan larutan elektrolit. Reaksi ini melibatkan perpindahan muatan listrik serta transformasi ion logam menjadi atom logam padat yang kemudian membentuk lapisan pada permukaan substrat.

Pada katoda (elektroda negatif), ion logam bermuatan positif dalam larutan akan mengalami reaksi reduksi, yaitu menerima elektron dan berubah menjadi bentuk logam netral. Secara umum, reaksi reduksi dapat dinyatakan sebagai berikut:



Dalam reaksi ini, ion logam (M^{n+}) menangkap sejumlah elektron (n) dan mengendap sebagai logam

padat (M), membentuk lapisan tipis di permukaan katoda. Pada anoda (elektroda positif), terjadi reaksi oksidasi, yang jenisnya bergantung pada sifat material elektroda yang digunakan. Jika anoda bersifat larut, maka logam anoda akan teroksidasi dan melepaskan ion logam ke dalam larutan, sehingga dapat berfungsi sebagai sumber ion untuk mempertahankan keseimbangan konsentrasi elektrolit. Sebaliknya, jika anoda bersifat inert (misalnya grafit atau platina), maka reaksi oksidasi umumnya melibatkan pelepasan gas, seperti oksigen dari dekomposisi molekul air.

Mekanisme reaksi elektrokimia dalam elektrodposisi mencakup beberapa tahap utama, yaitu:

1. Transport ion logam dari larutan menuju permukaan elektroda melalui difusi, migrasi, dan konveksi.
2. Adsorpsi ion pada permukaan elektroda sebelum terjadinya reaksi reduksi.
3. Transfer elektron, di mana ion logam menerima elektron dan berubah menjadi atom netral.
4. Integrasi atom ke dalam kisi kristal, membentuk inti kristal dan melanjutkan pertumbuhan lapisan.

Setiap tahap ini berkontribusi terhadap laju deposisi, struktur mikro, serta kualitas akhir lapisan yang terbentuk.

Kecepatan reaksi elektrokimia serta efisiensi deposisi dipengaruhi oleh berbagai parameter operasional dan kimia, di antaranya:

1. Konsentrasi Ion Logam
Konsentrasi ion dalam larutan menentukan ketersediaan spesies reaktif yang dapat tereduksi

di permukaan katoda. Konsentrasi yang lebih tinggi umumnya meningkatkan laju deposisi, selama tidak menimbulkan ketidakstabilan larutan.

2. Potensial Elektroda

Potensial elektroda mengontrol kecenderungan terjadinya reaksi reduksi dan oksidasi. Perbedaan potensial yang cukup diperlukan untuk mendorong reaksi berlangsung secara efektif.

3. Temperatur Larutan

Peningkatan temperatur dapat mempercepat kinetika reaksi dan meningkatkan mobilitas ion, sehingga mempercepat laju deposisi. Namun, temperatur yang terlalu tinggi juga dapat memengaruhi kualitas permukaan lapisan.

4. Derajat Keasaman (pH)

pH larutan memengaruhi stabilitas ion logam dan kemungkinan terjadinya reaksi samping, seperti pembentukan gas hidrogen. Pengendalian pH penting untuk menjaga kualitas dan homogenitas lapisan.

5. Rapat Arus Listrik

Rapat arus menentukan jumlah muatan listrik yang mengalir per satuan luas elektroda. Nilai rapat arus yang terlalu tinggi dapat mempercepat deposisi tetapi berpotensi meningkatkan kekasaran permukaan dan cacat lapisan.

6. Aditif dan Agen Pengompleks

Zat tambahan, seperti agen pengompleks, surfaktan, dan inhibitor, dapat mengatur kinetika reaksi dan memodifikasi struktur mikro lapisan.

Agen pengompleks, misalnya, berperan dalam menyeimbangkan potensial reduksi logam yang berbeda dalam elektrodposisi paduan.

Dengan mengatur parameter-parameter elektrokimia secara tepat, proses elektrodposisi dapat dioptimalkan untuk menghasilkan lapisan dengan:

1. Ketebalan seragam,
2. Struktur mikro yang lebih halus,
3. Daya rekat yang tinggi terhadap substrat,
4. Sifat mekanik dan fungsional yang unggul,
5. Ketahanan korosi yang lebih baik.

Pemahaman yang mendalam mengenai mekanisme reaksi elektrokimia menjadi dasar penting dalam rekayasa permukaan dan pengembangan lapisan logam serta paduan, terutama untuk aplikasi teknik yang menuntut performa tinggi.

D. Transport Ion dan Dinamika Larutan

Keberhasilan proses elektrodposisi sangat dipengaruhi oleh pergerakan ion logam dalam larutan elektrolit menuju permukaan elektroda. Transport ion ini berlangsung melalui tiga mekanisme utama, yaitu difusi, migrasi, dan konveksi, yang bekerja secara bersamaan dan saling melengkapi.

Difusi terjadi akibat adanya perbedaan konsentrasi ion di dalam larutan, di mana ion cenderung bergerak dari daerah berkonsentrasi tinggi menuju daerah berkonsentrasi rendah. Mekanisme ini menjadi dominan ketika suplai ion ke permukaan elektroda lebih lambat dibanding laju reaksi reduksi.

Migrasi merupakan pergerakan ion yang dipengaruhi oleh medan listrik yang terbentuk akibat beda potensial antara anoda dan katoda. Ion bermuatan positif akan bergerak menuju katoda, sedangkan ion bermuatan negatif bergerak menuju anoda.

Konveksi melibatkan perpindahan massa yang diakibatkan oleh aliran larutan, baik secara alami maupun melalui pengadukan mekanis. Konveksi berperan penting dalam memperbarui larutan di sekitar elektroda dan mengurangi keterbatasan difusi.

Keseimbangan antara ketiga mekanisme tersebut menentukan laju deposisi, efisiensi proses, serta keseragaman ketebalan lapisan. Dalam kondisi tertentu, deposisi dapat menjadi terbatas oleh difusi, sehingga diperlukan pengadukan, sirkulasi larutan, atau peningkatan temperatur untuk mempercepat suplai ion dan meningkatkan kualitas hasil pelapisan.

E. Nukleasi dalam Pembentukan Lapisan

Tahap awal terbentuknya lapisan pada elektrodposisi diawali dengan proses nukleasi, yaitu pembentukan inti kristal di permukaan substrat. Nukleasi berperan sebagai fondasi awal yang menentukan struktur mikro dan karakteristik akhir lapisan.

Secara umum, nukleasi dapat diklasifikasikan menjadi dua tipe utama:

1. Nukleasi instan, di mana banyak inti kristal terbentuk secara hampir bersamaan pada permukaan elektroda. Pola ini cenderung menghasilkan struktur yang lebih halus dan seragam.

2. Nukleasi progresif, di mana inti kristal terbentuk secara bertahap selama proses deposisi berlangsung. Jenis ini dapat menghasilkan variasi ukuran butir yang lebih besar.

Jenis dan distribusi nukleasi sangat memengaruhi kepadatan lapisan, ukuran butir, porositas, serta homogenitas mikrostruktur. Nukleasi yang terkendali dan merata umumnya menghasilkan lapisan yang lebih kompak, halus, dan memiliki sifat mekanik yang lebih baik.

F. Pertumbuhan Lapisan dan Evolusi Mikrostruktur

Setelah inti terbentuk, lapisan akan mengalami pertumbuhan kristal melalui pengendapan atom-atom logam secara berkelanjutan. Tahap ini menentukan:

1. Ukuran butir kristal,
2. Orientasi kristal,
3. Kekasaran permukaan,
4. Ketebalan dan kepadatan lapisan.

Laju pertumbuhan lapisan dipengaruhi oleh rapat arus dan kondisi larutan. Rapat arus yang lebih tinggi cenderung mempercepat deposisi, tetapi juga dapat meningkatkan kekasaran permukaan jika tidak dikontrol dengan baik.

Hubungan antara ukuran butir dan sifat mekanik mengikuti prinsip bahwa butir yang lebih kecil cenderung meningkatkan kekerasan dan kekuatan material. Konsep ini menjadi dasar dalam rekayasa struktur mikro lapisan elektrodposisi untuk menghasilkan material dengan performa mekanik yang lebih unggul.

F. Elektrodeposisi Paduan Logam

Berbeda dengan deposisi logam tunggal, elektrodeposisi paduan melibatkan pengendapan dua atau lebih jenis ion logam secara simultan. Tantangan utama dalam proses ini adalah perbedaan potensial reduksi antar logam. Untuk mengatasi perbedaan tersebut, digunakan strategi seperti:

1. Pengaturan komposisi larutan elektrolit,
2. Pemilihan agen pengompleks,
3. Kontrol rapat arus dan pH,
4. Penyesuaian temperatur proses.

Dengan pengendalian parameter yang tepat, paduan logam dapat terbentuk secara homogen dengan sifat yang lebih unggul dibandingkan logam murni.

G. Faktor yang Mempengaruhi Kualitas Lapisan Elektrodeposisi

Beberapa faktor utama yang menentukan kualitas lapisan meliputi:

1. Rapat arus dan tegangan,
2. Komposisi elektrolit,
3. Temperatur dan pH,
4. Waktu deposisi,
5. Kondisi permukaan substrat,
6. Aditif dan agen pengompleks.

Optimasi faktor-faktor tersebut memungkinkan produksi lapisan dengan ketebalan seragam, daya rekat tinggi, serta sifat mekanik dan fungsional yang optimal.

H. Peran Elektrodeposisi dalam Rekayasa Material Modern

Elektrodeposisi telah menjadi teknologi strategis dalam pengembangan material modern, termasuk dalam:

1. Pelapisan anti-korosi,
2. Material elektronik dan sensor,
3. Komponen magnetik dan aktuator,
4. Industri otomotif dan kedirgantaraan,
5. Rekayasa permukaan material ringan seperti aluminium.

Kemampuan untuk merekayasa struktur mikro dan sifat permukaan menjadikan elektrodeposisi sebagai metode kunci dalam menciptakan material multifungsi dengan efisiensi biaya dan performa tinggi.

BAB 4. SINTESIS LAPISAN MONEL PADA SUBSTRAT ALUMINIUM

Sintesis lapisan Monel pada substrat Al merupakan pendekatan rekayasa material yang bertujuan mengombinasikan sifat unggul Monel seperti ketahanan korosi dan kekuatan mekanik dengan keunggulan Al yang ringan dan ekonomis. Proses elektrodposisi dipilih sebagai metode pelapisan karena mampu menghasilkan lapisan dengan ketebalan terkontrol, struktur mikro yang dapat direkayasa, serta efisiensi biaya yang relatif tinggi.

