

MONOGRAF

Sintesis Lapisan Tipis Cu/Ni dengan Metode Elektroplating Berbantuan Medan Magnet Pada Variasi Waktu Deposisi

Muthi'ah Lutfia Khansa
Dr. Moh. Toifur, M.Si
Dr. Guntur Maruto, S.U
Okimustava, M.Pd.Si
Yudhiakto Pramudya, Ph.D



MONOGRAF

Sintesis Lapisan Tipis Cu/Ni dengan Metode Elektroplating Berbantuan Medan Magnet Pada Variasi Waktu Deposisi

Muthi'ah Lutfia Khansa
Dr. Moh. Toifur, M.Si
Dr. Guntur Maruto, S.U
Okimustava, M.Pd.Si
Yudhiakto Pramudya, Ph.D.



Penerbit K-Media
Yogyakarta, 2019



**MONOGRAF; SINTESIS LAPISAN TIPIS Cu/Ni DENGAN
METODE ELEKTROPLATING BERBANTUAN MEDAN
MAGNET PADA VARIASI WAKTU DEPOSISI**

viii + 65 hlm.; 14 x 20 cm

ISBN: 978-602-451-626-0

Penulis : Muthi'ah Lutfia Khansa... [et al.]
Content Review : Dr. Arief Hermanto dan Drs. Ishafit, M.Si.
Design Review : Dr. Widodo dan Ariati Dina P, M.Pd.
Tata Letak : Mentari Eka Wahyuni
Desain Sampul : Eko Susanto
Cetakan : November 2019

Copyright © 2019 by Penerbit K-Media
All rights reserved

Hak Cipta dilindungi Undang-Undang No 19 Tahun 2002.

Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektris mau pun mekanis, termasuk memfotocopy, merekam atau dengan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penulis dan Penerbit.

Isi di luar tanggung jawab percetakan

Penerbit K-Media
Anggota IKAPI No.106/DIY/2018
Banguntapan, Bantul, Yogyakarta.
e-mail: kmedia.cv@gmail.com



Kata Pengantar

Alhamdulillahirabbil'alamina, segala puji dan syukur kami panjatkan kepada Allah SWT atas segala rahmat serta inayahNya, sehingga penyusunan monograf ini dapat terselesaikan. Sholawat beserta salam semoga selalu tercurah kepada Nabi Muhammad SAW yang telah membawa umat manusia ke zaman yang terang.

Paket pembelajaran berupa monograf ini disusun dengan harapan dapat membantu dan memudahkan mahasiswa pendidikan fisika dalam melaksanakan eksperimen, yang berkaitan dengan proses penumbuhan lapisan tipis dengan menggunakan metode elektroplating berbantuan medan magnet pada variasi waktu deposisi. Monograf ini dapat digunakan untuk mendukung mata kuliah Sains dan Teknologi Nano di Universitas Ahmad Dahlan.

Selama penyusunan monograf ini, penulis mendapatkan bantuan, dukungan serta bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu pada kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan rasa terima kasih kepada Dr. Moh. Toifur, M.Si. dan Dr. Guntur Maruto, SU yang telah memberikan bimbingan dan arahan selama proses penyusunan monograf, serta semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu yang telah banyak membantu penulis baik secara langsung maupun tidak langsung.

Semoga bantuan dan amal kebaikan yang telah diberikan kepada penulis mendapatkan ridho dari Allah SWT. Penulis menyadari monograf ini jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, kritik dan saran penulis harapkan untuk kesempurnaan monograf ini.

Yogyakarta, November 2019

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR TABEL	vii
I. SENSOR RTD-Film	1
II. MATERIAL PADUAN	
A. Studi Material	4
1. Tembaga	4
2. Nikel	6
B. Elektroplating	7
C. Pengaruh Medan Magnet terhadap Proses Elektroplating.....	11
D. Karakterisasi Bahan	
1. Ketebalan	14
2. Resistivitas	18
3. Resisitivitas Keping.....	20
4. Difraksi Sinar X.....	22
a. Struktur Kristal.....	22
b. Difraksi Sinar X.....	24
5. Sensor Suhu	26
III. ELEKTROPLATING DENGAN VARIASI WAKTU DEPOSISI	
A. Metode Eksperimen.....	31
B. Analisis Data	35
IV. SINTESIS LAPISAN Cu/Ni DENGAN BANTUAN MEDAN MAGNET	
A. Uji Ketebalan Lapisan	39
B. Uji Resistivitas Lapisan.....	40
C. Uji Struktur Mikro.....	49
D. Uji Kinerja Sensor Suhu	53
DAFTAR PUSTAKA	59
DAFTAR SIMBOL	64
GLOSARIUM	65

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1.	Tembaga 5
Gambar 2.	Nikel 6
Gambar 3.	Lilitan kawat berarus pembangkit medan magnet 11
Gambar 4.	Penampang silang solenoid ideal 12
Gambar 5.	Resistivitas listrik vs temperatur untuk bahan tembaga dan tiga paduan tembaga-nikel yang salah satunya mengalami deformasi (Callister and David, 2012) 18
Gambar 6.	Resistivitas listrik pada temperatur ruang vs komposisi pada paduan tembaga-nikel (Callister and David, 2012) 20
Gambar 7.	Skema alat <i>Four Point Probe</i> (Toifur, 2007)..... 21
Gambar 8.	Model sebaran arus pada permukaan lapisan tipis menggunakan probe empat titik (Toifur, 2014)..... 21
Gambar 9.	Bentuk dan posisi struktur Kristal jenis FCC (Callister dan David, 2012) 23
Gambar 10.	a) Difraksi sinar-X dan b) Hubungan intensitas terhadap sudut 2θ Indeks miller 26
Gambar 11.	Rangkaian alat proses elektroplating..... 31
Gambar 12.	Skema <i>Probe</i> empat titik..... 33
Gambar 13.	Rangkaian alat kinerja sensor suhu rendah..... 35
Gambar 14.	Desain litografi sampel (A) Bagian <i>square</i> (B) Bagian sensor RTD 38
Gambar 15.	Sampel tembaga (Cu) sebelum dan sesudah dilapisi dengan nikel (Ni)..... 39
Gambar 16.	Grafik hubungan ketebalan lapisan Ni terhadap waktu deposisi..... 40
Gambar 17.	Grafik hubungan antara V dan I pada sampel A..... 41
Gambar 18.	Grafik hubungan antara V dan I pada sampel B..... 42
Gambar 19.	Grafik hubungan antara V dan I pada sampel C 42
Gambar 20.	Grafik hubungan antara V dan I pada sampel D 43
Gambar 21.	Grafik hubungan antara V dan I pada sampel E..... 43
Gambar 22.	Grafik hubungan antara V dan I pada sampel A ($t = 5s$)..... 45

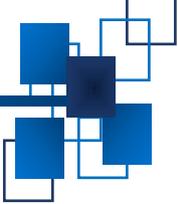
Gambar 23.	Grafik hubungan antara V dan I pada sampel B ($t = 15s$)	45
Gambar 24.	Grafik hubungan antara V dan I pada sampel C ($t = 25s$)	46
Gambar 25.	Grafik hubungan antara V dan I pada sampel D ($t = 35s$)	46
Gambar 26.	Grafik hubungan antara V dan I pada sampel E ($t = 45s$)	47
Gambar 27.	Grafik hubungan antara ΔR_s terhadap variasi t ...	49
Gambar 28.	Spektrum XRD dari lapisan Cu/Ni pada variasi waktu	50
Gambar 29.	Keteraturan kristal Ni setiap sampel dengan variasi waktu deposisi.....	52
Gambar 30.	Grafik hubungan antara tegangan terhadap suhu untuk lapisan tipis Cu/Ni pada waktu deposisi 5 s.....	53
Gambar 31.	Grafik hubungan antara tegangan terhadap suhu untuk lapisan tipis Cu/Ni pada waktu deposisi 15 s.....	54
Gambar 32.	Grafik hubungan antara tegangan terhadap suhu untuk lapisan tipis Cu/Ni pada waktu deposisi 25 s	54
Gambar 33.	Grafik hubungan antara tegangan terhadap suhu untuk lapisan tipis Cu/Ni pada waktu deposisi 35 s.....	55
Gambar 34.	Grafik hubungan antara tegangan terhadap suhu untuk lapisan tipis Cu/Ni pada waktu deposisi 45 s.....	55
Gambar 35.	Pengaruh waktu deposisi terhadap koefisien suhu	57



Daftar Tabel

	Halaman
Tabel 1. Sifat fisis tembaga (Cu)	5
Tabel 2. Sifat fisis nikel (Ni)	7
Tabel 3. Tabulasi data penentuan Resistivitas listrik lapisan tipis.....	33
Tabel 4. Tabulasi data analisis sensor suhu	35
Tabel 5. Hasil pengukuran massa dan tebal lapisan Ni	39
Tabel 6. Persamaan linier antara tegangan (V) dan kuat arus (I) masing-masing sampel Cu.....	44
Tabel 7. Nilai resistivitas sampel Cu sebelum dilakukan pelapisan Ni	44
Tabel 8. Persamaan linier antara tegangan (V) dan kuat arus (I) berbagai sampel setelah proses elektroplating.....	47
Tabel 9. Nilai resistivitas sampel Cu setelah dilakukan pelapisan Ni.....	48
Tabel 10. Nilai resistivitas keping Cu dan Cu/Ni.....	48
Tabel 11. Sudut difraksi dan intensitas lapisan Cu/Ni	51
Tabel 12. Parameter refleksi Cu hasil XRD (Catherine, 2011)	52
Tabel 13. Parameter refleksi Ni hasil XRD (Haglund, 1993)	52
Tabel 14. Persamaan polinomial orde 2 antara tegangan (V) dan suhu medium (T) pada uji kinerja sensor suhu.....	56





I

Sensor RTD-Film

Sensor merupakan perangkat yang berfungsi untuk mendeteksi gejala atau sinyal yang berasal dari perubahan suatu besaran fisis tertentu menjadi besaran listrik atau alat yang menerima dan merespon sinyal atau stimulus (Fraden, 2010). Dewasa ini penggunaan sensor suhu rendah dapat ditemukan dalam berbagai bidang, di antaranya adalah pada saat pengawetan embrio, organ transplantasi, produk darah, dan makanan. (Khadatkar et al, 2004). Dengan adanya sensor suhu rendah, produk yang diawetkan pada media LN₂ berada pada kondisi yang terjaga suhunya. Dengan demikian kerusakan produk karena menguapnya nitrogen dapat dihindari. Salah satu jenis sensor yang digunakan untuk mengukur suhu rendah adalah *Resistance Temperature Detector* (RTD). RTD merupakan suatu bahan yang memiliki resistivitas bergantung pada suhu (Chowdhury & Bulbul, 2010). RTD-Film adalah salah satu jenis RTD yang dibuat dengan menggunakan lapisan tipis sebagai sensor suhu (Lebioda & Rymaszewski, 2015).

Logam yang umum digunakan untuk RTD-film adalah platina (Pt), karena memiliki TCR (*temperature coefficient of resistance*) yang tinggi (Maher et al, 2014), bahan lain yang lebih ekonomis adalah tembaga (Cu) dan nikel (Ni) (Toifur, 2017). Sintesis lapisan tipis dapat dilakukan dengan metode elektroplating. Kelebihan metode elektroplating dibandingkan metode lain adalah bahan dasar (logam) yang dilapisi tidak perlu menggunakan bahan yang mahal, temperatur proses



cukup rendah, kondisi proses pada atmosfer biasa, peralatan relatif murah, laju endapan cepat, porositas pada pelapisan relatif rendah dan dapat menghasilkan beberapa lapisan.

Sensor RTD-Film sebagai sensor suhu rendah telah dibuat dengan material Cu/Ni dengan metode elektroplating (Toifur dkk, 2017; Toifur dkk, 2018). Penelitian tersebut telah memberikan hasil, yaitu analisis struktur mikro menunjukkan Cu/Ni yang dibuat memiliki beberapa fasa yaitu Cu, Ni, dan NiO. Lapisan telah memiliki struktur kristal. Namun morfologi deposit Ni yang terbentuk belum homogen. Kekurangan ini diketahui dari foto SEM permukaan lapisan. Dari uji XRD diperoleh hubungan yang tidak konsisten antara suhu dan waktu terhadap intensitas puncak difraksi. Homogenitas morfologi permukaan lapisan sangat berpengaruh pada kinerja sensor terutama pada sifat listrik dan optik. Oleh karena itu perbaikan terhadap morfologi permukaan menjadi penting.

