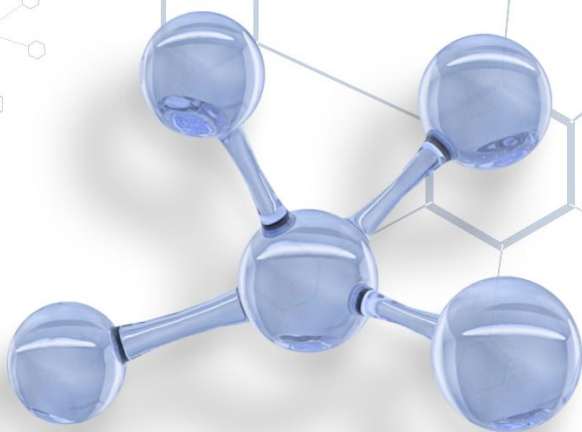


ELEKTRODEPOSISI PADUAN MONEL PADA ALUMINIUM:

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