A. Preparasi Substrat Aluminium

Persiapan substrat Al merupakan tahap krusial karena kualitas permukaan awal sangat menentukan daya rekat dan homogenitas lapisan hasil deposisi. Tahapan preparasi umumnya meliputi pembersihan mekanis, pembersihan kimia, serta aktivasi permukaan.

Pembersihan mekanis dilakukan dengan pengamplasan bertahap untuk menghilangkan oksida permukaan, goresan kasar, dan kontaminan. Selanjutnya, pembersihan kimia dilakukan menggunakan pelarut organik seperti etanol atau aseton untuk menghilangkan minyak dan residu lemak.

Setelah itu, substrat direndam dalam larutan asam ringan untuk menghilangkan lapisan oksida alami Al serta meningkatkan energi permukaan. Tahap aktivasi bertujuan untuk menciptakan permukaan yang lebih reaktif sehingga proses nukleasi dan pertumbuhan lapisan Monel dapat berlangsung lebih merata dan kuat.

B. Komposisi Larutan Elektrolit

Larutan elektrolit merupakan media utama dalam proses elektrodposisi, berfungsi sebagai sumber ion logam yang akan tereduksi dan membentuk lapisan paduan Monel. Komposisi larutan biasanya mengandung garam Ni dan Cu dalam perbandingan tertentu untuk mencapai rasio Monel yang diinginkan.

Selain ion utama, larutan elektrolit juga dapat mengandung bahan tambahan seperti agen pengompleks untuk mengontrol laju reaksi, penstabil pH untuk menjaga kestabilan kimia larutan, serta aditif organik yang berfungsi memperhalus struktur butir dan mengurangi tegangan internal lapisan.

Pemilihan jenis elektrolit dan konsentrasi setiap komponen harus mempertimbangkan kestabilan larutan, kompatibilitas ion logam, serta kemampuan untuk menghasilkan deposisi paduan yang homogen. Rasio Ni dan Cu dalam larutan menjadi faktor utama dalam menentukan komposisi akhir lapisan Monel.

C. Parameter Deposisi

Parameter deposisi merupakan faktor kunci yang menentukan keberhasilan proses elektrodposisi serta kualitas akhir lapisan Monel yang terbentuk pada

substrat Al. Setiap parameter memengaruhi kinetika reaksi elektrokimia, mekanisme nukleasi, laju pertumbuhan kristal, serta karakteristik mikrostruktur dan sifat fungsional lapisan. Oleh karena itu, pengaturan parameter deposisi harus dilakukan secara cermat untuk memperoleh lapisan yang homogen, padat, dan memiliki daya rekat yang baik.

1. Arus dan Tegangan

Arus listrik berperan langsung dalam mengendalikan jumlah muatan yang mengalir dalam sistem elektrodposisi, sehingga menentukan laju reduksi ion logam pada permukaan katoda. Rapat arus yang lebih tinggi umumnya meningkatkan kecepatan deposisi dan mempercepat pembentukan lapisan. Namun, jika rapat arus melampaui batas optimum, dapat terjadi deposisi tidak merata, pembentukan permukaan kasar, porositas meningkat, serta munculnya cacat seperti dendrit atau pembentukan struktur kristal yang tidak stabil.

Sebaliknya, rapat arus yang terlalu rendah dapat mengakibatkan laju deposisi yang lambat, pembentukan lapisan yang sangat tipis, serta pertumbuhan kristal yang kurang efisien. Oleh karena itu, pemilihan rapat arus harus mempertimbangkan keseimbangan antara kecepatan deposisi dan kualitas morfologi permukaan.

Tegangan berfungsi untuk mengatasi hambatan elektrokimia dalam sistem, termasuk

resistansi larutan, polarisasi elektroda, dan overpotensial reaksi. Tegangan yang diterapkan harus cukup tinggi untuk mendorong reaksi reduksi ion logam secara efektif, tetapi tetap dalam rentang yang aman untuk mencegah reaksi samping seperti evolusi gas hidrogen di katoda atau oksigen di anoda. Tegangan yang terlalu tinggi juga dapat mempercepat degradasi elektrolit dan mengurangi efisiensi deposisi.

2. Waktu Deposisi

Waktu deposisi menentukan jumlah total muatan listrik yang dilewatkan dalam sistem, yang secara langsung berkaitan dengan massa dan ketebalan lapisan yang terbentuk berdasarkan prinsip Hukum Faraday. Semakin lama durasi deposisi, semakin banyak material yang terendapkan, sehingga menghasilkan lapisan yang lebih tebal.

Meskipun demikian, deposisi yang berlangsung terlalu lama dapat menimbulkan akumulasi tegangan internal akibat pertumbuhan kristal yang berlebihan, yang berpotensi menyebabkan retakan mikro, delaminasi, atau penurunan daya rekat lapisan. Selain itu, pertumbuhan butir yang terlalu besar akibat deposisi berkepanjangan dapat mengurangi kekerasan dan homogenitas struktur mikro.

Oleh karena itu, waktu deposisi harus ditentukan berdasarkan kebutuhan aplikasi, target ketebalan lapisan, serta keseimbangan antara

kekuatan mekanik, ketahanan aus, dan stabilitas struktural.

3. Suhu Larutan

Suhu larutan memainkan peran penting dalam mengendalikan kinetika reaksi elektrokimia serta mobilitas ion dalam elektrolit. Peningkatan temperatur umumnya mempercepat difusi ion, menurunkan viskositas larutan, dan meningkatkan laju reaksi reduksi, sehingga dapat meningkatkan efisiensi deposisi dan menghasilkan lapisan yang lebih seragam.

Namun, suhu yang terlalu tinggi dapat menurunkan kestabilan kimia larutan elektrolit, mempercepat dekomposisi aditif organik, serta meningkatkan kemungkinan terbentuknya reaksi samping. Temperatur tinggi juga dapat memengaruhi ukuran butir kristal, yang dalam beberapa kasus dapat menyebabkan pertumbuhan butir kasar dan menurunkan kekuatan mekanik lapisan.

Pengendalian suhu yang stabil selama proses deposisi membantu menghasilkan struktur mikro yang lebih halus, meningkatkan kepadatan lapisan, serta memperbaiki sifat mekanik dan ketahanan korosi.

4. pH dan Kondisi Kimia Larutan

Nilai pH larutan elektrolit sangat memengaruhi kestabilan ion logam, spesiasi kimia, serta kemungkinan terjadinya reaksi samping selama proses elektrodposisi. pH yang terlalu rendah dapat meningkatkan korosivitas larutan

terhadap substrat dan peralatan, pH yang terlalu tinggi dapat menyebabkan presipitasi ion logam dalam bentuk hidroksida yang mengganggu proses deposisi.

pH juga berpengaruh terhadap overpotensial reaksi reduksi serta mekanisme pembentukan nukleus kristal. Kondisi pH yang optimal dapat mendukung deposisi yang lebih seragam, meningkatkan efisiensi arus, serta memperbaiki daya rekat dan kepadatan lapisan.

Untuk menjaga kestabilan kimia larutan selama proses berlangsung, sering digunakan sistem buffer atau bahan pengontrol pH yang mampu mempertahankan kondisi kimia dalam rentang yang diinginkan. Selain itu, keberadaan agen pengompleks dapat membantu menstabilkan ion logam dalam larutan dan mengontrol laju reduksi, sehingga komposisi paduan yang terbentuk menjadi lebih homogen.

5. Interaksi Antarparameter Deposisi

Selain pengaruh masing-masing parameter secara individual, kualitas lapisan juga ditentukan oleh interaksi antarparameter deposisi. Sebagai contoh, peningkatan rapat arus dapat memerlukan penyesuaian suhu dan komposisi elektrolit untuk mencegah deposisi tidak merata. Demikian pula, perubahan pH dapat memengaruhi efektivitas aditif dan agen pengompleks dalam larutan.

Oleh karena itu, optimasi proses deposisi sebaiknya dilakukan secara holistik dengan mempertimbangkan keterkaitan antara arus,

tegangan, waktu, suhu, dan kondisi kimia larutan untuk mencapai performa lapisan Monel yang optimal.

D. Prosedur Sintesis Lapisan Monel

Proses sintesis lapisan Monel pada substrat Al dilakukan melalui metode elektrodposisi dengan tahapan yang terkontrol untuk memastikan kualitas lapisan yang optimal. Tahapan awal meliputi pemasangan substrat Al sebagai elektroda kerja (katoda) dan elektroda lawan sebagai anoda di dalam sel elektrokimia. Jenis anoda yang digunakan dapat berupa anoda larut atau inert, tergantung pada strategi pengendalian komposisi ion logam dalam larutan.

Larutan elektrolit disiapkan sesuai dengan komposisi yang telah dirancang dalam tahap desain eksperimen. Larutan ini umumnya mengandung ion Ni dan Cu sebagai sumber pembentuk paduan Monel, serta aditif tertentu seperti agen pengompleks, bahan penstabil, dan zat penghalus permukaan untuk mengontrol kinetika deposisi dan kualitas morfologi lapisan.

Sebelum proses deposisi dimulai, seluruh sistem diperiksa untuk memastikan kondisi listrik, suhu, dan larutan kimia berada dalam batas yang telah ditentukan. Substrat aluminium yang telah dipreparasi dicelupkan ke dalam larutan elektrolit, kemudian sumber daya listrik diaktifkan untuk mengalirkan arus sesuai rapat arus yang direncanakan. Selama proses berlangsung, parameter utama seperti arus, tegangan, suhu, dan pH larutan

dipantau secara berkala guna menjaga kestabilan reaksi elektrokimia.

Kontrol suhu dilakukan untuk mempertahankan kinetika reaksi yang stabil serta mencegah degradasi larutan elektrolit. Pengadukan larutan atau sirkulasi fluida dapat diterapkan untuk memastikan distribusi ion yang merata dan menghindari pembatasan difusi. Selain itu, pemantauan pH dilakukan untuk menjaga kestabilan ion logam serta mencegah terbentuknya presipitasi senyawa yang tidak diinginkan.

Setelah waktu deposisi yang telah ditentukan tercapai, sumber daya listrik dimatikan, dan sampel dikeluarkan dari sel elektrokimia. Sampel kemudian dibilas menggunakan air deionisasi untuk menghilangkan residu elektrolit yang menempel pada permukaan. Tahap selanjutnya adalah proses pengeringan menggunakan udara bersih atau oven bersuhu rendah guna mencegah kontaminasi dan oksidasi yang tidak diinginkan sebelum dilakukan tahapan karakterisasi lanjutan.

Prosedur sintesis ini dirancang untuk menghasilkan lapisan Monel yang memiliki ketebalan seragam, daya rekat yang baik terhadap substrat aluminium, serta sifat mekanik dan elektrokimia yang sesuai dengan kebutuhan aplikasi teknik dan industri.