Salah satu cara untuk memperbaiki morfologi lapisan deposit Ni adalah dengan melakukan deposisi berbantuan medan magnet eksternal (Ebadi dkk, 2010). Penambahan medan magnet bertujuan untuk memperbaiki keseragaman morfologi deposit Ni, hal ini terjadi karena medan magnet yang bekerja pada ion-ion nikel yang menuju katoda Cu akan membangkitkan gaya Lorentz yang dapat memutar lintasan ion nikel sebelum sampai ke katoda serta menimbulkan interaksi antara ion-ion pada elektrolit dengan medan elektromagnetik sehingga membangkitkan efek magnetohidrodinamik (MHD) (Yu, 2014 ; Zielinsky, 2015). Efek MHD

Penggunaan medan magnet pada proses electrodeposisi berpotensi untuk meningkatkan transfer massa, karena ketika proses deposisi berlangsung muncul pengaruh magnetohidrodinamik (MHD) (Monzon & Coey, 2014; Zielinski dkk, 2015). Efek MHD meningkatkan massa transport deposit



(Ebadi, 2010), deposit Ni menjadi lebih halus dan homogen (Zielinski, 2015 ; Kołodziejczyk et al, 2017). Fenomena MHD muncul ketika adanya interaksi antara medan magnet dengan kecepatan transport. Hal ini dapat terjadi karena ketika proses deposisi berlangsung, medan magnet dan kecepatan transport saling tegak lurus (Yu dkk, 2013) sehingga dapat membangkitkan gaya Lorentz.

Pada metode elektroplating terdapat beberapa parameter yang berpengaruh diantaranya; konsentrasi elektrolit, keasaman (pH), rapat arus, temperatur, agitasi, dan waktu deposisi (Seshan, 2002). Waktu deposisi - sebagaimana diungkapkan pada hukum Faraday - berpengaruh secara linier terhadap tebal lapisan yang terbentuk (Tuaweri et al., 2013). Semakin lama proses berlangsungnya elektroplating, maka porsi akumulasi pergerakan elektron dan transfer material pada kedua elektroda juga akan semakin besar. Pengujian karakterisasi dilakukan dengan pengujian terhadap tebal lapisan, resistivitas keping, uji struktur kristal dengan *X-ray diffraction* (XRD) dan uji kinerja sensor suhu rendah.

Permasalahan yang perlu ditelaah adalah bagaimana pengaruh waktu deposisi terhadap resistivitas lapisan, struktur kristal yang terbentuk dan kinerjanya sebagai sensor suhu rendah?.



II

Material Paduan

A. Karakteristik Material

1. Tembaga

Permasalahan yang perlu ditelaah adalah bagaimana pengaruh waktu deposisi terhadap resistivitas lapisan, struktur kristal yang terbentuk dan kinerja nya sebagai sensor suhu rendah?.

Tembaga adalah suatu unsur kimia dalam tabel periodik yang memiliki lambang Cu dan nomor atom 29. Tembaga (Cu) berada pada golongan IB periode ke IV dengan konfigurasi elektronnya adalah $[Ar] 3d^{10} 4s^1$ dan tergolong dalam unsur jenis logam transisi. Sifat fisis tembaga ditunjukkan pada Tabel 1. Lambangnya berasal dari bahasa latin *Cuprum*. Secara fisik lapisan tembaga memiliki warna jingga kemerahan seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Tembaga

(sumber: <https://basiccopper.com/22mi4x5coshp1.html>)

Tabel 1. Sifat fisis tembaga (Cu)

Kriteria	Spesifikasi
Fase	Solid
Titik lebur	1084 °C
Titik didih	2562 °C
Massa atom	63,546 gr/mol
Massa jenis	8,96 gr/cm ³
Struktur kristal	FCC
Kalor peleburan	13,26 kJ/mol
Kalor penguapan	300,4 kJ/mol
Koefisien ekspansi linier	1,65 $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ pada 25 °C
Resistivitas listrik	16,78 n $\Omega\cdot\text{m}$ pada 20 °C
Elektronegativitas	1,90
Jari-jari atom	128 pm

(sumber: <https://id.wikipedia.org/wiki/tembaga>)

Sifat kimia tembaga adalah tahan terhadap korosi pada substansi, dalam bentuk alloy dapat memperbaiki sifat fisika dan kimia logam lain, misalnya kuningan (tembaga + seng), perunggu (tembaga + timah), dan monel (tembaga + nikel + besi + mangan).

2. Nikel

Nikel (Ni) adalah suatu unsur kimia metalik dalam tabel periodik dengan konfigurasi elektron [Ar] $4s^2 3d^8$. Nikel memiliki sifat tahan terhadap karat. Nikel merupakan logam berwarna putih keperak-perakan seperti tampak pada Gambar 2. Pada keadaan murni. Nikel bersifat lembek, namun jika dikombinasikan dengan besi, krom, dan logam lain, nikel dapat membentuk baja tahan karat yang keras. Nikel dan tergolong dalam unsur jenis logam transisi. Sifat fisis pada nikel ditunjukkan pada Tabel 2.



Gambar 2. Nikel

(sumber:<https://contenti.com/nickel-silver-sheet-metal>)

Tabel 2. Sifat fisis Nikel (Ni)

Kriteria	Spesifikasi
Fase	Solid
Titik lebur	1455 °C
Titik didih	2913 °C
Massa atom	58,6934 gr/mol
Massa jenis	8,908 gr/cm ³
Struktur kristal	FCC
Kalor peleburan	17,48 kJ/mol
Kalor penguapan	377,5 kJ/mol
Koefisien ekspansi linier	13,4 $\mu\text{m.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$ pada 25 °C
Resistivitas listrik	69,3 n Ω .m pada 20 °C
Elektronegativitas	1,91
Jari-jari atom	124 pm

(sumber: <https://id.wikipedia.org/wiki/nikel>)

Salah satu bahan material yang dapat digunakan sebagai pengotor tembaga adalah nikel (Ni). Selain harga yang lebih terjangkau dan dapat diperoleh dengan mudah, kelebihan dari nikel adalah dapat meningkatkan ketahanan tembaga terhadap korosi (Suarsana, 2008).

B. Elektroplating

Elektroplating merupakan metode pelapisan logam secara kimia dengan cara memberikan arus searah ke dalam larutan, sehingga menyebabkan terjadi proses reduksi pada katoda dan anoda (Schlesinger and Pauvinovic, 2010). Elektrodeposisi merupakan bagian dari metode elektroplating, yaitu metode lapis dengan sumber arus DC. Pada elektrodeposisi bahan yang akan dideposisikan ditempatkan pada anoda sedangkan substrat yang akan dilapisi ditempatkan pada katoda dan bahan larutan yang digunakan sama dengan yang akan dilapisi. Larutan yang digunakan disebut dengan



plating bath. Pada saat proses elektrodeposisi berlangsung, arus mengalirkan ion positif dari larutan menuju ke katoda dan logam pada anoda terlarut menuju ke larutan untuk menyeimbangkan potensial ionik seperti keadaan semula. Pada anoda karena menerima elektron akan terjadi reduksi sedangkan pada katoda karena kehilangan elektron terjadi oksidasi.

Beberapa parameter yang dapat mempengaruhi pelapisan logam (Seshan, 2002 ; Purwanto dan Syamsul, 2005) di antaranya:

a. Konsentrasi elektrolit

Elektrolit adalah zat-zat yang dapat menghantarkan arus listrik. Pada dasarnya elektrolit yang dipergunakan dalam bentuk larutan asam/basa dicampur dengan air murni. Larutan elektrolit yaitu zat-zat yang dilarutkan dalam air murni yang dapat menjembatani partikel partikel bermigrasi dari anoda ke katoda.

Konsentrasi elektrolit selama proses elektroplating berlangsung akan mengalami perubahan, dapat disebabkan oleh pengendapan ion logam dari larutan menuju katoda maupun karena penguapan. Pada umumnya kelebihan kadar logam akan menyebabkan menurunnya kekilapan, kerataan lapisan, dan pemborosan bahan. Apabila kadar logam rendah akan terjadi penurunan konduktivitas sehingga proses menjadi lambat.

b. Keasaman (pH)

Keasaman (pH) lebih berpengaruh terhadap sifat fisik deposit dibanding komposisinya. Semakin asam larutan, konsentrasi ion hidrogennya semakin tinggi dan hantaran arus



dari anoda dan katoda semakin besar sehingga semakin banyak ion-ion pelapis yang didistribusikan ke katoda.

c. Rapat Arus

Rapat arus adalah nilai yang menyatakan jumlah arus listrik yang mengalir persatuan luas permukaan elektroda. Rapat arus erbagi dalam dua macam yaitu rapat arus anoda dan rapat arus katoda. Pada proses lapis listrik rapat arus yang diperhitungkan adalah rapat arus katoda, yaitu banyaknya arus listrik yang diperlukan untuk mendapatkan atom-atom logam pada tiap satuan luas permukaan benda kerja yang akan dilapis. Untuk proses elektroplating ini faktor rapat arus memegang peranan sangat penting, karena akan mempengaruhi efisiensi pelapisan, reaksi reduksi oksidasi dan difusi dari hasil pelapisan pada permukaan benda yang dilapisi.

d. Temperatur

Temperatur terlalu rendah dan rapat arus yang cukup optimum dapat mengakibatkan hasil pelapisan menjadi kasar dan kusam, tetapi jika temperatur tinggi dengan rapat arus yang optimum maka hasil pelapisan menjadi tidak merata. Kenaikan temperatur akan menyebabkan naiknya konduktifitas dan difusitas larutan elektrolit, berarti tahanan elektrolit akan mengecil sehingga potensial dibutuhkan untuk mereduksi ion-ion logam berkurang.

e. Agitasi

Agitasi atau pengadukan larutan elektrolit saat proses elektrodposisi dapat mengurangi terbentuknya gelembung-gelembung gas



hidrogen. Gelembung-gelembung gas hidrogen ini akan menempel pada katoda dan anoda, sehingga menghalangi proses pelepasan ion dari anoda dan pengakapan ion pada katoda. Hal ini mengakibatkan lapisan yang terbentuk menjadi tidak merata dan berkurangnya ion yang dideposisikan.

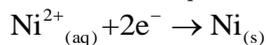
f. Waktu Deposisi

Waktu pelapisan dapat mempengaruhi kuantitas hasil pelapisan yang terjadi dipermukaan produk yang dilapis. Semakin lama waktu pelapisan maka rata-rata hasil lapisan yang terjadi pada permukaan produk semakin tebal. Endapan hanya terbentuk jika ion-ion yang dideposisikan dalam larutan masih ada. Jika kandungan ion telah habis maka tidak terbentuk lagi endapan atau lapisan.

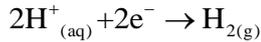
Pada proses pelapisan nikel dengan larutan elektrolit berupa campuran nikel sulfat dan nikel chloride, batas pH larutan elektrolit yang direkomendasikan agar proses pelapisan berlangsung baik yaitu antara 1,5 - 2,5 (Schlesinger and Pauvinovic, 2010). Agar nilai pH dalam proses elektroplating dapat dipertahankan, maka perlu ditambahkan asam borak (H_3BO_3). Garam nikel yang digunakan sebagai sumber logam pelapis dalam larutan adalah *nickel sulfat* dan *nickel chloride*. Reaksi kimia yang terjadi saat berlangsungnya proses elektroplating dapat dijelaskan sebagai berikut:

a. Pada katoda terjadi:

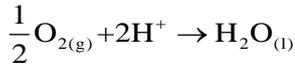
1). Pembentukan lapisan nikel



2). Pembentukan gas Hidrogen



3). Reduksi Oksigen terlarut



b. Pada anoda terjadi:

1). Pembentukan gas Oksigen

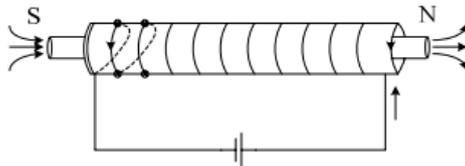


2). Oksidasi gas Hidrogen



C. Pengaruh Medan Magnet Terhadap Proses Elektroplating

Medan magnet yang digunakan dalam penelitian ini adalah medan magnet yang dibangkitkan oleh dua buah solenoid yang disusun seri. Solenoida adalah lilitan kawat menjadi sebuah helix di sekeliling permukaan silinder yang berpenampang lingkaran seperti pada Gambar 3 (Sears and Zemansky, 2003). Penampang silang solenoida terdapat pada Gambar 4.



Gambar 3. Lilitan kawat berarus pembangkit medan magnet
Dari hukum Ampere pada persamaan (1) yaitu

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{\text{enclosed}} \quad (1)$$

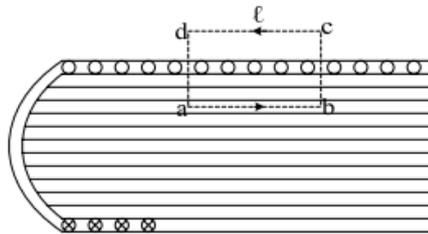
Arus total yang melewati lintasan sama dengan arus yang melewati setiap lilitan dikalikan dengan jumlah lilitannya.

$$I_{en} = N I \quad (2)$$

dengan

$$n = \frac{N}{l} \quad (3)$$

dimana n adalah jumlah lilitan per satuan panjang.



Gambar 4. Penampang silang solenoid ideal

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \oint B dl \cos \theta \quad (4a)$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \int_a^b B dl \cos 0 + \int_b^c B dl \cos 90^\circ + \int_c^d B dl \cos 180^\circ + \int_d^a B dl \cos 90^\circ \quad (4b)$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = B \int_a^b dl + 0 + 0 + 0 \quad (4c)$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = B l \quad (4d)$$

Sisi cd tidak memberi kontribusi karena pada daerah ini garis garis medan magnetnya bernilai nol. Sisi bc, dan da tidak memberi kontribusi karena \vec{B} tegak lurus $d\vec{l}$ sepanjang lintasan ini baik di dalam



maupun diluar solenoida. Sisi ab memberikan kontribusi pada integral karena sepanjang lintasan ini \vec{B} adalah homogen dan sejajar dengan $d\vec{l}$ (Serway dan Jewett, 2010).

Persamaan (4d) disubstitusi dengan persamaan (1) sehingga diperoleh persamaan (5a).

$$Bl = \mu_0 NI \quad (5a)$$

$$Bl = \mu_0 n l I \quad (5b)$$

$$B = \mu_0 n I \quad (5c)$$

dengan

B = medan magnet (T)

μ_0 = permeabilitas vakum (Wb/Am)

n = rapat lilitan (/m)

I = kuat arus yang mengalir (A)

Penggunaan medan magnet pada proses electroplating diduga dapat meningkatkan secara signifikan laju elektroplating sehingga menghasilkan kristal deposit yang lebih padat karena meningkatnya debit ion, meningkatkan massa transport deposit (Ebadi, 2010). Morfologi deposit dapat ditingkatkan menjadi lebih halus karena penggunaan medan magnet dapat mengurangi lubang-lubang yang terbentuk akibat efek reaksi evolusi hidrogen (Ispas, 2006 ; Kołodziejczyk et al, 2017), mengurangi celah atau retakan pada permukaan logam (Zielinsky, 2013). Hal-hal tersebut akan berpengaruh pada kualitas sensor yang dihasilkan sehingga menjadi lebih peka, waktu respon lebih pendek, dan mengurangi rugi histerisis.



D. Karakterisasi Bahan

1. Ketebalan

Proses deposit dari suatu logam dapat dihitung dengan menggunakan Hukum Faraday.

a. Massa yang diendapkan

Berdasarkan Hukum Faraday, jumlah reaksi elektrokimia yang terjadi pada elektroda adalah proporsional terhadap jumlah muatan listrik (Q) yang melewati sel elektrokimia (Schlesinger dan Pauvinovic, 2010),

$$w = ZQ \quad (6)$$

dengan w berat yang diendapkan (g) dan Z konstanta kesebandingan. Q adalah muatan yang mengalir selama 1 s pada kuat arus listrik 1 A

$$Q = It \quad (7)$$

Sehingga,

$$w = ZIt \quad (8)$$

Berdasarkan hukum Faraday, untuk mendapatkan 1 gram ekuivalen (w_{eq}) pada elektroda membutuhkan 96.487 C. Konstanta Faraday mewakili muatan satu mol elektron yang dapat diperoleh dari persamaan (9).

$$F = N_A e \quad (9)$$

dengan,

N_A = Bilangan Avogadro (6.0225×10^{23}
molekul / mol)

e = muatan elektron (1.6×10^{-19}) C

$$F = (6.0225 \times 10^{23})(1.6021 \times 10^{-19}) = 96.487 \text{ C/mol} \quad (10)$$



Berat ekuivalen w_{eq} adalah fraksi molar unit reaksi yang berhubungan dengan transfer satu elektron.

$$w_{eq} = \frac{A_{wt}}{n} \quad (11)$$

di mana w_{eq} *atomic weight metal deposited in cathode* (massa molar) (u) dan n jumlah elektron yang terlibat dalam reaksi deposisi. Misal pada percobaan adalah Ni^{2+} , maka $A_{wt} Ni = 58.6934$ u, dan $n=2$. Dari persamaan (6) dan (7) jika $Q=1$ C atau $Q=1$ A s, maka

$$w_{Q=1} = Z \quad (12)$$

Jadi berat ekuivalen pada Metal (M), atau $Z(M)$ adalah berat yang terbentuk oleh 1 C (1 ampere sekon). Dari persamaan (6) dan (7) menjadi

$$w = w_Q = {}_1Q \quad (13)$$

Nilai Z , atau $w_{Q=1}$ sama dengan Q . Karena 96.487 C diperlukan untuk deposisi yang setara (w_{eq}) pada logam dari pers (6), sehingga dapat dituliskan dengan persamaan (14), dengan $w_{eq} = 96.487 Z$

$$Z = w_{Q=1} = \frac{w_{eq}}{96.487} = \frac{w_{eq}}{F} \quad (14)$$

dengan $w_{eq} = A_{wt} / n$ seperti pada persamaan (11), maka

$$Z = \frac{A_{wt}}{nF} \quad (15)$$

sehingga dari persamaan (6) dan (14)


$$w = ZQ = \frac{A_{wt}}{nF} Q \quad (16)$$

Dengan $Q = It$ maka:

$$w = \frac{A_{wt} I t}{nF} \quad (17)$$

w = berat yang diendapkan (g)

A_{wt} = massa molar (u)

I = arus (A)

t = waktu (s)

n = jumlah elektron yang terlibat dalam reaksi deposisi

F = 96.487 C/mol

b. Ketebalan Deposisi

Volume deposit adalah produk yang dideposisikan pada area permukaan (A) dengan ketebalan (δ), sehingga $\delta = V/A$. Volume deposit yang terbentuk berkaitan dengan berat deposit yang terbentuk (w) dan densitas (ρ) dengan hubungan $\rho = w/V$ sehingga diperoleh persamaan (18a). Persamaan 16(a) kemudian disubstitusi dengan persamaan (17) menjadi persamaan (16b).

$$\delta = \frac{V}{A} = \frac{w}{A\rho} \quad (18a)$$

$$\delta = \frac{A_{wt} I t}{nFA\rho} \quad (18b)$$

dalam kaitannya dengan waktu (t) untuk menghitung ketebalan yang diinginkan persamaan (18b) dapat ditulis menjadi persamaan (19):



$$t = \frac{\delta nFA \rho}{A_{wt} I} \quad (19)$$

dengan,

- δ = tebal (cm)
- ρ = massa jenis (g/cm³)
- t = waktu (s)
- A_{wt} = massa molar nikel (g/mol)
- F = konstanta Faraday (96500 C/mol)
- n = jumlah elektron yang terlibat reaksi
- I = arus (A)

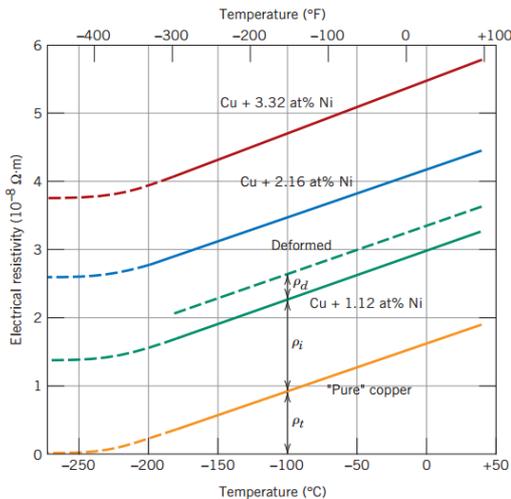
Pertambahan massa atau perubahan massa setelah deposisi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (20).

$$\delta = \frac{w}{\rho A} \quad (20)$$

Dengan δ tebal lapisan yang terbentuk (cm), $w = m_{\text{setelah}} - m_{\text{sebelum}}$ massa lapisan yang terbentuk (g) dan A luas permukaan yang dilapisi (cm²). Banyak zat yang terdeposit pada arus listrik yang dialirkan melalui sel elektrolisis sebanding dengan jumlah arus listrik yang diberikan dikalikan dengan lamanya operasi berlangsung (Santosa dan Syamsa, 2007) sesuai dengan hukum Faraday (Tuaweri *et al*, 2013). Berdasarkan persamaan (19) diperoleh informasi bahwa ketebalan lapisan sebanding dengan waktu deposisi. Variasi waktu kontak yang diberikan pada percobaan elektroplating yang telah dilakukan berbanding lurus dengan ketebalan dan berat deposit pada substrat (Furqon dan Sulistijono, 2015).

2. Resistivitas

Resistivitas merupakan elemen dasar untuk mengklasifikasikan suatu bahan, apakah berada dalam bentuk konduktor, semikonduktor atau isolator. Sifat resistivitas listrik pada logam disebabkan oleh sifat logam yang memiliki beberapa elektron terdelokalisasi dan dapat meninggalkan elektron valensi dan dapat meninggalkan atom "induknya", khususnya elektron valensi yang bergerak bebas jika diberi beda potensial. Berdasarkan pita energi, logam memiliki pita valensi terisi penuh dan celah energi yang mendekati nol, sehingga dengan energi tertentu elektron-elektron pada pita valensi mudah memasuki pita konduksi.



Gambar 5. Resistivitas listrik vs temperatur untuk bahan tembaga dan tiga paduan tembaga-nikel yang salah satunya mengalami deformasi (Callister and David, 2012).



Secara eksperimental total resistivitas logam adalah jumlah dari kontribusi dari getaran termal, pengotoran, dan deformasi plastis, yaitu, mekanisme hamburan bertindak independen satu sama lain. Secara matematis (Callister and David, 2012) ditulis sebagai berikut:

$$\rho_{total} = \rho_t + \rho_i + \rho_d \quad (21)$$

dengan

ρ_t = resistivitas disebabkan vibrasi termal,
 ρ_i = resistivitas disebabkan impuritas bahan
 ρ_d = resistivitas disebabkan deformasi.

Persamaan 21 dikenal sebagai matthiessen's *rule*. Pengaruh dari setiap variabel ρ pada resistivitas total ditunjukkan pada Gambar 5 dengan memplot nilai resistivitas vs suhu untuk tembaga dan beberapa paduan tembaga-nikel. Untuk logam murni dan semua paduan tembaga-nikel yang ditunjukkan pada Gambar 5, resistivitas meningkat secara linear dengan suhu di atas sekitar -200 °C, sehingga,

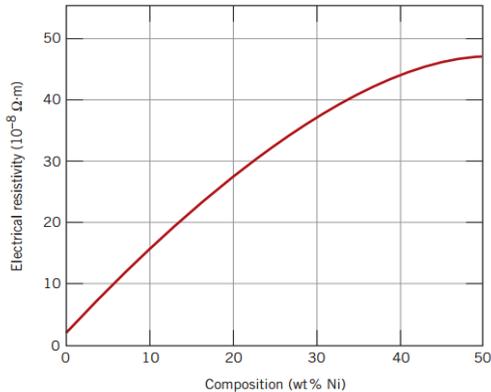
$$\rho_t = \rho_0 + aT \quad (22)$$

dengan ρ_0, a adalah konstanta. Resistivitas karena impuritas dirumuskan dengan :

$$\rho_i = AC_i (1 - C_i) \quad (23)$$

C_i = konsentrasi impuritas dan A = konstanta tidak bergantung komposisi. Deformasi plastik akan menaikkan resistivitas karena kenaikan jumlah dislokasi oleh penyebaran elektron. Efek

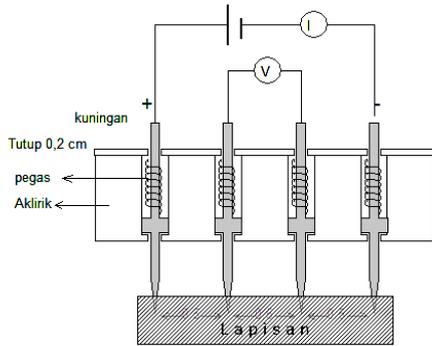
deformasi terhadap resistivitas diperlihatkan oleh Gambar 5. Sedangkan Gambar 6 memperlihatkan pengaruh komposisi terhadap resistivitas listrik.



Gambar 6. Resistivitas listrik pada temperatur ruang vs komposisi pada paduan tembaga-nikel (Callister and David, 2012).