E. Evaluasi Kualitas Lapisan

Evaluasi kualitas lapisan Monel merupakan tahapan penting untuk menentukan keberhasilan proses sintesis serta memastikan bahwa lapisan memenuhi kriteria

teknis dan fungsional yang diharapkan. Penilaian kualitas dilakukan dengan menggabungkan analisis morfologi, struktur mikro, komposisi kimia, sifat mekanik, serta ketahanan terhadap lingkungan korosif.

Salah satu parameter utama yang dievaluasi adalah ketebalan lapisan, yang berkaitan langsung dengan waktu deposisi dan efisiensi arus. Ketebalan dapat diukur menggunakan metode mikroskopi penampang, profilometri permukaan, atau teknik non-destruktif berbasis elektromagnetik. Ketebalan yang seragam menjadi indikator penting dari kestabilan proses deposisi.

Morfologi permukaan dianalisis untuk menilai tingkat kehalusan, kekasaran, kepadatan butir, serta keberadaan cacat seperti pori, retakan, atau struktur dendritik. Pengamatan ini umumnya dilakukan menggunakan mikroskop elektron atau mikroskop optik resolusi tinggi. Struktur mikro yang halus dan kompak menunjukkan proses deposisi yang terkendali dan kualitas lapisan yang baik.

Komposisi kimia lapisan dianalisis untuk memastikan rasio Ni dan Cu sesuai dengan target pembentukan paduan Monel. Teknik seperti *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS) atau spektroskopi sinar-X digunakan untuk memetakan distribusi unsur serta mendeteksi kemungkinan kontaminasi.

Daya rekat lapisan terhadap substrat Al menjadi faktor krusial dalam menentukan keandalan material dalam aplikasi praktis. Evaluasi daya rekat dapat dilakukan melalui uji tarik, uji gores, atau metode lentur. Lapisan dengan daya rekat yang baik menunjukkan

keberhasilan tahapan preparasi permukaan dan kestabilan pertumbuhan lapisan selama deposisi.

Selain itu, sifat mekanik seperti kekerasan dan ketahanan aus diuji untuk menilai peningkatan performa permukaan dibandingkan substrat Al murni. Uji mikrohardness dan tribologi sering digunakan untuk mengukur resistansi terhadap deformasi plastis dan keausan.

Ketahanan korosi merupakan aspek penting dalam aplikasi lingkungan agresif, seperti atmosfer laut atau larutan elektrolit. Evaluasi dilakukan menggunakan teknik elektrokimia seperti uji polarisasi potensiodinamik dan impedance spectroscopy untuk menentukan laju degradasi material serta stabilitas lapisan dalam jangka panjang.

Hasil evaluasi kualitas lapisan digunakan untuk menganalisis hubungan antara parameter deposisi dan karakteristik lapisan yang dihasilkan. Informasi ini menjadi dasar dalam mengoptimalkan kondisi proses, meningkatkan performa lapisan Monel, serta mengembangkan strategi sintesis yang lebih efisien dan aplikatif untuk kebutuhan industri dan riset material lanjutan.

BAB 5. KARAKTERISASI STRUKTUR KRISTAL DAN KOMPOSISI LAPISAN MONEL

Karakterisasi struktur kristal dan komposisi kimia merupakan tahapan penting dalam evaluasi kualitas lapisan Monel yang disintesis pada substrat aluminium. Analisis ini bertujuan untuk memahami fase kristal yang terbentuk, tingkat kristalinitas, distribusi unsur Ni dan Cu, serta hubungan antara struktur mikro dengan sifat mekanik dan ketahanan korosi lapisan.

19 Teknik utama yang digunakan dalam karakterisasi ini meliputi *X-ray Diffraction* (XRD) untuk analisis struktur kristal dan fase, serta *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS) untuk analisis komposisi unsur dan distribusinya pada permukaan lapisan.

4 A. Analisis Struktur Kristal Menggunakan *X-ray Diffraction* (XRD)

X-ray Diffraction (XRD) merupakan teknik karakterisasi non-destruktif yang digunakan secara luas untuk menganalisis struktur kristal material padat. Metode ini berperan penting dalam mengidentifikasi fase kristal, menentukan parameter kisi, mengevaluasi

tingkat kristalinitas, serta mengkaji perubahan struktur akibat proses sintesis atau perlakuan material.

Prinsip kerja XRD didasarkan pada fenomena difraksi sinar-X oleh bidang atom dalam kisi kristal, di mana sinar-X yang mengenai material akan dihamburkan oleh atom-atom yang tersusun secara periodik. Interferensi konstruktif antara gelombang sinar-X yang terhambur terjadi ketika memenuhi kondisi Hukum Bragg, yang dinyatakan sebagai:

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

di mana:

- n = orde difraksi (bilangan bulat positif),
- λ = panjang gelombang sinar-X yang digunakan,
- d = jarak antar bidang kristal,
- θ = sudut datang sinar-X terhadap bidang kristal.

Persamaan ini menunjukkan bahwa puncak difraksi hanya muncul pada sudut tertentu yang memenuhi hubungan geometris antara panjang gelombang sinar-X dan jarak antar bidang kristal. Dengan menganalisis posisi dan intensitas puncak difraksi pada pola XRD, dapat diperoleh informasi struktural yang sangat rinci mengenai material yang diuji.

Dalam konteks karakterisasi lapisan Monel pada substrat aluminium, analisis XRD memungkinkan identifikasi fase kristal yang terbentuk, khususnya untuk memastikan apakah paduan Monel membentuk larutan padat homogen dengan struktur *face-centered cubic*

(FCC). Perbandingan pola difraksi hasil eksperimen dengan data standar dari basis data seperti ICDD/JCPDS dapat digunakan untuk mengonfirmasi keberadaan fase Monel serta mendeteksi kemungkinan fase sekunder atau oksida yang tidak diinginkan.

Selain identifikasi fase, XRD juga memberikan informasi mengenai:

1. Struktur kristal lapisan Monel, termasuk jenis kisi dan simetri kristal.
2. Parameter kisi (lattice parameter), yang dapat digunakan untuk menilai perubahan komposisi dan distorsi kisi akibat substitusi atom Ni dan Cu.
3. Derajat kristalinitas, yang mencerminkan tingkat keteraturan struktur atom dalam lapisan dan berkaitan dengan stabilitas mekanik serta ketahanan korosi.
4. Ukuran kristalit, yang dapat dihitung menggunakan persamaan Scherrer, di mana ukuran kristalit yang lebih kecil umumnya berkorelasi dengan peningkatan kekerasan dan kekuatan mekanik.
5. Tegangan sisa (*residual stress*), yang dapat diestimasi dari pergeseran puncak difraksi dan berpengaruh terhadap stabilitas struktural serta risiko retak pada lapisan.

Lebar puncak difraksi (*peak broadening*) dapat memberikan indikasi adanya mikroregangan (*microstrain*) dan ukuran kristalit yang sangat halus, yang sering muncul pada lapisan hasil elektrodposisi akibat laju pertumbuhan kristal yang cepat. Sementara itu, perubahan intensitas relatif puncak difraksi dapat

menunjukkan adanya tekstur kristal (*preferred orientation*), yang berhubungan dengan mekanisme pertumbuhan lapisan selama proses deposisi.

Analisis XRD tidak hanya berfungsi untuk mengidentifikasi fase kristal, tetapi juga menjadi alat utama dalam memahami hubungan antara struktur kristal, parameter deposisi, dan sifat mekanik serta fungsional lapisan Monel. Data yang diperoleh dari karakterisasi ini menjadi dasar penting dalam optimasi proses sintesis dan peningkatan performa material.

B. Identifikasi Fase Kristal Lapisan Monel

Lapisan Monel, yang merupakan paduan berbasis Ni-Cu, umumnya membentuk struktur kristal *face-centered cubic* (FCC) sebagai hasil dari pembentukan larutan padat substitusional. Struktur ini terbentuk karena kesamaan jari-jari atom, struktur kristal dasar, serta kompatibilitas energi ikatan antara Ni dan Cu, sehingga memungkinkan atom Cu menggantikan posisi atom Ni dalam kisi kristal tanpa mengubah struktur dasar secara signifikan.

Identifikasi fase kristal pada lapisan Monel dilakukan melalui analisis pola difraksi sinar-X (XRD) dengan membandingkan posisi dan intensitas puncak difraksi terhadap data referensi dalam basis data standar seperti *Joint Committee on Powder Diffraction Standards* (JCPDS) atau *International Centre for Diffraction Data* (ICDD). Proses ini bertujuan untuk memastikan keberadaan fase Monel, mengonfirmasi homogenitas paduan, serta mendeteksi kemungkinan fase sekunder

seperti oksida atau intermetalik yang dapat memengaruhi sifat mekanik dan ketahanan korosi.

Keberadaan puncak difraksi khas Ni dan Cu yang saling tumpang tindih atau bergeser menjadi indikator utama terbentuknya larutan padat homogen. Tumpang tindih puncak mencerminkan bahwa kedua unsur menyatu dalam satu fase tunggal, bukan sebagai fase terpisah. Hal ini merupakan karakteristik penting dari paduan Monel yang stabil secara struktural dan kimia.

Perubahan posisi puncak difraksi (peak shifting) dapat memberikan informasi mendalam mengenai kondisi mikrostruktur lapisan, antara lain:

1. Variasi rasio komposisi Ni/Cu, di mana peningkatan fraksi Cu cenderung menyebabkan perubahan parameter kisi karena perbedaan ukuran atom antara Ni dan Cu.
2. Tegangan sisa (*residual stress*) yang terbentuk selama proses elektrodposisi, yang dapat berasal dari perbedaan laju pertumbuhan kristal, perubahan temperatur, atau ketidakseimbangan kinetika reaksi.

Distorsi kisi kristal (*lattice distortion*) akibat ketidak sempurnaan struktur, substitusi atom, serta keberadaan defek seperti dislokasi dan vakansi.

Selain posisi puncak, pelebaran puncak difraksi (peak broadening) juga merupakan parameter penting yang berkaitan dengan ukuran kristalit dan mikroregangan dalam lapisan. Pelebaran puncak dapat dianalisis menggunakan persamaan Scherrer, yang memungkinkan estimasi ukuran kristalit berdasarkan lebar setengah tinggi puncak (*Full Width at Half*

Maximum/FWHM). Ukuran kristalit yang lebih kecil umumnya dikaitkan dengan peningkatan kekerasan dan kekuatan mekanik, sesuai dengan prinsip Hall–Petch, di mana batas butir berperan sebagai penghalang pergerakan dislokasi.