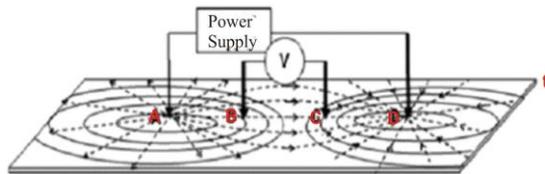
3. Resistivitas Keping

Four-Point Probe (FPP) adalah salah satu jenis alat yang dapat digunakan untuk mengukur nilai resistivitas lapisan tipis. Model *probe* empat titik ditunjukkan Gambar 7. Dua *probe* terluar berfungsi untuk mengalirkan arus listrik dan dua *probe* lain (kedua dan ketiga) digunakan untuk mengukur tegangan listrik.



Gambar 7. Skema alat *Four Point Probe* (Toifur, 2007)

Model sebaran arus pada permukaan plat diilustrasikan seperti Gambar 8.



Gambar 8. Model sebaran arus pada permukaan lapisan tipis menggunakan probe empat titik (Toifur, 2014)

Perhitungan R_s diperoleh dari persamaan (24).

$$R_s = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{V_{BC}}{I} \quad (24)$$



Persamaan (24) memberikan hubungan fungsional antara V_{BC} dan I sesuai persamaan (25).

$$V_{BC} = \frac{\ln 2 R_s}{\pi} I \quad (25)$$

Dengan,

- R_s = Resistivitas keping (Ω/sq)
- V_{BC} = Beda potensial pada titik BC (volt)
- I = Kuat arus (A)

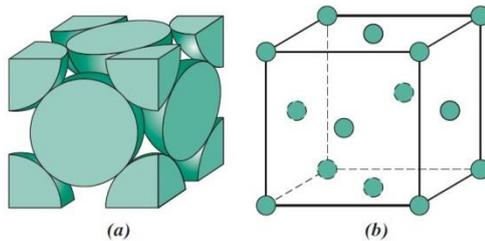
Persamaan (25) menunjukkan bahwa resistivitas keping tidak bergantung pada jarak antar kaki *probe*, tetapi hanya bergantung pada sifat-sifat bahannya saja dengan syarat sampel yang diukur memiliki bentuk kotak dua dimensi (Toifur, 2004). Satuan resistivitas keping (Ω/sq) digunakan dalam satu kasus yaitu jika medium yang diukur berbentuk *square*.

4. Difraksi Sinar X

a. Struktur Kristal

Beberapa sifat padatan kristal bergantung pada struktur kristal material. Ada sejumlah struktur kristal yang memiliki urutan atom yang berbeda. Perbedaan tersebut dapat mengidentifikasi struktur kristal, dari struktur yang relatif sederhana untuk logam hingga struktur logam yang sangat kompleks. Tiga jenis struktur kristal logam yang relatif sederhana adalah BCC

(*Body-centered cubic*), HCP (*Hexagonal close-packed*), dan FCC (*Face-centered cubic*) (Callister dan David, 2012). Tembaga dan Nikel memiliki struktur kristal FCC (*Face-centered cubic*). *Face-centered cubic* (FCC) adalah jenis struktur kristal yang memiliki sel satuan geometri kubik, dengan atom yang terletak di masing-masing sudut dan di semua pusat permukaan kubus. Gambar 9(a) menunjukkan model bola pejal untuk sel unit FCC, sedangkan pada Gambar 9(b) menunjukkan pusat atom diwakili oleh bola kecil untuk memberikan perspektif posisi atom yang lebih baik.



Gambar 9. Bentuk dan posisi struktur kristal jenis FCC (Callister and David, 2012)

Pada struktur kristal FCC, jika masing-masing sudut atom dalam satu sel dijumlahkan, didapatkan total satu atom utuh, sedangkan atom berpusat pada permukaan jumlahnya tiga atom utuh. Sehingga dalam satu sel terdapat total empat atom utuh. Ada bagian bola yang terwakili dalam batas-batas kubus, dimana bagian bola yang lain merupakan bagian dari sel sekitarnya seperti yang terlihat pada gambar 9(a). Sel terdiri dari volume kubus yang dihasilkan dari pusat-pusat sudut dan permukaan atom seperti yang



ditunjukkan pada gambar 9(b), untuk mengetahui bagaimana pola bidang atom, maka dibuat suatu notasi singkat terdiri dari satu set tiga angka yang sering disebut indeks Miller. Indeks Miller dapat mengidentifikasi kelompok dari bidang paralel (Anderson, 1990). Setiap atom memiliki beberapa bidang kristalografi yang berbeda. Indeks Miller adalah jumlah keseluruhan angka terkecil yang dimisalkan oleh bidang dengan tiga sumbu kristal (x, y dan z) (Higgins, 1993).

b. Difraksi sinar X

Sinar-X merupakan pancaran radiasi elektromagnet dengan panjang gelombang yang ordennya sebesar 0,1 nm (atau 1\AA). Apabila suatu bahan dikenai sinar-X maka intensitas sinar-X yang ditransmisikan lebih kecil dari intensitas sinar datang. Hal ini disebabkan adanya penyerapan oleh bahan dan juga penghamburan oleh atom-atom dalam material sasaran. Berkas sinar yang dihamburkan ada yang saling menghilangkan karena fasenya berbeda dan ada juga yang saling menguatkan karena fasenya sama. Berkas sinar-X yang saling menguatkan disebut berkas difraksi. Persyaratan yang harus dipenuhi agar berkas sinar-X yang dihamburkan merupakan berkas difraksi mengikuti persamaan Hukum Bragg yang diilustrasikan pada Gambar 8a. Perbedaan lintasan berkas difraksi sinar-X harus merupakan kelipatan panjang gelombang ($n\lambda$) seperti pada persamaan (26) (Patterson & Bailey, 2010).


$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (26)$$

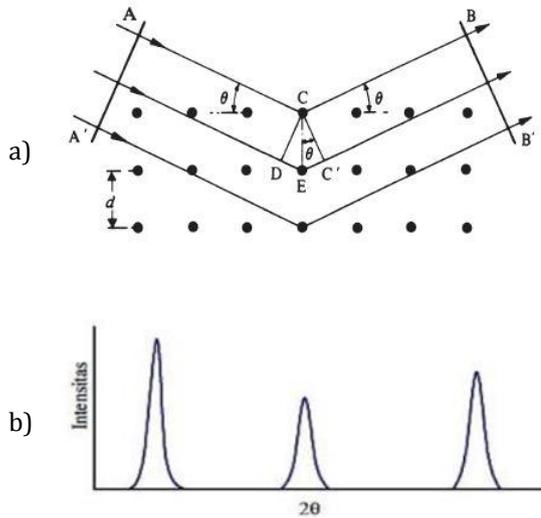
dengan n adalah bilangan bulat 1, 2, 3, ..., sedangkan λ adalah panjang gelombang sinar-X, d adalah jarak antar bidang kristal, dan θ adalah sudut difraksi.

Persamaan (26) juga menginformasikan jika pada proses pelapisan dilakukan perubahan parameter tertentu dan terjadi perubahan posisi sudut puncak difraksi, maka jarak antar bidang (d) berubah. Makin besar sudut θ makin rapat bidangnya. Berkas sinar-X tidak hanya dipantulkan oleh bidang di bagian permukaan tetapi juga dipantulkan bidang-bidang yang lain dibawahnya. Keadaan ini menghasilkan pola interferensi yang saling menguatkan untuk sudut-sudut yang memenuhi hukum Bragg. Hasil defraktograf sinar-X berupa grafik hubungan antara intensitas spektrum karakteristik terhadap sudut 2θ tercantum pada Gambar 10b.

Berdasarkan gambar 10b dapat ditentukan struktur mikro lapisan apakah amorf atau kristal serta arah pertumbuhan atomnya. Arah pertumbuhan atom dinyatakan dengan arah bidang yang disebut dengan indek bidang atau indek Miller. Hubungan antara jarak bidang dengan indek bidang khusus untuk kristal kubik diungkapkan pada persamaan 27.

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (27)$$

dengan d_{hkl} adalah indek bidang hkl dan hkl adalah indeks miller.



Gambar 10. a) Difraksi sinar-X dan b) Hubungan intensitas terhadap sudut 2θ

5. Sensor Suhu

Sensor adalah alat yang merubah dari besaran fisika menjadi besaran listrik sehingga dapat dianalisis dengan rangkaian listrik tertentu. Besaran fisika yang dimaksud dapat berupa suhu, tekanan, kecepatan, suara, cahaya, medan magnet dan lain-lain. Suhu adalah ukuran mengenai panas atau dinginnya suatu benda (Halliday dan Resnick, 2001). Secara mikroskopis setiap atom dalam suatu benda dapat bergerak,



baik itu dengan perpindahan maupun gerakan di tempat berupa getaran.

Sensor suhu adalah sensor yang digunakan untuk mendeteksi gejala perubahan suhu pada suatu dimensi benda atau dimensi ruang tertentu (Fraden, 2010). Sensor suhu dapat menanggapi dan mengubah besaran suhu menjadi besaran tegangan, arus, atau resistansi. Seperti pengukuran suhu dengan detektor suhu tahanan (RTD), dimana tahanan listrik dari logam yang bervariasi sebanding dengan suhu. Sensor suhu dengan IC memiliki konfigurasi output tegangan dan arus. Dalam memilih bahan sensor yang tepat dan sesuai dengan sistem maka perlu diperhatikan persyaratan umum sensor berikut ini (Kustija, 2012) :

a. Linearitas

Linear dalam hal ini adalah hubungan antara besaran *input* yang dideteksi menghasilkan besaran *output* dengan hubungan linier dan dapat digambarkan secara grafik membentuk garis lurus. Misalnya sensor suhu dapat menghasilkan tegangan sesuai dengan suhu yang dirasakannya.

b. Sensitivitas

Perbandingan antara perubahan output (respon sensor) terhadap perubahan input (variabel yang diukur) Sensitivitas akan menunjukkan seberapa besar kepekaan sensor suhu terhadap kuantitas yang diukur. Beberapa sensor suhu dapat memiliki kepekaan yang dinyatakan dengan satuan volt per °C ($V/^\circ C$), yang berarti perubahan temperatur satu derajat pada input



menghasilkan perubahan tegangan beberapa volt pada output.

c. Jangkauan

Kriteria untuk memilih sensor adalah kesanggupan atau jangkauan untuk mengindera sesuai dengan keperluan. Sensor yang memiliki jangkauan yang lebih luas, dapat dikatakan sensor memiliki kinerja yang lebih baik. Sensor suhu dengan jangkauan yang lebih luas, berarti dapat digunakan untuk mengukur suhu dengan rentang yang besar.

Ada empat jenis sensor suhu yang umum digunakan, yaitu termistor, termokopel, sensor IC, dan RTD (*Resistance Temperature Detector*). Dari keempat jenis sensor suhu tersebut mempunyai spesifikasi dan kelebihan masing-masing. Prinsip kerja dari sensor suhu RTD menggunakan prinsip perubahan resistansi terhadap perubahan suhu. Semakin tinggi suhu suatu penghantar, semakin tinggi pula getaran elektron-elektron bebas dalam penghantar tersebut. Getaran elektron-elektron bebas tersebut yang menghambat muatan listrik dalam penghantar. Sehingga nilai hambatan listrik semakin besar apabila suhu pada penghantar semakin besar, begitu juga sebaliknya (Julianto, 2013). Dengan prinsip tersebut, elektron-elektron yang melewati lapisan tipis pada medium bersuhu rendah mengakibatkan mengecilnya getaran pada elektron-elektron tersebut, sehingga muatan listrik lebih kecil hambatannya saat melalui penghantar tersebut.



Pada pembuatan sensor RTD bahan yang digunakan biasanya menggunakan bahan dasar platina yang relatif sangat mahal (Maher et al., 2014), sehingga pencarian bahan yang relatif murah gencar dilakukan untuk mendapatkan bahan pembuatan sensor RTD yang ekonomis, seperti pembuatan sensor RTD berbahan Cu/Ni dengan metode elektroplating (Toifur dkk, 2017), juga dapat dibuat dengan menggunakan coil dan thin film. Pasokan arus listrik yang konstan pada RTD dan mengukur beda potensial antara kedua ujung RTD maka dapat diperoleh nilai tahanan sehingga temperatur dapat ditentukan. Hubungan antara tahanan dan suhu dinyatakan dengan persamaan 28.

$$R_T = R_0(1 + \alpha\Delta T) \quad (28)$$

dengan, R_0 = tahanan pada suhu 0°C (Ω), R_T = tahanan pada suhu T (0°C), α = koefisien suhu tahanan TCR (*Temperature Coefficient of Resistance*), ΔT = selisih suhu ($^\circ\text{C}$). Apabila modelnya non linier maka digunakan persamaan Callendar-Van Dusen:

$$R_T = R_0(1 + AT + BT^2 + CT^3(T - 100)) \quad (29)$$

dengan A, B, dan C, merupakan koefisien Callender-Van Dusen. Karakteristik sensor ditentukan melalui 3 parameter yaitu TCR, nilai nominal tahanan, dan toleransi. TCR menentukan hubungan antara tahanan dengan suhu. Makin besar nilai TCR makin sensitif bahan tersebut. Nilai tahanan nominal merupakan tahanan pada suhu 0°C , biasanya digunakan platina dengan tahanan 100Ω , sedangkan toleransi dapat dilihat pada



fluktuasi nilai R pada suhu $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Toleransi ini menentukan tingkat akurasi sensor.