Analisis XRD juga dapat digunakan untuk mengidentifikasi preferential orientation (tekstur kristal) pada lapisan Monel, yang sering muncul akibat mekanisme pertumbuhan anisotropik selama proses elektrodposisi. Tekstur ini dapat memengaruhi sifat mekanik, ketahanan aus, dan respon magnetik material.

17

C. Analisis Komposisi Unsur Menggunakan *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS)

Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) merupakan teknik analisis unsur yang terintegrasi dengan *Scanning Electron Microscopy*. Metode ini memungkinkan identifikasi unsur penyusun lapisan serta estimasi persentase komposisi masing-masing elemen.

Analisis EDS pada lapisan Monel bertujuan untuk:

1. Menentukan rasio Ni dan Cu dalam lapisan
2. Memastikan keberhasilan pembentukan paduan
3. Mendeteksi kemungkinan kontaminan atau unsur minor
4. Mengevaluasi keseragaman komposisi

Spektrum EDS menampilkan puncak karakteristik dari Ni dan Cu, di mana intensitas relatif puncak mencerminkan fraksi unsur dalam lapisan.

D. Distribusi Unsur Ni dan Cu dalam Lapisan

Distribusi spasial unsur Ni dan Cu dianalisis menggunakan mapping EDS, yang memberikan gambaran visual mengenai penyebaran unsur pada permukaan lapisan. Distribusi yang homogen menunjukkan keberhasilan proses elektrodposisi dalam menghasilkan paduan yang merata.

Distribusi unsur yang tidak seragam dapat mengindikasikan:

1. Fluktuasi parameter deposisi
2. Perbedaan kinetika reduksi ion Ni dan Cu
3. Efek difusi dan migrasi ion dalam larutan elektrolit

Keseragaman distribusi Ni dan Cu berperan penting dalam menentukan sifat lapisan, termasuk:

1. Ketahanan korosi
2. Stabilitas elektrokimia
3. Respons magnetik
4. Kekuatan mekanik

E. Hubungan Struktur Kristal dan Komposisi terhadap Sifat Lapisan

Struktur kristal dan komposisi kimia lapisan Monel memiliki pengaruh langsung terhadap performa fungsionalnya. Ukuran kristalit yang lebih halus umumnya meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus, sedangkan distribusi unsur yang homogen meningkatkan stabilitas elektrokimia dan daya tahan terhadap lingkungan agresif.

Paduan Monel dengan komposisi optimal dapat menghasilkan:

1. Ketahanan korosi tinggi di lingkungan laut
2. Kombinasi kekuatan dan keuletan yang baik
3. Sifat magnetik yang dapat dikontrol
4. Stabilitas termal yang baik

Analisis struktur kristal dan komposisi unsur menjadi dasar penting dalam optimasi parameter sintesis dan peningkatan kualitas lapisan Monel.

BAB 6. MORFOLOGI PERMUKAAN, KETEBALAN, DAN MIKROSTRUKTUR LAPISAN

Karakteristik morfologi permukaan, ketebalan, dan mikrostruktur merupakan aspek penting dalam menilai kualitas dan kinerja lapisan hasil proses elektrodposisi. Parameter-parameter ini berpengaruh langsung terhadap sifat mekanik, ketahanan aus, ketahanan korosi, serta performa fungsional lapisan Monel pada substrat aluminium. Oleh karena itu, analisis visual dan mikrostruktural menjadi langkah utama dalam mengevaluasi keberhasilan sintesis lapisan.

Salah satu teknik utama yang digunakan untuk mengamati struktur permukaan dan penampang lapisan adalah dengan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* yang memungkinkan visualisasi detail morfologi hingga skala mikrometer dan nanometer.

A. Analisis Morfologi Permukaan Menggunakan *Scanning Electron Microscopy*

Scanning Electron Microscopy digunakan untuk mengamati topografi permukaan lapisan Monel secara detail. Teknik ini bekerja dengan memindai permukaan sampel menggunakan berkas elektron berenergi tinggi, sehingga menghasilkan citra beresolusi tinggi yang menampilkan struktur permukaan, pori, retakan, dan distribusi butir kristal.

Analisis citra SEM pada permukaan lapisan bertujuan untuk mengevaluasi:

1. Tingkat kehalusan atau kekasaran permukaan
2. Homogenitas distribusi partikel dan butir
3. Keberadaan cacat seperti pori, retakan, atau aglomerasi
4. Pola pertumbuhan kristal selama deposisi

Lapisan yang berkualitas tinggi umumnya menunjukkan permukaan yang halus, kompak, bebas pori besar, serta memiliki distribusi butir yang merata. Sebaliknya, permukaan yang kasar dan tidak homogen dapat mengindikasikan ketidakseimbangan parameter deposisi seperti rapat arus, suhu, atau komposisi elektrolit.

B. Analisis Penampang dan Ketebalan Lapisan

Selain permukaan, citra penampang melintang digunakan untuk mengukur ketebalan lapisan serta mengevaluasi kualitas antarmuka antara lapisan Monel dan substrat Al.

Pengukuran ketebalan lapisan memberikan informasi penting mengenai:

1. Laju deposisi selama proses elektrodposisi
2. Efisiensi pemanfaatan arus listrik
3. Konsistensi pertumbuhan lapisan sepanjang waktu deposisi

Ketebalan lapisan dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, antara lain:

1. Besarnya arus dan rapat arus
2. Waktu deposisi

3. Konsentrasi ion logam dalam elektrolit
4. Temperatur dan kondisi kimia larutan

Lapisan yang ideal memiliki ketebalan seragam, melekat kuat pada substrat, serta tidak menunjukkan adanya delaminasi atau rongga pada antarmuka.

C. Mikrostruktur Lapisan dan Ukuran Butir

Mikrostruktur mengacu pada susunan butir kristal dan batas butir dalam lapisan. Ukuran dan distribusi butir memiliki peran penting dalam menentukan sifat mekanik, seperti kekerasan dan ketahanan terhadap deformasi.

Ukuran butir yang lebih kecil umumnya dikaitkan dengan:

1. Peningkatan kekuatan dan kekerasan material
2. Peningkatan ketahanan aus
3. Struktur yang lebih padat dan kompak

Hubungan antara ukuran butir dan kekuatan mekanik dikenal sebagai prinsip *Hall-Petch*, yang menyatakan bahwa batas butir dapat menghambat pergerakan dislokasi dan meningkatkan kekuatan material.

Mikrostruktur lapisan dipengaruhi oleh:

1. Mekanisme nukleasi dan pertumbuhan kristal
2. Rapat arus selama deposisi
3. Suhu larutan
4. Keberadaan aditif atau agen pengompleks dalam elektrolit

Pengendalian parameter-parameter ini memungkinkan rekayasa mikrostruktur untuk

memperoleh lapisan dengan sifat mekanik yang lebih unggul.

D. Kekasaran Permukaan dan Homogenitas Lapisan

Kekasaran permukaan merupakan indikator penting dalam menentukan performa lapisan, terutama dalam aplikasi yang berkaitan dengan gesekan, keausan, dan adhesi. Permukaan yang terlalu kasar dapat meningkatkan laju keausan dan mempercepat degradasi material antara permukaan yang terlalu halus dapat memengaruhi daya rekat dalam aplikasi tertentu.

Faktor yang memengaruhi kekasaran permukaan meliputi:

- Laju deposisi
- Ukuran butir kristal
- Stabilitas arus dan tegangan
- Komposisi elektrolit

Homogenitas lapisan mencerminkan keseragaman struktur dan komposisi di seluruh permukaan. Lapisan yang homogen umumnya memiliki performa mekanik dan ketahanan korosi yang lebih konsisten serta umur pakai yang lebih panjang.

E. Hubungan Morfologi dengan Sifat Fungsional Lapisan

Morfologi, ketebalan, dan mikrostruktur saling berkaitan dan berkontribusi terhadap kinerja fungsional lapisan Monel, antara lain:

- Ketahanan aus, yang meningkat dengan struktur mikro yang halus dan padat

- Ketahanan korosi, yang lebih baik pada permukaan yang homogen dan bebas pori
- Sifat mekanik, yang dipengaruhi oleh ukuran butir dan kepadatan lapisan
- Respons magnetik dan elektrokimia, yang dipengaruhi oleh keseragaman struktur dan komposisi

Dengan memahami hubungan antara parameter proses dan karakteristik mikrostruktur, teknologi elektrodposisi dapat dioptimalkan untuk menghasilkan material berlapis yang ringan, kuat, tahan korosi, dan multifungsi.

BAB 7. EVALUASI SIFAT MEKANIK, MAGNETIK, DAN ELEKTROKIMIA

Lapisan Monel berbasis paduan Ni-Cu pada substrat Al dikembangkan untuk meningkatkan performa mekanik, ketahanan korosi, serta fungsi magnetik dan elektrokimia material ringan. Evaluasi sifat fungsional ini menjadi tahap penting untuk menentukan efektivitas proses elektrodeposisi dan potensi aplikasinya dalam industri modern.

Bab ini membahas metode pengujian serta analisis sifat mekanik, magnetik, dan elektrokimia lapisan Monel, termasuk hubungan antara parameter sintesis, mikrostruktur, dan kinerja material.

A. Evaluasi Sifat Mekanik Lapisan Monel

1. Uji Kekerasan Permukaan

Kekerasan merupakan indikator utama ketahanan terhadap deformasi plastis dan keausan. Lapisan Monel umumnya diuji menggunakan metode microhardness (Vickers) atau nanoindentation, yang memungkinkan pengukuran kekerasan pada lapisan tipis tanpa mempengaruhi substrat.

Faktor-faktor yang memengaruhi nilai kekerasan meliputi:

- Ukuran butir kristal
- Kepadatan dislokasi

- Tegangan residual
- Komposisi Ni/Cu dalam lapisan

Berdasarkan prinsip Hall–Petch semakin kecil ukuran butir, semakin tinggi kekerasan material. Oleh karena itu, kontrol nukleasi dan pertumbuhan kristal selama elektrodposisi menjadi strategi utama dalam meningkatkan performa mekanik.

2. Kekuatan dan Ketahanan Aus

Selain kekerasan, sifat mekanik lainnya yang penting adalah ketahanan aus. Lapisan Monel memberikan perlindungan tambahan terhadap degradasi mekanik akibat gesekan, abrasi, dan beban siklik. Pengujian aus dapat dilakukan menggunakan:

- *Pin-on-disc test*
- *Sliding wear test*
- *Tribological analysis*

Lapisan yang lebih homogen dan kompak cenderung memiliki ketahanan aus lebih baik karena mengurangi pembentukan retak mikro dan pelepasan partikel.

3. Daya Rekat Lapisan terhadap Substrat

Daya rekat antara lapisan Monel dan Al menentukan ketahanan terhadap delaminasi. Evaluasi dilakukan melalui uji:

- *Scratch test*
- *Peel test*
- *Adhesion strength measurement*

Daya rekat dipengaruhi oleh:

- Preparasi permukaan substrat
- Kondisi deposisi
- Tegangan residual
- Transisi mikrostruktur pada antarmuka

Lapisan dengan adhesi tinggi memiliki umur pakai lebih lama dalam kondisi operasi ekstrem.

B. Evaluasi Sifat Magnetik Lapisan Monel

1. Dasar Sifat Magnetik dalam Sistem Monel
Ni memiliki sifat feromagnetik, sedangkan Cu bersifat non-magnetik. Dalam paduan Monel, sifat magnetik dapat dikendalikan melalui komposisi Ni dan kondisi mikrostruktur. Dengan mengatur rasio Ni/Cu, material dapat direkayasa untuk menghasilkan respons magnetik yang stabil dan terkendali.
2. Pengukuran Magnetik Menggunakan *Vibrating Sample Magnetometer* (VSM)
Pengujian sifat magnetik dilakukan menggunakan *Vibrating Sample Magnetometer* (VSM), yang mengukur respons magnetisasi material terhadap medan magnet eksternal. Parameter utama yang dianalisis meliputi:
 - a. Magnetisasi saturasi
 - b. Remanensi magnetik
 - c. Koersivitas
 - d. Bentuk kurva hysteresis
 Kurva hysteresis memberikan gambaran karakter magnetik lapisan, termasuk kestabilan magnetisasi dan potensi penggunaannya dalam sensor dan perangkat elektromagnetik.

3. Hubungan Mikrostruktur dengan Respons Magnetik

Sifat magnetik sangat dipengaruhi oleh:

- a. Ukuran butir kristal
- b. Distribusi fasa Ni
- c. Tegangan residual
- d. Homogenitas lapisan

Lapisan dengan struktur mikro halus dan komposisi merata cenderung menunjukkan respons magnetik yang lebih stabil dan reproducible.

C. Evaluasi Ketahanan Korosi Lapisan Monel

1. Peran Monel dalam Perlindungan Korosi

Monel dikenal memiliki ketahanan korosi tinggi, khususnya di lingkungan laut, larutan garam, dan atmosfer agresif. Kombinasi Ni dan Cu meningkatkan kestabilan elektrokimia dan memperlambat laju reaksi degradasi. Lapisan Monel pada aluminium berfungsi sebagai:

- a. Penghalang difusi ion agresif
- b. Proteksi terhadap oksidasi
- c. Lapisan pasif elektrokimia

2. Metode Pengujian Korosi

Evaluasi ketahanan korosi dilakukan melalui metode elektrokimia, seperti:

- a. *Potentiodynamic polarization*
- b. *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS)
- c. *Open Circuit Potential* (OCP)

Parameter yang dianalisis meliputi:

- a. Laju korosi

- b. Potensial korosi
- c. Resistansi transfer muatan
- d. Kapasitansi lapisan pasif

Lapisan yang lebih kompak dan homogen umumnya menunjukkan resistansi korosi yang lebih tinggi.

3. Mekanisme Perlindungan Korosi pada Lapisan Monel

Ketahanan korosi dipengaruhi oleh:

- a. Pembentukan film pasif stabil
- b. Rendahnya porositas lapisan
- c. Distribusi Ni yang merata
- d. Minimnya cacat mikro

Pengendalian parameter deposisi menjadi kunci dalam menghasilkan lapisan dengan performa perlindungan maksimal.

D. Kinerja Elektrokimia dan Reaksi Evolusi Hidrogen (HER)

1. Elektrodposisi dan Aktivitas Elektrokatalitik
Lapisan Monel juga berpotensi sebagai material elektrokatalis, terutama untuk *Hydrogen Evolution Reaction* (HER) dalam sistem energi hidrogen dan elektrolisis air. Ni dikenal sebagai katalis yang baik untuk HER, berkontribusi dalam meningkatkan stabilitas permukaan.
2. Parameter Kinerja Elektrokimia
Evaluasi HER dilakukan dengan mengukur:
 - a. *Overpotential*
 - b. *Tafel slope*
 - c. *Exchange current density*

d. Stabilitas siklik

Lapisan dengan permukaan aktif tinggi dan mikrostruktur halus menunjukkan performa elektrokatalitik yang lebih baik.

3. Hubungan Struktur Mikro dengan Aktivitas HER
Faktor yang meningkatkan performa HER meliputi:

- a. Luas permukaan spesifik tinggi
- b. Distribusi Ni aktif
- c. Kekasaran mikro yang terkontrol
- d. Struktur pori yang optimal

Dengan rekayasa elektrodeposisi yang tepat, lapisan Monel dapat berfungsi sebagai katalis efisien dan berbiaya rendah.

E. Keterkaitan Sifat Mekanik, Magnetik, dan Elektrokimia

Sifat mekanik, magnetik, dan elektrokimia saling berkaitan melalui struktur mikro material. Lapisan dengan:

- a. Ukuran butir halus
- b. Komposisi homogen
- c. Tegangan residual rendah

Kepadatan tinggi cenderung menunjukkan performa unggul dalam berbagai aspek fungsional.

Pendekatan multidisiplin dalam evaluasi ini memungkinkan optimalisasi material untuk aplikasi industri lanjutan.

F. Implikasi Industri dan Aplikasi Teknologi

Lapisan Monel pada aluminium berpotensi diterapkan dalam berbagai sektor, antara lain:

- a. Industri maritim dan offshore
- b. Komponen otomotif ringan
- c. Perangkat elektronik dan sensor magnetik
- d. Sistem energi hidrogen
- e. Aerospace dan transportasi

Kombinasi bobot ringan, ketahanan tinggi, dan fungsi magnetik menjadikan material ini unggul untuk aplikasi modern.

BAB 8. APLIKASI INDUSTRI DAN INOVASI TEKNOLOGI

Perkembangan teknologi material modern menuntut hadirnya material yang memiliki performa tinggi, daya tahan kuat, bobot ringan, serta efisiensi biaya. Salah satu pendekatan yang banyak digunakan untuk memenuhi kebutuhan tersebut adalah rekayasa permukaan melalui pelapisan logam, termasuk pemanfaatan lapisan Monel pada substrat aluminium.

Lapisan Monel, yang berbasis paduan Ni-Cu, dikenal memiliki ketahanan korosi yang sangat baik, kekuatan mekanik yang tinggi, serta stabilitas kimia dan termal yang unggul. Kombinasi antara keunggulan Monel dan ringan serta ekonomisnya aluminium menjadikan sistem ini sangat potensial untuk berbagai aplikasi industri dan inovasi teknologi masa depan.

A. Aplikasi Lapisan Monel dalam Industri Maritim dan Kelautan

Lingkungan laut merupakan salah satu lingkungan paling agresif terhadap material logam akibat paparan air asin, ion klorida, dan kelembapan tinggi. Oleh karena itu, material yang digunakan di sektor maritim harus memiliki ketahanan korosi yang sangat baik.

Lapisan Monel banyak digunakan untuk:

- Komponen kapal dan peralatan laut
- Pipa dan sistem perpompaan air laut

- Katup, sambungan, dan fitting kelautan
- Struktur pelindung di pelabuhan dan fasilitas pesisir

Ketahanan Monel terhadap korosi celah, korosi sumuran, dan korosi galvanik menjadikannya pilihan yang unggul dibandingkan baja karbon atau baja tahan karat dalam lingkungan laut ekstrem.

Penggunaan lapisan Monel pada aluminium memungkinkan terciptanya komponen yang:

- Lebih ringan
- Lebih tahan korosi
- Lebih hemat biaya dibanding Monel pejal

B. Pemanfaatan dalam Industri Minyak, Gas, dan Petrokimia

Industri minyak dan gas beroperasi dalam kondisi ekstrem, seperti:

- Suhu tinggi
- Tekanan tinggi
- Lingkungan kimia agresif
- Paparan gas korosif seperti H_2S dan CO_2

Lapisan Monel digunakan pada:

- Peralatan pengeboran
- Sistem perpipaan fluida korosif
- Katup tekanan tinggi
- Heat exchanger dan reaktor kimia

Ketahanan Monel terhadap retak akibat korosi tegangan (*stress corrosion cracking*) dan degradasi kimia menjadikannya sangat cocok untuk industri petrokimia.

Pelapisan Monel pada aluminium dapat mengurangi bobot peralatan tanpa mengorbankan ketahanan kimia.

C. Aplikasi pada Industri Dirgantara dan Otomotif

Sektor dirgantara dan otomotif sangat mengutamakan material ringan namun kuat, guna meningkatkan efisiensi bahan bakar dan performa kendaraan. Lapisan Monel pada Al berpotensi digunakan untuk:

- Komponen struktural pesawat
- Sistem perlindungan korosi pada rangka Al
- Bagian mesin dan komponen panas
- Kendaraan listrik dan mobil performa tinggi

Keunggulan utama sistem ini meliputi:

- Rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi
- Ketahanan aus dan korosi
- Umur pakai lebih panjang
- Efisiensi energi dan biaya perawatan lebih rendah

D. Aplikasi dalam Industri Elektronik dan Sensor

Paduan Monel memiliki sifat elektrik dan magnetik yang dapat dikontrol, sehingga berpotensi digunakan dalam:

- Sensor magnetik
- Perangkat aktuator
- Komponen elektronik presisi
- Pelindung elektromagnetik (*EMI shielding*)

Lapisan Monel dapat direkayasa untuk menghasilkan:

- Respons magnetik tertentu
- Konduktivitas listrik yang stabil
- Ketahanan terhadap degradasi lingkungan

Hal ini membuka peluang pemanfaatan dalam *Internet of Things* (IoT), robotika, serta perangkat elektronik generasi baru.

E. Peran dalam Teknologi Energi dan Elektrokimia

Lapisan Monel juga memiliki potensi dalam bidang energi dan elektrokimia, khususnya dalam:

- Elektroliser air untuk produksi hidrogen
- Elektrokatalis reaksi evolusi hidrogen (HER)
- Sel bahan bakar (*fuel cell*)
- Superkapasitor dan baterai

Ketahanan elektrokimia Monel memungkinkan penggunaannya dalam lingkungan reaktif, sementara substrat aluminium membantu mengurangi bobot dan biaya produksi.

Inovasi dalam bidang ini mendukung transisi menuju energi bersih dan teknologi ramah lingkungan.