III

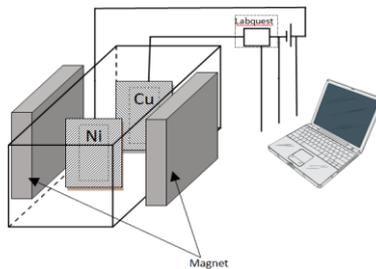
Elektroplating dengan Variasi Waktu Deposisi

A. Metode Eksperimen

1. Preparasi Sampel

a. Alat

- 1). Alat dirangkai seperti pada gambar 11.
- 2). Larutan dipanaskan menggunakan kompor listrik (*Heater*) sampai pada suhu 60 °C.
- 3). Medan magnet diatur dalam keadaan 200 G.
- 4). Waktu pada stopwatch diatur 5 s.
- 5). Massa Cu diukur dengan neraca ohauss
- 6). Cu diletakkan pada katoda dan Ni pada anoda.
- 7). Setelah elektroplating, sampel dikeringkan dan diukur untuk mengetahui massa Ni dengan neraca ohauss
- 8). Proses deposisi dilakukan untuk waktu 5 s sampai 45 s, dengan interval 15 s.



Gambar 11. Rangkaian alat proses electroplating



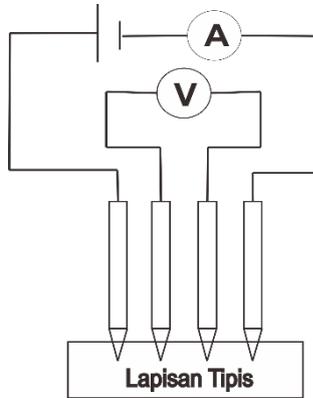
2. Pengujian resistivitas keping

Untuk melakukan karakterisasi resistivitas akan digunakan *probe* empat titik. Alat pendukung yang dibutuhkan untuk karakterisasi lapisan tipis antara lain:

- a. Lapisan tipis
- b. Sumber tegangan DC
- c. *Probe* empat titik
- d. Amperemeter
- e. Voltmeter
- f. Resistor 5 buah 4.7Ω
- g. *Breadboard*
- h. Kabel penghubung
- i. Substrat Cu dan sampel Cu/Ni

Langkah-langkah pengujian resistivitas keping adalah:

- a. Alat dirangkai dan disusun seperti gambar 10.
- b. Lapisan Cu atau Cu/Ni diletakkan pada tempat bahan pada alat probe empat titik.
- c. Sumber tegangan DC dihidupkan.
- d. Tegangan diubah secara perlahan-lahan dengan cara memutar knop tegangan.
- e. Nilai tegangan dan arus yang terukur dicatat selama pengukuran dan mentabulasinya ke dalam Tabel 3.



Gambar 12. Skema *Probe* empat titik

Tabel 3. Tabulasi data penentuan Resistivitas listrik lapisan tipis.

No	Kuat Arus (A)	Tegangan (V)
1		
2		
3		
4		
5		

3. Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD)

- a. Alat penelitian adalah XRD tipe Rigaku Miniflex 600 dan bahan penelitian adalah sampel lapisan tipis Cu/Ni.
- b. Langkah-langkah penelitian
 - 1) Sampel dipasang pada alat *diffractometer* dengan sudut θ terhadap sinar datang.
 - 2) Catu daya dipasang hingga terjadi pancaran sinar-X

- 
- 3) Intensitas sinar-X yang terpantul dari sampel melalui alat *diffractometer* diamati.
 - 4) Sampel diputar beserta alat pendeteksi di sudut-sudut yang lain.

4. Pengujian kinerja sensor

a. Alat penelitian

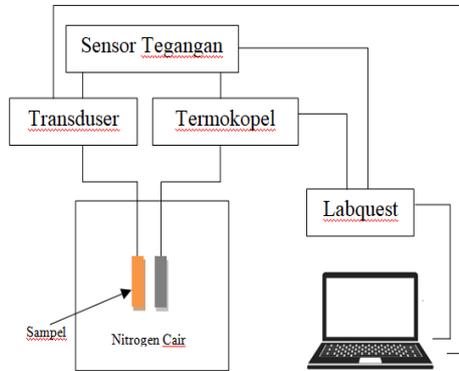
- 1) Tabung nitrogen cair
- 2) Transduser sebagai pengubah data analog ke digital
- 3) Labquest dari vernier
- 4) *Voltage probe* untuk mengukur tegangan sebagai data keluaran dari sensor Cu/Ni
- 5) *Thermocouple* sebagai pendeteksi perubahan suhu
- 6) Laptop dengan *software logger pro* sebagai penampil data kinerja sensor.

b. Bahan penelitian

Bahan yang digunakan dalam uji kinerja sensor adalah nitrogen cair sebagai media suhu rendah.

c. Langkah-langkah penelitian yang akan dilakukan yaitu:

- a. Alat dirangkai seperti pada Gambar 13,
- b. Aplikasi logger pro dibuka pada laptop,
- c. Waktu pengambilan data dan jenis pengukuran suhu rendah pada logger pro diatur,
- d. Data kinerja sensor diambil dengan cara memasukkan dan mengeluarkan sensor Cu/Ni bersama dengan *termocouple* secara perlahan,
- e. Langkah c sampai d diulang untuk sampel Cu/Ni dengan variasi waktu deposisi yang lain.



Gambar 13. Rangkaian alat kinerja sensor suhu rendah

Tabel 4. Tabulasi data analisis sensor suhu

No	T (s)	T ($^{\circ}$ C)	V_{output} (volt)
1			
2			
3			
4			

B. Analisis Data

1. Menentukan tebal lapisan

Ketebalan lapisan Ni dapat ditentukan menggunakan selisih massa pada deposit Ni dan substrat Cu. Pengukuran massa dilakukan dengan menimbang sampel sebelum dan setelah deposisi Ni dengan menggunakan neraca ohaus PA214. Tebal lapisan Ni dihitung melalui persamaan Lowenheim,

$$\delta = \frac{W}{\rho A_{Ni}} = \frac{(m_{Cu/Ni} - m_{Cu})}{\rho A_{Ni}} \quad (30)$$

Sedangkan untuk nilai ralat dari tebal lapisan Ni dapat diperoleh dari perambatan ralat dari $m_{Cu/Ni}$, m_{Cu} dan A sehingga menjadi:

$$S_{\delta} = \sqrt{\left(\frac{1}{\rho A} S_{m_{Cu/Ni}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\rho A} S_{m_{Cu}}\right)^2 + \left(\frac{m_{Cu/Ni} - m_{Cu}}{\rho A^2} S_A\right)^2} \quad (31)$$

2. Menentukan resistivitas lapisan

Penentuan nilai resistivitas lapisan tipis, menggunakan modifikasi persamaan (34)

$$V = R_s \frac{\ln 2}{\pi} I \quad (32)$$

Persamaan ini dapat didekati dengan persamaan regresi linier

$$y = ax + b \quad (33)$$

dengan $x = I$ dan $y = V$, a merupakan gradien dari garis yang merupakan representasi dari nilai resistivitas. Besar dari nilai a dan b dapat diperoleh dari

$$a = \frac{N \sum (x_i y_i) - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (34)$$

Sedangkan ralat baku estimasi dan ralat kumulatifnya adalah

$$S_{\hat{y}} = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y})^2}{N - 2}} \quad (35)$$



$$S_a = S_y \sqrt{\frac{N}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}} \quad (35b)$$

Sehingga nilai resistivitas dan ralatnya dapat ditentukan berdasarkan:

$$R_s = \frac{\pi}{\ln 2} a \quad (36)$$

$$S_{R_s} = \sqrt{\left(\frac{\partial R_s}{\partial a} S_a \right)^2} = \frac{\pi}{\ln 2} S_a \quad (37)$$

3. X Ray Diffraction (XRD)

Uji struktur mikro yang akan dilakukan menggunakan *X Ray Diffraction* yaitu dengan cara menganalisis puncak (*peak list*) yang terdapat pada grafik Intensitas dengan sudut-sudut hamburannya. Puncak kemudian dibandingkan dengan data puncak Cu dan Ni standar dari *crystallography* yang dilah dengan *software Diamonds*. Analisis indeks miller bertujuan untuk mengetahui bagai mana pola bidang atom yang terbentuk. Analisis ketinggian intensitas bertujuan untuk mengetahui keteraturan susunan atom lapisan Ni hasil deposisi.

1. Kinerja Sensor

Untuk menentukan hubungan antara tegangan output terhadap suhu dari uap LN₂ akan digunakan metode *fitting* data polinomial orde dua, menurut persamaan (Bevington, 2003):

$$y = a^2x + bx + c \quad (38)$$

Dengan nilai sensitivitas adalah koefisien b.

IV

Sintesis Lapisan Cu/Ni dengan Bantuan Medan Magnet

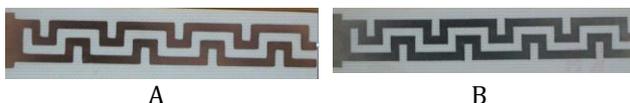
Sampel penelitian berupa lapisan tembaga (Cu yang terdapat pada PCB Fiber dengan ukuran $(10 \times 1,3)$ cm^2 . Jumlah sampel yang digunakan 5 buah. Desain lapisan terbagi menjadi dua bagian yaitu bagian *square* untuk karakterisasi dan *litograf* untuk menguji kinerja sampel sebagai sensor suhu rendah. Karakterisasi yang dilakukan yaitu uji XRD dan uji resistivitas. Luas bagian *square* adalah $(3 \times 1,3)$ cm^2 sedangkan bagian litograf lebar (2×2) mm^2 yang disusun pada luasan substrat Cu (PCB) dengan alur yang berliku-liku guna memperpanjang jalur litografi untuk digunakan pada uji lapisan Cu/Ni sebagai sensor suhu rendah. Pembuatan desain dilakukan dengan *software CorelDraw X7* sesuai gambar 14.



Gambar 14. Desain litografi sampel (A) Bagian *square* (B) Bagian sensor RTD

Desain kemudian dicetak pada *cutting sticker*. Sampel direndam dalam larutan feriklorit sehingga terbentuk jalur litografi sesuai desain. Sampel yang sudah dipreparasi kemudian dilapisi dengan Nikel. Pada gambar 15a adalah sampel tembaga (Cu) yang secara fisik terlihat berwarna kuning keemasan. Setelah dilakukan pelapisan dengan Nikel sampel tambak

berwarna keperakan seperti gambar 15b. Perubahan secara fisik ini menandakan adanya deposisi Ni pada permukaan substrat tembaga.



Gambar 15. Sampel tembaga (Cu) sebelum dan sesudah dilapisi dengan nikel (Ni). (sumber: dokumen pribadi)

A. Uji ketebalan lapisan

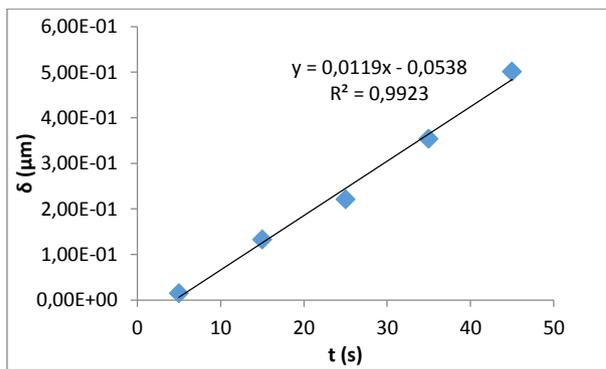
Elektroplating merupakan salah satu metode pembuatan lapisan tipis dengan memanfaatkan arus searah (DC). Proses pelapisan dilakukan dengan cara mendeposisikan Ni pada substrat Cu di dalam larutan elektrolit sebagai tempat berpindahannya elektron dari pelat Ni ke substrat Cu.