F. Inovasi Teknologi dalam Elektrodeposisi Lapisan Monel

Teknologi elektrodeposisi terus berkembang dengan pendekatan inovatif, antara lain:

1. Elektrodeposisi Presisi Tinggi
Penggunaan sistem kontrol digital untuk mengatur:
 - a. Rapat arus
 - b. Tegangan
 - c. Suhu
 - d. pH
 - e. Komposisi larutan

Teknologi ini memungkinkan produksi lapisan dengan ketebalan seragam dan struktur mikro terkendali.

2. Elektrodeposisi Berbasis Nano
Pengembangan lapisan nano-terstruktur untuk meningkatkan:
 - a. Kekerasan
 - b. Ketahanan aus
 - c. Aktivitas katalitik
 - d. Respons magnetik
3. Elektrodeposisi Ramah Lingkungan
Inovasi menuju:
 - a. Elektrolit rendah toksisitas
 - b. Pengurangan limbah kimia
 - c. Efisiensi energi lebih tinggi
 - d. Proses daur ulang logam

G. Integrasi dengan Manufaktur Cerdas (*Smart Manufacturing*)

Teknologi pelapisan modern semakin terintegrasi dengan:

1. Otomatisasi industri
2. Sensor pemantauan real-time
3. Kecerdasan buatan (AI)
4. *Internet of Things* (IoT)

Integrasi ini memungkinkan:

1. Kontrol kualitas otomatis
2. Prediksi kegagalan material
3. Optimasi parameter produksi
4. Efisiensi proses yang lebih tinggi

Dengan demikian, elektrodeposisi Monel dapat menjadi bagian dari ekosistem manufaktur cerdas di era Industri 4.0.

H. Tantangan dan Peluang Pengembangan Teknologi

1. Tantangan Utama
 - a. Biaya bahan baku Ni
 - b. Kompleksitas kontrol komposisi paduan
 - c. Optimasi stabilitas larutan elektrolit
 - d. Skala produksi industri
2. Peluang Masa Depan
 - a. Pengembangan paduan Monel alternatif berbiaya lebih rendah
 - b. Pelapisan multifungsi (korosi + magnetik + katalitik)
 - c. Integrasi dengan material komposit dan struktur ringan
 - d. Penerapan dalam teknologi energi terbarukan

I. Kontribusi terhadap Keberlanjutan dan Ekonomi Material

Pemanfaatan lapisan Monel pada aluminium mendukung:

- Pengurangan konsumsi logam mahal
- Efisiensi sumber daya
- Perpanjangan umur pakai komponen
- Pengurangan limbah industri

Dengan pendekatan ini, teknologi pelapisan tidak hanya meningkatkan performa material, tetapi juga

berkontribusi pada ekonomi sirkular dan keberlanjutan lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Albasre, Nur Mashitah, and Mohd Hazwan Hussin. 2021. "The Study of Electroless Ni-Cu-P Plating on Corrosion Resistance of Aluminium The Study of Electroless Ni-Cu-P Plating on Corrosion Resistance of Aluminium in 3 . 5 % NaCl." 9(March): 12–26.
- Alizadeh, Morteza, and Hamed Safaei. 2018. "Characterization of Ni-Cu Matrix, Al₂O₃ Reinforced Nano-Composite Coatings Prepared by Electrodeposition." *Applied Surface Science* 456(June): 195–203. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.06.095>.
- Basori, Basori et al. 2023. "Effect of KOH Concentration on Corrosion Behavior and Surface Morphology of Stainless Steel 316L for HHO Generator Application." *Journal of Electrochemical Science and Engineering* 13(3): 451–67.
- Basori, B., Ajiriyanto, M. K., Kriswarini, R., Hardiyanti, H., Rosyidan, C., Yudanto, S. D., ... & Susetyo, F. B. (2025). Rotating speed and magnetic pole dependency assisted on copper deposition onto aluminum alloy substrate for bacterial eradication application. *Communications in Science and Technology*, 10(1), 17-28.

- Budi, Setia et al. 2020. "Saccharin-Assisted Galvanostatic Electrodeposition of Nanocrystalline FeCo Films on a Flexible Substrate." *International Journal of Electrochemical Science* 15: 6682–94.
- Callister, William D., and David G. Rethwisch. 2014. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 9th ed. eds. Daniel Sayfe, James Metzger, and MaryAnn Price. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Durmus, Yasin Emre et al. 2019. "Influence of Al Alloying on the Electrochemical Behavior of Zn Electrodes for Zn–Air Batteries With Neutral Sodium Chloride Electrolyte." *Frontiers in Chemistry* 7(November): 1–13.
- Evans, R. F.L. et al. 2014. "Atomistic Spin Model Simulations of Magnetic Nanomaterials." *Journal of Physics Condensed Matter* 26(10).
- Fukunaka, Y., H. Doi, and Y. Kondo. 1990. "Structural Variation of Electrodeposited Copper Film with the Addition of an Excess Amount of H₂ SO₄." *Journal of The Electrochemical Society* 137(1): 88–93.
- Ganesan, Muthusankar et al. 2021. "Post-Supercritical CO₂ Electrodeposition Approach for Ni-Cu Alloy Fabrication: An Innovative Eco-Friendly Strategy for High-Performance Corrosion Resistance with Durability." *Applied Surface Science* (November).

- Geramipour, F., S. M. Mousavi Khoei, and H. Shooshtari Gugtapeh. 2021. "Effect of Shaped Waveform on Structure and Electrochemical Corrosion Behavior of Pulse Electrodeposited Ni[Sbnd]Cu Alloy Coatings." *Surface and Coatings Technology* 424(August).
- Di Gianfrancesco, Augusto. 2017. *Materials for Ultra-Supercritical and Advanced Ultra-Supercritical Power Plants Technologies for Chemical Analyses, Microstructural and Inspection Investigations*. Rome: Elsevier Ltd.
- Goranova, D., R. Rashkov, G. Avdeev, and V. Tonchev. 2016. "Electrodeposition of Ni–Cu Alloys at High Current Densities: Details of the Elements Distribution." *Journal of Materials Science* 51(18): 8663–73.
- Goranova, Desislava, Georgi Avdeev, and Rashko Rashkov. 2014. "Electrodeposition and Characterization of Ni-Cu Alloys." *Surface and Coatings Technology* 240: 204–10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.12.014>.
- Goyal, Bindu et al. 2018. "Electroplating of Nickel and Chromium on Aluminum 6082-T6 Alloy." (February 2018).
- Grimshaw, Pengpeng, Joseph M. Calo, and George Hradil. 2011. "III. Co-Electrodeposition/Removal of Copper and Nickel in a Spouted Electrochemical

- Reactor." *Industrial and Engineering Chemistry Research* 50(16): 9532–38.
- Hamidah, Ida et al. 2021. "Corrosion of Copper Alloys in KOH, NaOH, NaCl, and HCl Electrolyte Solutions and Its Impact to the Mechanical Properties." *Alexandria Engineering Journal* 60(2): 2235–43.
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.12.027>.
- Handayani, Ade Silvia et al. 2020. "Pemanfaatan Aplikasi Simulasi Rangkaian Listrik Sebagai Media Pembelajaran Fisika." *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*.
- Huang, You guo et al. 2016. "The Effect of Graphene for the Hydrogen Evolution Reaction in Alkaline Medium." *International Journal of Hydrogen Energy* 41(6): 3786–93.
- Karunakaran, M., M. Pugazhivadivu, V. Gunasegaran, and G. Gowtham. 2018. "Electrodeposition of Cu-Ni-P-W Composite on Al-6063 Substrate." *International Journal of Scientific Research in Physics and Applied Sciences*.
- Korchef, Atef, and Abdelkrim Kahoul. 2013. "Corrosion Behavior of Commercial Aluminum Alloy Processed by Equal Channel Angular Pressing." *International Journal of Corrosion*.
- Lee, Wen His, and K. C. Chung. 2020. "Investigation of a Copper–Nickel Alloy Resistor Using Co-Electrodeposition." *Journal of Applied Electrochemistry* 50(5): 535–47.

- Li, Baosong, Tianyong Mei, Dandan Li, Shengsong Du, et al. 2019. "Structural and Corrosion Behavior of Ni-Cu and Ni-Cu/ZrO₂ Composite Coating Electrodeposited from Sulphate-Citrate Bath at Low Cu Concentration with Additives." *Journal of Alloys and Compounds* 804: 192–201. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.381>.
- Lotfi, N., T. Shahrabi, Y. Yaghoubinezhad, and Gh Barati Darband. 2019. "Surface Modification of Ni Foam by the Dendrite Ni-Cu Electrode for Hydrogen Evolution Reaction in an Alkaline Solution." *Journal of Electroanalytical Chemistry* 848.
- Mae, Yoshiharu. 2016. "What the Darken–Gurry Plot Means About the Solubility of Elements in Metals." *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science* 47(12): 6498–6506.
- Mahallawy, N. A. El, M. A. Shoeib, and M. H. Abouelenain. 2011. "AZ91 Magnesium Alloys: Anodizing of Using Environmental Friendly Electrolytes." *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology* 01(02): 62–72.
- Mahmood, Javeed et al. 2017. "An Efficient and PH-Universal Ruthenium-Based Catalyst for the Hydrogen Evolution Reaction." *Nature Nanotechnology* 12(5): 441–46. <http://dx.doi.org/10.1038/nnano.2016.304>.

- Marrone, Pierpaolo. 2013. 15 Etica e Politica Chambers, RT.
- Mohamad, W. M. F. W., Tamaldin, N., Mansor, M. R., Ajiriyanto, M. K., Nugroho, A., Kriswarini, R., ... & Susetyo, F. B. (2025). Investigation Of Alkaline Solution Temperature Increment Influence Onto SS316L Surface. 淡江理工學刊, 28(10), 2177-2186.
- Nady, H., and M. Negem. 2016. "Ni-Cu Nano-Crystalline Alloys for Efficient Electrochemical Hydrogen Production in Acid Water." RSC Advances 6(56): 51111–19.
- Nath, Prekshya, Deepak Kumar Sahu, and Archana Mallik. 2016. "Physicochemical and Corrosion Properties of Sono-Electrodeposited Cu-Ni Thin Films." Surface and Coatings Technology 307: 772–80. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.09.085>.
- Newbury, Dale E., and Nicholas W.M. Ritchie. 2019. "Electron-Excited X-Ray Microanalysis by Energy Dispersive Spectrometry at 50: Analytical Accuracy, Precision, Trace Sensitivity, and Quantitative Compositional Mapping." Microscopy and Microanalysis.
- Pellicer, Eva et al. 2010. "983-991 Nanocrystalline Electroplated Cu-Ni: Metallic Thin Films with Enhanced Mechanical Properties and Tunable Magnetic Behavior." Advanced Functional Materials 20(6): 983–91.

- Pingale, Ajay D. et al. 2021. "Recent Researches on Cu-Ni Alloy Matrix Composites through Electrodeposition and Powder Metallurgy Methods: A Review." *Materials Today: Proceedings* 47: 3301–8.
- Pingale, Ajay D., Sachin U. Belgamwar, and Jitendra S. Rathore. 2020. "Effect of Graphene Nanoplatelets Addition on the Mechanical, Tribological and Corrosion Properties of Cu–Ni/Gr Nanocomposite Coatings by Electro-Co-Deposition Method." *Transactions of the Indian Institute of Metals* 73(1): 99–107. <https://doi.org/10.1007/s12666-019-01807-9>.
- Pingale, Ajay D., Sachin U. Belgamwar, and Jitendra S. Rathore. 2020. "Synthesis and Characterization of Cu–Ni/Gr Nanocomposite Coatings by Electro-Co-Deposition Method: Effect of Current Density." *Bulletin of Materials Science* 43(1): 1–9. <https://doi.org/10.1007/s12034-019-2031-x>.
- Pranjono, Torowati, Banawa Sri Galuh, and Lilis Windaryati. 2015. "Pengukuran Kekasaran Permukaan Pelet UO₂ Menggunakan Alat Roughness Tester Surtronic 25."
- Putra, Valentinus Galih Vidia, Endah Purnomosari, and Ngadiyono. 2019. *Pengantar Praktikum Mekatronika Tekstil Pengantar Praktikum Mekatronika Tekstil*.

- Rees, William S. 1995. "Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings: Science, Technology and Applications, 2nd Edition: Edited By Rointan F. Bunshah, Noyes, Park Ridge, NJ, 1994, XXVI, 861 Pp., Hardcover, \$ 98.00, ISBN 0-81 55-13372." Advanced Materials 7(1): 96–96.
- Rosyidan, C., Kurniawan, B., Soegijono, B., Maulani, M., Samura, L., Nababan, F. G., ... & Susetyo, F. B. (2024). Nickel Salt Dependency as Catalyst in the Plating Bath on the Film Properties of Cu/Cu-Ni. Science and Technology Indonesia, 9(3), 529-538.
- Rosyidan, C., Kurniawan, B., Soegijono, B., Vidia, P. V., Munazat, D. R., & Susetyo, F. B. (2024). Effect of current density on magnetic and hardness properties of Ni-Cu alloy coated on Al via electrodeposition.
- Rwawiire, Samson. 2014. "Prediction of Polyester/Cotton Ring Spun Yarn Unevenness Using Adaptive Neuro Fuzzy Inference System." Journal of Textile and Apparel, Technology and Management 8(4).
- Samura, L., Maulani, M., & Rosyidan, C. BUKU PEDOMAN PEMBELAJARAN INTEGRAL FUNGSI SATU VARIABEL DAN PENERAPANNYA.
- Sarac, Umut, and M. Celalettin Baykul. 2013. "Morphological and Microstructural Properties of Two-Phase Ni-Cu Films Electrodeposited at Different Electrolyte

- Temperatures." *Journal of Alloys and Compounds*.
- Sarac, Umut, and M. Celalettin Baykul. 2014. "Microstructural and Morphological Characterizations of Nanocrystalline Ni-Cu-Fe Thin Films Electrodeposited from Electrolytes with Different Fe Ion Concentrations." *Journal of Materials Science*:
- Susetyo, F. B., B. Soegijono, and Yusmaniar. 2021. "Effect of a Constant Magnet Position and Intensity on a Copper Layer Obtained by DC Electrodeposition." *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition* 10(2): 766–82.
- Syamsuir, S et al. 2023. "Electrolyte Temperature Dependency of Electrodeposited Nickel in Sulfate Solution on the Hardness and Corrosion Behaviors." 36(06): 1193–1200.
- Syamsuir, S., Susetyo, F. B., Soegijono, B., Yudanto, S. D., Basori, B., Ajiriyanto, M. K., ... & Rosyidan, C. (2023). Rotating-Magnetic-Field-Assisted Electrodeposition of Copper for Ambulance Medical Equipment. *Automotive Experiences*, 6(2), 290-302.
- Tang, Xue Ti, Gwo Ching Wang, and Mutsuhiro Shima. 2007. "Magnetic Layer Thickness Dependence of Magnetization Reversal in Electrodeposited CoNi/Cu Multilayer Nanowires." *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 309(2): 188–96.

- Wang, Chao, Md Emran Hossain Bhuiyan, Salvador Moreno, and Majid Minary-Jolandan. 2020. "Direct-Write Printing Copper-Nickel (Cu/Ni) Alloy with Controlled Composition from a Single Electrolyte Using Co-Electrodeposition." *ACS Applied Materials and Interfaces* 12(16): 18683–91.
- Wang, Dan et al. 2014. "Corrosion Control of Copper in 3.5 Wt.% NaCl Solution by Domperidone: Experimental and Theoretical Study." *Corrosion Science* 85: 77–86.
- Wang, T., and W. Chen. 2015. "Effects of Rotating Magnetic Fields on Nickel Electro-Deposition." *ECS Electrochemistry Letters* 4(6): D14–17.
- Zhang, Yong et al. 2014. "Microstructures and Properties of High-Entropy Alloys." *Progress in Materials Science* 61(October 2013): 1–93. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.10.001>.

BIOGRAFI PENULIS

1. Dr. Cahaya Rosyidan, S.Si., M.Sc.



Penulis dilahirkan di Semarang, 23 Januari 1986. Menempuh pendidikan Sarjana (S1) di Jurusan Fisika, Universitas Negeri Semarang (UNNES) pada tahun 2009, Magister Fisika di Universitas Gadjah Mada Tahun 2012, dan Doktor di Universitas Indonesia 2024 pada program studi Ilmu Bahan. Sejak tahun 2013, beliau aktif sebagai dosen pada Program Studi Teknik Perminyakan, Fakultas Teknologi Kebumian dan Energi (FTKE), Universitas Trisakti, dengan fokus pada pengembangan pendidikan, penelitian, dan penguatan kapasitas akademik di bidang material terapan.

Di tingkat institusional, saat ini menjabat sebagai Kepala Pusat Publikasi dan Karya Ilmiah LPPM Universitas Trisakti, dan Ketua Jaminan Mutu Fakultas Universitas Trisakti. Rekam jejak pendanaan riset meliputi perolehan satu Hibah Buku Ajar dari Kemenristekdikti (2018), dan penelitian BIMA (2024–2025) baik sebagai anggota maupun menjadi ketua. Hingga kini, telah menghasilkan buku ajar di bidang matematika dan buku monograf, serta berperan sebagai Chief Editor Jurnal PETRO: Jurnal Ilmiah Teknik Perminyakan SINTA 4. Selain itu pada tahun 2026 menghasilkan paten sederhana (granted).

2. Dr. Budhy Kurniawan



Penulis dilahirkan pada 16 Juli 1968. Menyelesaikan pendidikan Sarjana (S1) di Jurusan Fisika, Universitas Indonesia (UI) pada tahun 1992. Pada tahun 1995 menyelesaikan pendidikan Magister (S2) pada Program Studi Fisika di Universitas Indonesia (UI). Menyelesaikan program Doktor di Tokyo Institute of Technology pada tahun 2000. Beliau aktif sebagai dosen pada Program Studi S2 & S3 Ilmu Bahan, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA), Universitas Indonesia. Bidang keahlian beliau Fisika Zat Terkondensasi (Eksperimental) dan Bidang Riset Terkini: Kajian sifat listrik dan magnetik material fungsional berbasis senyawa manganit lantanum .

Selain mengajar beliau juga banyak menghasilkan karya tulis, sebanyak 127 artikel telah dipublikasikan dengan disitasi lebih dari 1000 kali. Beberapa penghargaan juga diperoleh diantaranya : *Referee for Hidrogen Energy Journal, Referee for Progress in Organic Coatings, Referee for Arabian Journal of Chemistry, Referee for Koren Magnetic Society, Referee for International Journal of Nano and Biomaterials, Referee for Key Engineering Materials, Referee for Materials Sciene and Engineering B, Referee for Ceramics International, Referee for Materials Express, Referee for South African Journal of Chemical Engnnering, Referee for Atmospheric Pollution Research.*

3. Prof. Dr. Bambang Soegijono



Penulis lahir tahun 1956. Pendidikan Sarjana Fisika dan Magister Ilmu Material di Universitas Indonesia, serta Doktoral di Ecole Centrale de Lyon Perancis, lulus tahun 1992.

Kariernya dimulai sejak tahun 1982, sebagai pegawai negeri sipil di departemen Fisika Universitas Indonesia. Selain sebagai PNS, terlibat di berbagai kegiatan konsultan Pendidikan sampai tahun 1986. Tahun 1995 sampai 2002, sebagai ketua Departemen Fisika, Tahun 2002-2007 terlibat sebagai anggota Majelis Wali Amanat Universitas Indonesia. Tahun 2023, sebagai Dekan Fakultas Sains dan Teknik Informatik di Institut Sains dan Teknologi (ISTN)

Saat ini, selain memegang structural di ISTN, juga terlibat di perusahaan pengolahan air limbah. Artificial Intellengence sebagai salah satu kegiatan pembelajaran yang ditekuni sampai hari tua.

Bambang Soegijono menikah tahun 1992 dan mempunyai 2 orang putra dan putri yang sudah menjadi dokter. Hobinya berburu ilmu pengetahuan dan teknologi serta Science fiction

4. Dr. Ferry Budhi Susetyo, MT., M.Si



Penulis dilahirkan di Jakarta pada 2 Februari 1982. Berpengalaman mengajar di Fakultas Teknik Universitas Negeri Jakarta dari Tahun 2011 sampai dengan saat ini. Pendidikan yang pernah di tempuh, menamatkan Pendidikan Sarjana Teknik di Universitas Lampung Tahun 2005, Magister Teknik di Universitas Pancasila Tahun 2008, Magister Sains di Universitas Indonesia Tahun 2010 dan Doktor di Universitas Indonesia 2021. Pernah bekerja di PT. Selamat Sempurna Tbk Tahun 2006-2008 sebagai Staf Engineering Process dan PT. National Energy Solutions Tahun 2009-2011 sebagai Corrosion Engineering. Saat ini Penulis fokus meneliti bidang Welding dan Material Engineering.

5. Dra. Lisa Samura, MT



Penulis menyelesaikan pendidikan Sarjana (S1) di Jurusan Matematika, Institut Teknologi Bandung (ITB) pada tahun 1991. Pada tahun 2024 menyelesaikan pendidikan Magister (S2) pada Program Studi Teknik Industri. Beliau aktif sebagai dosen pada Program Studi Teknik Perminyakan, Fakultas Teknologi Kebumihan dan Energi (FTKE), Universitas Trisakti, dengan fokus pada pengembangan pendidikan, penelitian, dan penguatan kapasitas akademik di bidang matematika terapan dan rekayasa industri dalam konteks energi dan kebumihan.