Penentuan ketebalan lapisan Ni yang terbentuk di atas substrat Cu dilakukan dengan teknik pengukuran tidak langsung yaitu dengan mengukur selisih antara massa sebelum dan sesudah pada lapisan tipis. Hasil pengukuran tebal lapisan yang diperoleh dari persamaan (30) dan ralatnya diperoleh dari persamaan (31) dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil pengukuran massa dan tebal lapisan Ni

Kode Sampel	Waktu Deposisi (s)	Massa Cu (g)	Massa Cu/Ni (g)	Δm (g) $\times 10^{-3}$	δ (cm) $\times 10^{-7}$
A	5	1.0785	1.0786	0.0001	0,15 \pm 0,10
B	15	1.0525	1.0534	0.0009	1,33 \pm 0,10
C	25	1.1516	1.1531	0.0015	2,21 \pm 0,10
D	35	1.1222	1.1246	0.0024	3,54 \pm 0,10
E	45	1.1125	1.1159	0.0034	5,02 \pm 0,10

Dari Tabel 5 tampak bahwa terdapat perubahan massa sebelum dan sesudah deposisi. Hal ini menandakan bahwa lapisan Cu telah terlapis oleh Ni sesuai dengan waktu deposisinya. Secara fisik hasil deposisi Ni pada substrat Cu ditandai perubahan warna di atas substrat Cu. Nilai ketebalan yang diperoleh dari hasil deposisi sesuai waktu deposisinya ditampilkan pada Gambar 16.



Gambar 16. Grafik hubungan ketebalan lapisan Ni terhadap waktu deposisi.

Dari persamaan (18b) diketahui bahwa tebal lapisan yang terbentuk sebanding dengan waktu deposisinya. Pada Gambar 16 tampak bahwa ketebalan lapisan yang terbentuk bertambah secara linier sesuai dengan perubahan waktunya. Indeks determinasinya mendekati satu yaitu $R^2 = 0.9923$.

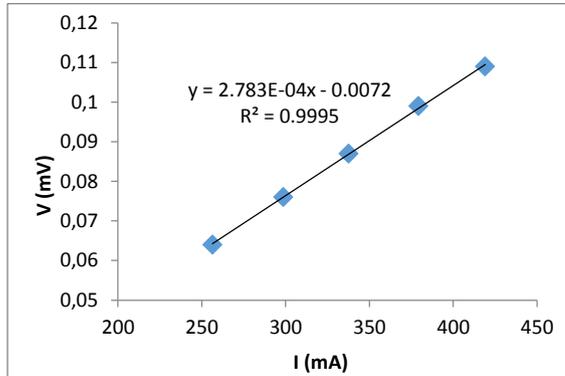
B. Uji Resistivitas Lapisan

Uji resistivitas keping dilakukan sebanyak dua kali, tujuannya untuk mengetahui perubahan nilai resistivitas keping Cu sebelum dan setelah deposisi Ni. Nilai keduanya yaitu nilai resistivitas keping

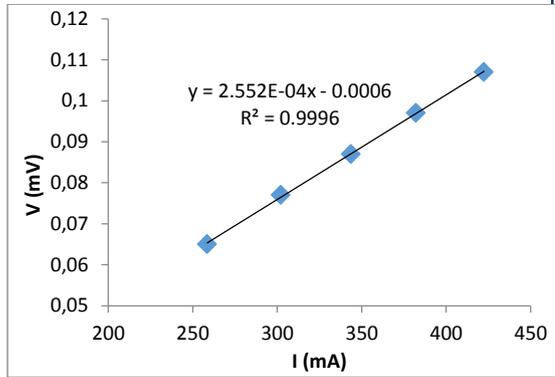
pada substrat Cu dan pada lapisan tipis Cu/Ni hasil deposisi Ni pada substrat Cu dapat diketahui dengan menggunakan alat probe empat titik, dengan menggunakan rangkaian pada Gambar 12.

1. Resistivitas Cu

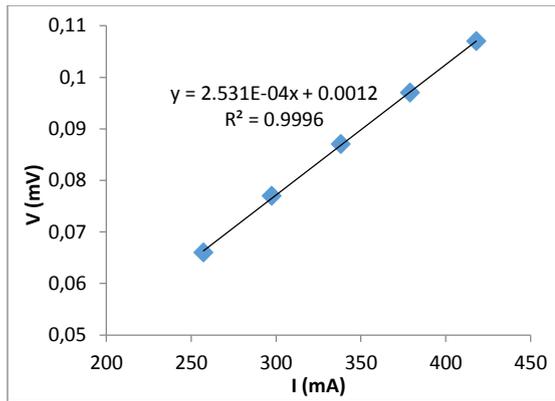
Persamaan hasil regresi data antara beda potensial (V) dan kuat arus (I) untuk menentukan nilai resistivitas keping Cu berdasarkan grafik hubungan kuat arus (I) terhadap beda potensial (V) pada lapisan Cu.



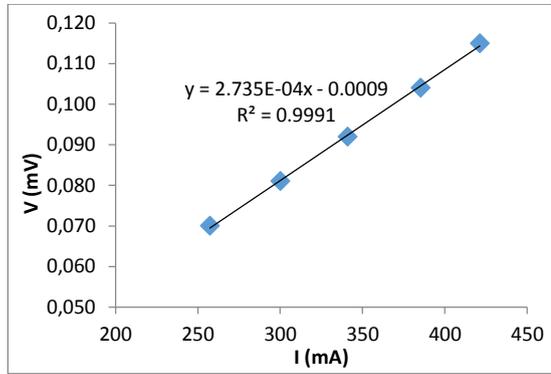
Gambar 17. Grafik hubungan antara V dan I pada sampel A



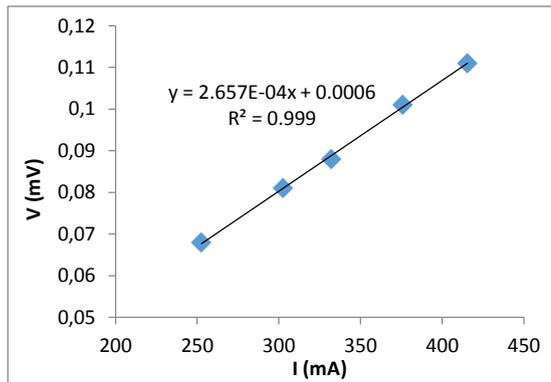
Gambar 18. Grafik hubungan antara V dan I pada sampel B



Gambar 19. Grafik hubungan antara V dan I pada sampel C



Gambar 20. Grafik hubungan antara V dan I pada sampel D



Gambar 21. Grafik hubungan antara V dan I pada sampel E

Nilai *fitting* data pada setiap sampel ditampilkan pada Tabel 6, sedangkan pada Tabel 7 menampilkan nilai resistivitas keping yang diperoleh dengan menggunakan persamaan (32).

Tabel 6. Persamaan linier antara tegangan (V) dan kuat arus (I) masing-masing sampel Cu

No.	Kode Sampel	Waktu Deposisi (s)	Persamaan linier	R^2
1	A	5	$V=2.783E-04 I - 0.0072$	0,9995
2	B	15	$V=2.552E-04 I - 0.0006$	0,9996
3	C	25	$V=2.531E-04 I + 0.0012$	0,9996
4	D	35	$V=2.735E-04 I - 0.0009$	0,9991
5	E	45	$V=2.675E-04 I + 0.0006$	0,9990

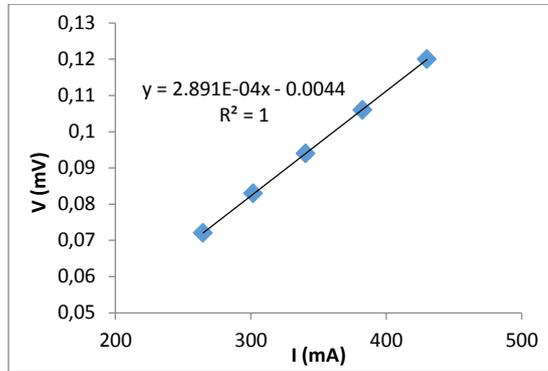
Dari hasil persamaan regresi linier diperoleh nilai a yang selanjutnya menentukan nilai resistivitas keping menggunakan persamaan (32) dan ralatnya diperoleh dengan menggunakan persamaan (37). Hasil perhitungan nilai resistivitas keping dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Nilai resistivitas sampel Cu sebelum dilakukan pelapisan Ni

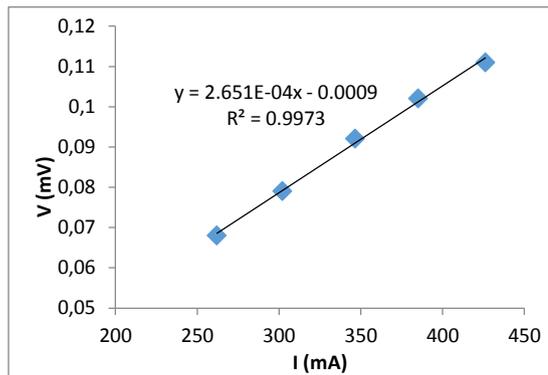
No.	Kode Sampel	Waktu Deposisi (s)	$R_s \pm S_{R_s} (\Omega/\text{sq}) 10^{-3}$
1	A	5	1.262 ± 0.003
2	B	15	1.157 ± 0.013
3	C	25	1.147 ± 0.013
4	D	35	1.240 ± 0.222
5	E	45	1.240 ± 0.022

2. Resistivitas Cu/Ni

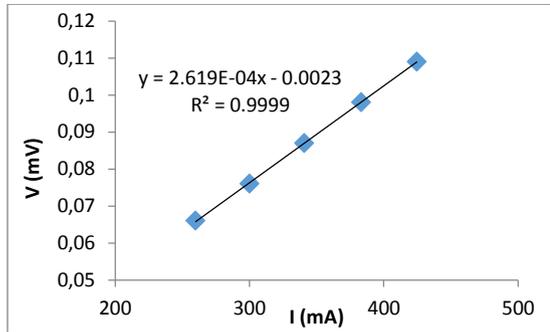
Analisis pengukuran resistivitas keping Cu/Ni pada setiap sampel menggunakan regresi linier yang ditampilkan pada grafik hubungan V dan I .



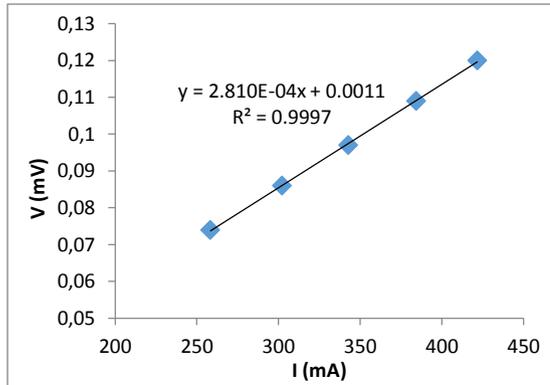
Gambar 22. Grafik hubungan antara V dan I pada sampel A ($t = 5$ s)



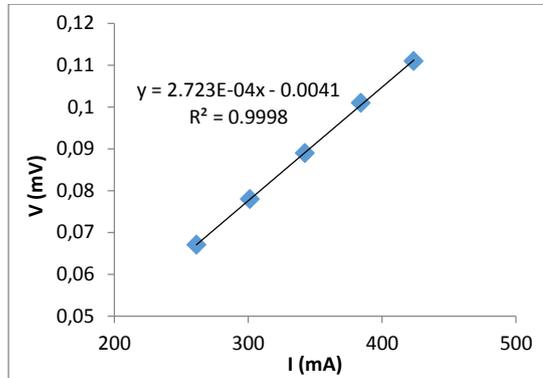
Gambar 23. Grafik hubungan antara V dan I pada sampel B ($t = 15$ s)



Gambar 24. Grafik hubungan antara V dan I pada sampel C ($t = 25$ s)



Gambar 25. Grafik hubungan antara V dan I pada sampel D ($t = 35$ s)



Gambar 26. Grafik hubungan antara V dan I pada sampel E ($t = 45$ s)

Nilai *fitting* data pada setiap sampel ditampilkan pada Tabel 8, sedangkan pada Tabel 9 menampilkan nilai resistivitas keping yang diperoleh dengan menggunakan persamaan (32).

Tabel 8. Persamaan linier antara tegangan (V) dan kuat arus (I) berbagai sampel setelah proses electroplating

No.	Kode Sampel	Persamaan linier	Indeks Determinasi R^2
1	A	$V = 2.891E-04 I - 0.0044$	1,0000
2	B	$V = 2.651E-04 I - 0.0009$	0,9973
3	C	$V = 2.619E-04 I - 0.0023$	0,9999
4	D	$V = 2.810E-04 I + 0.0011$	0,9997
5	E	$V = 2.723E-04 I - 0.0041$	0,9998

Dari hasil persamaan regresi linier diperoleh nilai a yang selanjutnya menentukan nilai resistivitas keping menggunakan persamaan (32)

dan ralatnya diperoleh dengan menggunakan persamaan (37). Hasil perhitungan nilai resistivitas keping dapat dilihat pada Tabel 9.