Pada tahun 2018 memperoleh Hibah Buku Ajar dan Pedoman Kemenristekdikti dan hibah penelitian BIMA pada tahun 2024-2025. Beliau telah menghasilkan dua buku ajar Integral Fungsi Satu Variabel dan Integral Dalam Ruang Dimensi 2&3 serta dua buku monograf : Persamaan Diferensial Biasa Orde n dan Sistem Persamaan Linier dengan n Variabel.

6. Dra. Mustamina Maulani, MT



Penulis menempuh pendidikan Sarjana (S1) di Jurusan Matematika, Institut Teknologi Bandung (ITB) pada tahun 1986 dan melanjutkan pendidikan Magister (S2) pada Program Studi Teknik Industri, Universitas Trisakti, yang diselesaikan pada tahun 2003. Sejak tahun 2016, beliau aktif sebagai dosen pada Program Studi Teknik Perminyakan, Fakultas Teknologi Kebumihan dan Energi (FTKE), Universitas Trisakti, dengan fokus pada pengembangan pendidikan, penelitian, dan penguatan kapasitas akademik di bidang matematika terapan dan rekayasa industri dalam konteks energi dan kebumihan.

Di tingkat institusional, saat ini menjabat sebagai Kepala Pusat Pendidikan dan Sarana Prasarana LPPM Universitas Trisakti, Wakil Direktur Badan Afiliasi Universitas Trisakti, serta Ketua Promosi FTKE Universitas Trisakti. Rekam jejak pendanaan riset dan pengabdian meliputi perolehan dua Hibah Buku Ajar dari Kemenristekdikti (2018), keikutsertaan dalam Hibah Konsorsium Riset dan Inovasi (2020, Tahap I dan II), serta Hibah Pengabdian kepada Masyarakat (PkM) MBKM (2022) serta hibah PkM dan penelitian BIMA (2023–2025). Hingga kini, buku yang dihasilkan

empat buku ajar di bidang matematika dan dua buku monograf, serta berperan sebagai Chief Editor Jurnal Penelitian dan Karya Ilmiah LPPM Universitas Trisakti.

7. Larasati Rizky Putri, S.Pd, M.Pd.



Penulis merupakan Dosen, penulis, dan peneliti bidang sains, pendidikan fisika dan instrumentasi fisika di bidang Teknik Mesin. Penulis kelahiran Tangerang (1992). Meraih gelar sarjana (S.Pd.) dari Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Jurusan Pendidikan Fisika, Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. Hamka (2014). Melanjutkan studi magister (M.Pd.) di Universitas Negeri Jakarta, Jurusan Pendidikan Fisika (2020). Sejak tahun 2016 penulis aktif sebagai Dosen Fisika Teknik di Universitas Muhammadiyah Tangerang dan Dosen Pendidikan diantaranya mata kuliah Strategi Pembelajaran IPA, Konsep Dasar IPA dan Keterampilan Menulis di Universitas Terbuka (2024). Penulis berperan aktif dalam kegiatan kuliah umum, seminar, memberikan pelatihan pembelajaran dan inovasi teknologi pendidikan fisika kepada Masyarakat. Penulis berhasil memperoleh juara pada lomba inovasi IT dalam kegiatan pendidikan dan pengajaran (Juara 2) dan aktif menulis buku, modul dan artikel penelitian di bidang teknologi dan sains, serta telah melahirkan hak kekayaan intelektual berupa Modul Pembelajaran Praktikum Fisika Gerak Harmonik Sederhana Berbasis Aplikasi *Phyphox* dan Modul Percobaan Fisika: Roket Air, baik cetak maupun digital.

Saat ini, penulis bekerja sebagai Dosen tetap di Jurusan Teknik Mesin, Universitas Trisakti Jakarta dan diamanahkan sebagai Koordinator Laboratorium Fisika di Fakultas Teknologi Industri. Penulis mengampu beberapa mata kuliah di bidang Fisika Teknik yang diantaranya, Fisika Mekanika, Fisika Panas, Fisika Listrik dan Magnet, Fisika Gelombang Bunyi Optik dan Praktikum Fisika Teknik. Penulis telah terlibat dalam pembuatan buku referensi Fisika Mekanika dan buku ajar Perpindahan Panas yang diterbitkan pada tahun 2023 bersama rekan dosen Fisika di Universitas Trisakti.

8. Dr. Kartika Fajarwati Hartono, ST., MT



Penulis menempuh pendidikan Sarjana (S1) di Jurusan Teknik Kimia, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) pada tahun 2006 dan melanjutkan pendidikan Magister (S2) pada Program Studi Teknik Perminyakan, Institut Teknologi Bandung (ITB) sebagai penerima *Total E&P Scholarship*, yang diselesaikan pada tahun 2012 yang kemudian sempat bekerja di dunia Industri multinasional Oil and Gas PT. Chevron Pacific Indonesia di Duri, Riau. Tahun 2015, penulis aktif sebagai dosen tetap pada Program Studi Teknik Perminyakan, Fakultas Teknologi Kebumihan dan Energi (FTKE), Universitas Trisakti. Pada tahun 2019, beliau melanjutkan studi Doktorat di Program Studi Teknik Perminyakan Institut Teknologi Bandung (ITB) dengan konsentrasi riset pada bidang *Enhanced Oil Recovery (EOR)* – Teknik Reservoir dan lulus pada tahun 2024. Saat ini, penulis aktif di Dewan Riset dan Pengabdian Masyarakat sebagai Kepala Pelaksana Harian Fakultas.

BIOGRAFI EDITOR

Fahmi Rizal, S.Si., M.Biomed



Editor merupakan dosen dan akademisi di bidang kimia dan biomedik dengan latar belakang keilmuan dalam Kimia FMIPA dan Ilmu Biomedik (Kimia Klinik) dari Universitas Hasanuddin. Ia lahir di Maros pada 27 Maret 1989 dan memiliki pengalaman luas dalam pendidikan tinggi, penelitian, serta penulisan ilmiah.

Saat ini, editor aktif sebagai dosen di Jurusan D3 keperawatan Fakultas Kedokteran dan Ilmu Kesehatan dan pernah aktif juga sebagai dosen di Jurusan Kimia Fakultas Teknik serta Program studi Kedokteran Universitas Bangka Belitung. Pengalaman profesionalnya mencakup peran sebagai asisten laboratorium Kimia Dasar dan Kimia Anorganik di Universitas Hasanuddin, serta keterlibatan di sektor industri.

Sebagai editor ilmiah, memiliki kompetensi dalam pengolahan data kualitatif dan kuantitatif, penulisan karya ilmiah, serta penguasaan perangkat lunak pendukung seperti Microsoft Office dan SPSS. Dengan pengalaman organisasi yang kuat dan dedikasi terhadap mutu akademik, editor berkomitmen mendukung kualitas naskah ilmiah, buku akademik, dan publikasi penelitian.

SINOPSIS

Buku monograf ini menyajikan pembahasan komprehensif mengenai paduan Ni–Cu (Monel) dan penerapannya dalam teknologi elektrodeposisi pada substrat aluminium sebagai solusi inovatif dalam rekayasa material modern. Disusun secara sistematis, buku ini mengintegrasikan teori dasar ilmu material, mekanisme elektrokimia, metode sintesis, teknik karakterisasi, serta evaluasi sifat fungsional material.

Pembahasan diawali dengan pengantar tentang peran strategis Monel dalam industri dan keterbatasannya sebagai material pejal, diikuti dengan uraian sifat aluminium, Ni, dan Cu dari perspektif struktur kristal, magnetik, dan elektrokimia. Buku ini kemudian menjelaskan teori dan mekanisme elektrodeposisi, termasuk hukum Faraday, transport ion, nukleasi, dan pertumbuhan lapisan, yang menjadi dasar dalam pembentukan lapisan paduan berkualitas tinggi.

Proses sintesis lapisan Monel dijelaskan secara rinci, mencakup preparasi substrat, komposisi elektrolit, parameter deposisi, serta prosedur eksperimental. Teknik karakterisasi seperti *X-ray Diffraction* (XRD), *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS), dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) digunakan untuk menganalisis struktur kristal, komposisi, morfologi, dan ketebalan lapisan.

Selanjutnya, buku ini mengulas sifat mekanik, magnetik, dan elektrokimia lapisan Monel, termasuk ketahanan korosi dan kinerja elektrokimia. Sebagai

penutup, buku ini membahas aplikasi industri dan inovasi teknologi, mulai dari sektor maritim hingga energi dan manufaktur cerdas. Buku ini ditujukan sebagai referensi ilmiah bagi akademisi, peneliti, dan praktisi industri yang tertarik pada rekayasa material dan teknologi pelapisan modern.

Buku monograf ini menyajikan pembahasan komprehensif mengenai paduan nikel-tembaga (Monel) dan penerapannya dalam teknologi elektrodeposisi pada substrat aluminium sebagai solusi inovatif dalam rekayasa material modern.

Disusun secara sistematis, buku ini mengintegrasikan teori dasar ilmu material, mekanisme elektrokimia, metode sintesis, teknik karakterisasi, serta evaluasi sifat fungsional material.

Pembahasan diawali dengan pengantar tentang peran strategis Monel dalam industri dan keterbatasannya sebagai material pejal, diikuti dengan uraian sifat aluminium, nikel, dan tembaga dari perspektif struktur kristal, magnetik, dan elektrokimia. Buku ini kemudian menjelaskan teori dan mekanisme elektrodeposisi, termasuk hukum Faraday, transport ion, nukleasi, dan pertumbuhan lapisan, yang menjadi dasar dalam pembentukan lapisan paduan berkualitas tinggi.

Proses sintesis lapisan Monel dijelaskan secara rinci, mencakup preparasi substrat, komposisi elektrolit, parameter deposisi, serta prosedur eksperimental. Teknik karakterisasi seperti X-ray Diffraction (XRD), Energy Dispersive Spectroscopy (EDS), dan Scanning Electron Microscopy (SEM) digunakan untuk menganalisis struktur kristal, komposisi, morfologi, dan ketebalan lapisan.

Selanjutnya, buku ini mengulas sifat mekanik, magnetik, dan elektrokimia lapisan Monel, termasuk ketahanan korosi dan kinerja elektrokimia. Sebagai penutup, buku ini membahas aplikasi industri dan inovasi teknologi, mulai dari sektor maritim hingga energi dan manufaktur cerdas. Buku ini ditujukan sebagai referensi ilmiah bagi akademisi, peneliti, dan praktisi industri yang tertarik pada rekayasa material dan teknologi pelapisan modern.