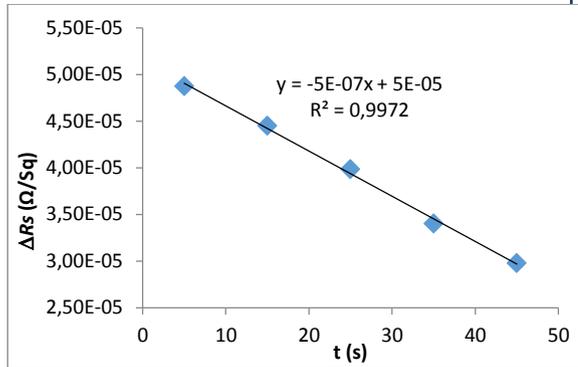
Tabel 9. Nilai resistivitas keping sampel Cu/Ni setelah pelapisan Ni

No.	Sampel	$R_s \pm S_{R_s} \cdot 10^{-3} (\Omega/\text{sq})$
1	A	$1.310 \pm 0,005$
2	B	$1,201 \pm 0,036$
3	C	$1,187 \pm 0,008$
4	D	$1,274 \pm 0,014$
5	E	$1,234 \pm 0,011$

Pada Tabel 10 diperoleh informasi bahwa nilai $R_{s_{Cu/Ni}}$ lebih besar dari pada $R_{s_{Cu}}$. Besarnya nilai resistivitas Ni menjadikan nilai $R_{s_{Cu/Ni}}$ lebih besar dari $R_{s_{Cu}}$. ΔR_s merupakan selisih $R_{s_{Cu/Ni}}$ dan $R_{s_{Cu}}$.

Tabel 10. Nilai resistivitas keping Cu dan Cu/Ni

t (s)	$R_{s_{Cu}} \times 10^{-3} (\Omega/\text{Sq})$	$R_{s_{Cu/Ni}} \times 10^{-3} (\Omega/\text{Sq})$	$\Delta R_s \times 10^{-3} (\Omega/\text{Sq})$
5	1.262 ± 0.003	$1.310 \pm 0,005$	0.049
15	1.157 ± 0.013	$1,201 \pm 0,036$	0.044
25	1.147 ± 0.013	$1,187 \pm 0,008$	0.040
35	1.240 ± 0.022	$1,274 \pm 0,014$	0.034
45	1.204 ± 0.021	$1,234 \pm 0,011$	0.030



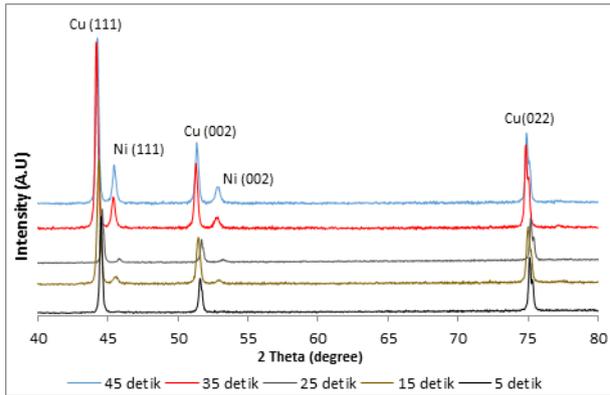
Gambar 27. Grafik hubungan antara ΔR_s terhadap variasi t

Pada Gambar 27 tampak bahwa ΔR_s berbanding terbalik secara linier dengan penambahan waktu deposisi. Nilai resistivitas keping berbanding terbalik terhadap nilai tebal lapisan yang terbentuk, sehingga semakin tebal lapisan Ni yang terdeposisikan ke Cu maka nilai resistivitas keping akan semakin menurun. Hal ini juga sesuai dengan Gambar 16 bahwa semakin besar waktu deposisi akan semakin tebal lapisan yang terbentuk.

C. Uji Struktur Mikro

Pengujian XRD dilakukan untuk mengetahui struktur kristal dari lapisan yang terbentuk. Karakterisasi menggunakan sumber Cu dengan panjang gelombang (λ) adalah 1,54060 Å serta *range* 2θ yang digunakan yaitu 40° - 80° . Hasil uji XRD berupa kuantisasi intensitas (I) difraksi sinar-X dan sudut hamburan (2θ) dari suatu bahan. Tiap pola yang muncul pada XRD mewakili satu bidang kristal yang memiliki orientasi tertentu. Pola difraksi sampel Cu/Ni pada Gambar 28 merupakan hasil pengolahan data struktur kristal bahan Cu dan Ni yang dicocokkan dengan database *crystallography*

untuk struktur kristal yang paling sesuai dengan data sampel.



Gambar 28. Spektrum XRD dari lapisan Cu/Ni pada variasi waktu

Semakin teratur dan panjang susunan suatu atom yang membentuk kristal, maka jumlah cacahan dari intensitas yang mengenai atom-atom akan semakin banyak sehingga semakin banyak pula cacahan difraksi yang diterima oleh detektor yang menyebabkan intensitas terbentuk runcing dan tajam. Terlihatnya puncak pada grafik spektrum XRD dari lapisan Cu/Ni dalam Gambar 28 menandakan telah terbentuknya kristal pada proses pelapisan.

Puncak tertinggi difraksi muncul pada sudut sudut tertentu, dengan bidang refleksi Cu dan Ni adalah (111), (002) dan (022). Bidang refleksi (111), (002) dan (022) masuk dalam kategori *Face Center Cubic (FCC)*. Dari puncak grafik, dapat dilakukan perhitungan untuk memperoleh nilai hkl yang nantinya akan menunjukkan kategori kristal yang terbentuk. Sudut difraksi dan intensitas lapisan Cu ditampilkan pada Tabel 11.

Tabel 11. Sudut difraksi dan intensitas lapisan Cu/Ni

Waktu Deposisi	Cu		Ni		Hkl	
	Sudut	Intensitas	Sudut	Intensitas	Cu	Ni
5	44.479	2805	-	-	111	-
	51.572	1229	-	-	002	-
	75.107	2004	-	-	022	-
15	44.322	4594	45.52	355	111	111
	51.409	1969	52.84	174	002	002
	74.99	2492	-	-	022	-
25	44.575	1434	45.74	147	111	111
	51.671	736	53.18	111	002	002
	75.183	1485	-	-	022	-
35	44.148	5977	45.374	1221	111	111
	51.255	2438	52.74	544	002	002
	74.838	3346	-	-	022	-
45	44.222	5278	45.428	1517	111	111
	51.331	2170	52.838	873	002	002
	74.89	2742	-	-	022	-

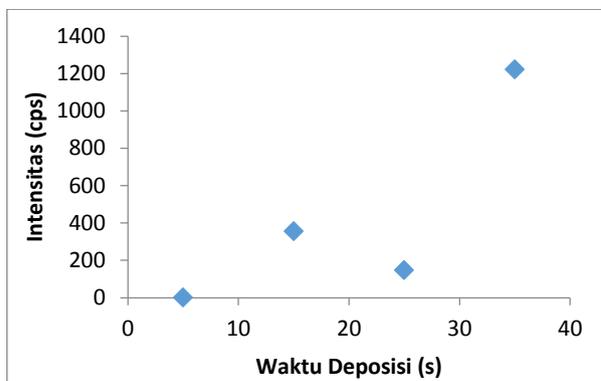
Data hasil penelitian dibandingkan dengan tabel parameter refleksi standar Cu pada Tabel 12 dan 13 yang diperoleh dari analisis dengan menggunakan aplikasi *Diamonds* diperoleh data yang hampir identik. Puncak tertinggi Cu adalah pada sudut 2-Theta sekitar 44, 51 dan 75. Puncak tertinggi Ni adalah pada sudut 2-Theta sekitar 45, 52, 78.

Tabel 12. Parameter refleksi Cu hasil XRD
(Catherine, 2011)

No.	2 Theta	d-spacing	Int	F	h	k	l	Mult
1	43.312	2.0873	361632.99	86.50	1	1	1	8
2	50.444	1.8077	166908.42	80.64	0	0	2	6
3	74.117	1.2782	89794.61	63.52	0	2	2	12

Tabel 13. Parameter refleksi Ni hasil XRD
(Haglund, 1993)

No.	2 Theta	d-spacing	Int	F	h	k	L	Mult
1	45.502	1.9919	286936.44	86.5	1	1	1	8
2	53.045	1.7250	132844.65	80.64	0	0	2	6
3	78.324	1.2198	75484.68	63.52	0	2	2	12



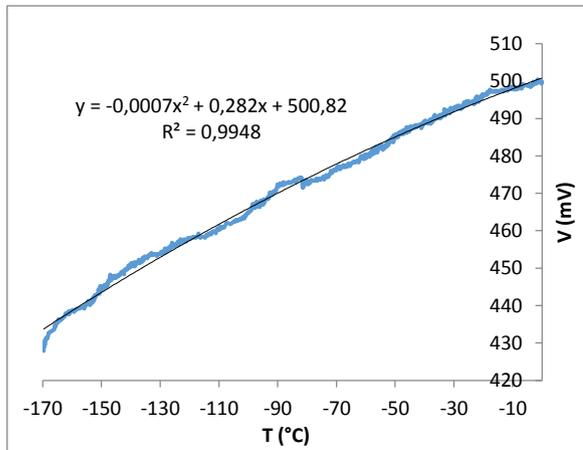
Gambar 29. Keteraturan kristal Ni setiap sampel dengan variasi waktu deposisi

Dari grafik pada Gambar 29, terlihat peningkatan intensitas dengan waktu deposisi kecuali pada waktu deposisi 25 s. Peningkatan

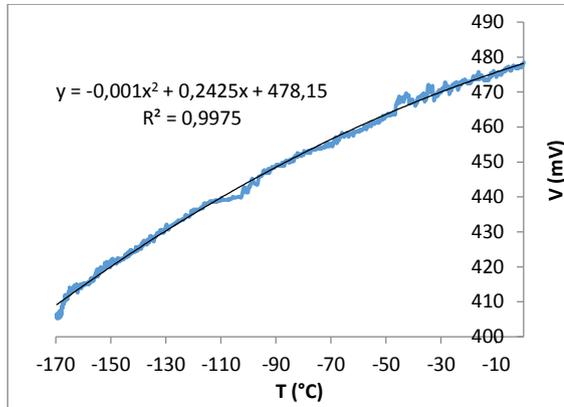
ketebalan lapisan Ni hasil deposisi menyebabkan semakin banyak atom Ni yang terdapat pada lapisan sehingga cacahan difraksi yang diterima detektor semakin banyak. Dengan demikian semakin tebal lapisan Ni maka keteraturan susunan atom semakin meningkat.

C. Uji Kinerja Sensor Suhu

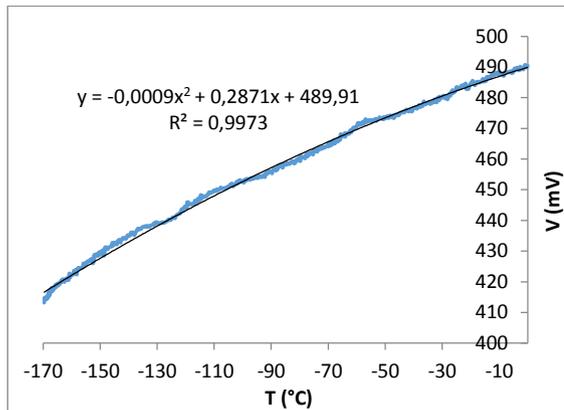
Penentuan karakteristik dari kinerja RTD sebagai sensor suhu rendah dilakukan dengan *fitting* data polinomial orde dua dari output data. Output data elemen RTD Cu/Ni berupa tegangan (V) dan termokopel *Vernier* berupa suhu (°C). Profil kinerja elemen RTD sebagai sensor suhu rendah pada variasi waktu deposisi disajikan pada gambar 30 – 34.



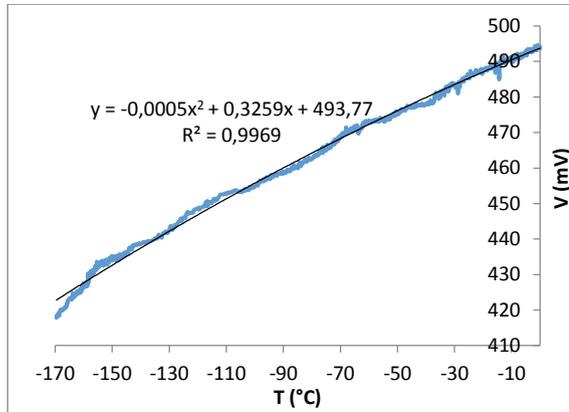
Gambar 30. Grafik hubungan antara tegangan terhadap suhu untuk lapisan tipis Cu/Ni pada waktu deposisi 5 s



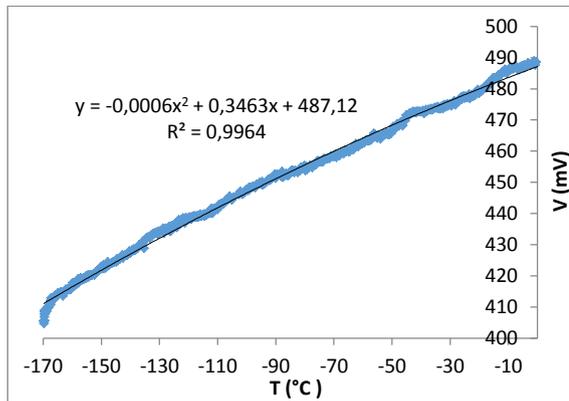
Gambar 31. Grafik hubungan antara tegangan terhadap suhu untuk lapisan tipis Cu/Ni pada waktu deposisi 15 s



Gambar 32. Grafik hubungan antara tegangan terhadap suhu untuk lapisan tipis Cu/Ni pada waktu deposisi 25 s



Gambar 33. Grafik hubungan antara tegangan terhadap suhu untuk lapisan tipis Cu/Ni pada waktu deposisi 35 s



Gambar 34. Grafik hubungan antara tegangan terhadap suhu untuk lapisan tipis Cu/Ni pada waktu deposisi 45 s

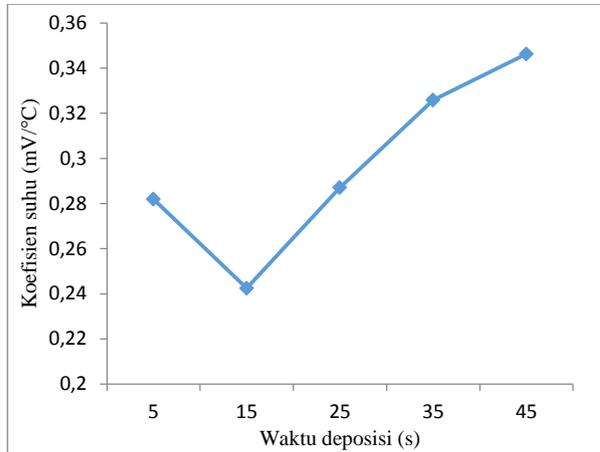
Secara umum, karakteristik dari kinerja beberapa sampel RTD dapat dilihat dari gambar 30, 31, 32, 33, 34, 35. Kinerja elemen RTD sebagai sensor suhu rendah diperoleh dari nilai koefisien T

pada persamaan polinomial orde dua pada grafik. Nilai koefisien T menunjukkan kepekaan sensor suhu rendah. Jika nilai koefisien T semakin besar, maka dapat dikatakan bahwa lapisan Cu/Ni memiliki kepekaan yang lebih baik, sehingga kinerja dari sensor suhu rendah akan lebih baik. Persamaan yang dihasilkan dari grafik masing-masing sampel dirangkum pada Tabel 14.

Tabel 14. Persamaan polinomial orde 2 antara tegangan (V) dan suhu medium (T) pada uji kinerja sensor suhu

Waktu Deposisi (s)	Persamaan $y = ax^2+bx+c$	Koefisien Suhu (mV/ °C)
5	$V = -0.0007 T^2 + 0.2820 T + 500.82$	0.2820
15	$V = -0.0010 T^2 + 0.2425 T + 478.15$	0.2425
25	$V = -0.0009 T^2 + 0.2871 T + 489.91$	0.2871
35	$V = -0.0005 T^2 + 0.3259 T + 493.77$	0.3259
45	$V = -0.0006 T^2 + 0.3463 T + 487.12$	0.3463

Dari Tabel 14 terlihat bahwa dari waktu deposisi 15 sampai 45 s koefisien temperatur semakin besar. Dengan demikian dapat dikatakan pada penelitian ini bahwa semakin tebal lapisan yang terbentuk, maka kepekaan lapisan Cu/Ni sebagai elemen RTD akan cenderung lebih meningkat seperti yang terlihat pada Gambar 35.



Gambar 35. Pengaruh waktu deposisi terhadap koefisien suhu

Semakin baik kepekaan pada lapisan Cu/Ni, maka kinerja lapisan Cu/Ni sebagai sensor suhu rendah juga akan lebih baik. Kinerja lapisan sebagai elemen RTD yang paling baik ditunjukkan pada sampel pada waktu deposisi 45 s yang mempunyai nilai koefisien suhu sebesar 0,3463 mV/°C dengan persamaan $V = -0.0006 T^2 + 0.3463 T + 487.12$.



Berdasarkan penelitian mengenai sintesis lapisan Cu/Ni dengan metode elektroplating berbantuan medan magnet pada variasi waktu deposisi maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut

1. Waktu deposisi berpengaruh secara linear terhadap ketebalan lapisan yang terbentuk. Semakin lama waktu deposisi maka akan semakin tebal lapisan yang terbentuk. Semakin tebal lapisan Ni yang terdeposisikan ke Cu maka resistivitas keping akan semakin menurun. Dengan demikian resistivitas keping lapisan (ΔR_s) berbanding terbalik secara linier dengan penambahan waktu deposisi.
2. Hasil analisis *X Ray Diffraction* (XRD) menunjukkan bahwa pada waktu deposisi 5 s belum terdapat puncak Ni. Semakin lama waktu deposisi maka semakin meningkat keteraturan susunan struktur mikro lapisan Ni hasil deposisi.
3. Kinerja lapisan sebagai elemen RTD yang paling baik ditunjukkan pada sampel pada waktu deposisi 45 s yang mempunyai nilai koefisien suhu sebesar $0,3463 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ dengan persamaan $V = -0.0006 T^2 + 0.3463 T + 487.12$.



DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, J.C., Leaver, K.D., Rawlings, R.D., dan Alexander J.M. 1990. *Material Science Fourth Edition*. Singapore: Colset Private Limited
- Anonim, <https://basiccopper.com/22mi4x5coshp1.html>.
- Anonim, <https://contenti.com/nickel-silver-sheet-metal>.
- Callister, W. D. Dan Rethwisch, D. G. 2012. *Fundamentals of Materials Science and Engineering An Integrated Approach, 4th Edition*. USA: Wiley.
- Chang, R. 2003. *Kimia Dasar Konsep-konsep Inti Edisi Ketiga Jilid 1*. Alih Bahasa Departemen Kimia ITB. Jakarta: Erlangga.
- Chowdhury, T., & Bulbul, H. (2010). Design of a Temperature Sensitive Voltage Regulator for AC Load Using RTD. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 12 (2) 7896-7903.
- Ebadi, M., Basirun, W. J., & Alias, Y. (2010). Influence of magnetic field on the electrodeposition of Ni-Co alloy. *Journal of Chemical Sciences*, 122(2), 279-285. <https://doi.org/10.1007/s12039-010-0032-9>

- 
- Fraden, J. 2003. *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. New York: Springer.
- Halliday, D. dan Resnick, R. 1994. *Fisika Jilid 2 Edisi Ketiga*. Jakarta: Erlangga.
- Higgins, R. A. 1993. *Engineering Metallurgy Part 1 Applied Physical Metallurgy Sixth Edition*. London: Arnold.
- Julianto, Bangun dan Supriyadi. 2013. Pengaruh Suhu terhadap Hambatan Rangkaian Listrik. *Jurnal Fisika Vol 3 No.2*
- Khadatkar, R. M., Kumar, S., & Pattanayak, S. C. (2004). Cryofreezing and cryofreezer. *Kriogeniks*, 44(9), 661-678. <https://doi.org/10.1016/j.kriogeniks.2004.03.008>
- Kołodziejczyk, K., Miękoś, E., Zieliński, M., Jaksender, M., Szczukocki, D., Czarny, K., & Krawczyk, B. (2018). Influence of constant magnetic field on electrodeposition of metals, alloys, conductive polymers, and organic reactions. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 1629-1647. <https://doi.org/10.1007/s10008-017-3875-x>
- Kustija, Jaja. 2012. *Modul Sensor dan Transduser*. Dosen dan Peneliti Bidang Elektro
- Lebioda, M., & Rymaszewski, J. (2015). Dynamic Properties of Cryonics Temperature Sensors. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2 (1), 225.
- Maher, A., Velusamy, V., Riordan, D., & Walsh, J. (2014). Modelling of Temperature Coefficient of Resistance of a Thin Film RTD Towards Exhaust Gas Measurement Applications. *Proceedings of the 8th International*



Conference on Sensing Technology, (p. 19).
Liverpool.

Monzon, L. M., & Coey, J. M. (2014). Magnetic fields in Electrochemistry: The Kelvin force. A Mini-Review. *Electrochemistry Communications*, 42-43.

Purwanto & Syamsul Huda, 2005. *Teknologi Industri Elektrolating*. Badan Penerbit Universitas Diponegoro: Semarang.

Santosa, Bambang dan Martijanti Syamsa. 2007. Pengaruh Parameter Proses Pelapisan Nikel Terhadap Ketebalan Lapisan. *Jurnal Teknik Mesin* Vol. 9, No. 1, April 2007: 25 – 30.

Schlesinger, Mordheca & Milan Pauvinovic. 2010. *Modern Electroplating Fifth Edition*. New Jersey : WILEY.

Seshan, K. (2002). *Handbook of Thin-Film Deposition Processes and Techniques - Principles, Methods, Equipment and Applications (2nd Edition)*. Chapter 8 Sputtering and Sputter Deposition.
<https://doi.org/10.1002/ange.1989101066>
2

Seshan, K. (2002). *Handbook of Thin-Film Deposition Processes and Techniques - Principles, Methods, Equipment and Applications (2nd Edition)*. Chapter 8 Sputtering and Sputter Deposition.
<https://doi.org/10.1002/ange.1989101066>
2

- 
- Suarsana, I Ketut. 2008. Pengaruh Waktu Pelapisan Nikel Pada Tembaga dalam Pelapisan Khrom Dekoratif terhadap Tingkat Kecerahan dan Ketebalan Lapisan. *Cakram* Vol. 2 No. 1 Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana, p.48-60
- Sugiyarta, A. P., Bayuseno, dan Nugroho, S. 2012. Pengaruh Konsentrasi Larutan dan Kuat Arus terhadap Ketebalan pada Proses Pelapisan Nikel untuk Baja Karbon Rendah. *ROTASI* – Vol. 14, No. 4, Oktober 2012: 23-27.
- Toifur, M. 2004. Potensi Multilapisan Tipe Superkekisi NiFe/Ag/NiFe dan Ag/NiFe/Ag/NiFe Sebagai Bahan Sensor Medan Magnet Lemah Berbasis Gejala Magnetoresistansi Raksasa (GMT). *Disertasi* Program Pascasarjana: UGM Yogyakarta.
- . 2007. Deposition of Cu/Ag At The Various Deposition Time For Resulting The High Quality Decorative Silver, *Proceeding of The International Seminar on Natural Science and Applied Natural Science*, Yogyakarta 2007, ISBN: 978-979-3812-09-0.
- . 2014. Memahami Resistivitas Berbagai Jenis Probe Arus-Tegangan. *Prosiding Pertemuan Ilmiah XXVIII HFI Jateng & DIY*. ISSN: 0853-0823. P. 1-7.
- , Nuramalia A., Okimustava O., Sukarelawan M.I., 2017. Pengaruh Waktu Deposisi Pada Tebal Lapisan Struktur Mikro, Resistivitas Keping Lapisan Tipis Cu/Ni Hasil Deposisi Dengan Teknik Electroplating. *Jurnal Material dan Energi Indonesia* 2 (7).
- , Yuningsih, Y., Khusnani, A. (2018). Microstructure , thickness and sheet



resistivity of Cu / Ni thin film produced by electroplating technique on the variation of electrolyte temperature Microstructure , thickness and sheet resistivity of Cu / Ni thin film produced by electroplating technique on the variation of electrolyte temperature. IOP Conf. Series: *Journal of Physics: Conf. Series* 997 (2018) 012053

Tuaweri, T.J., Adigio, E.M., & Jombo, P.P. 2013. A Study Of Parameters Zinc Electrodeposition from a Sulphate Bath. *International Journal of Engineering Science Invention*. ISSN 2319-6726. P. 17-24.

Yu, Y. D., Song, Z. L., Ge, H. L., & Wei, G. Y. 2014. Influence of magnetic fields on cobalt electrodeposition. *Surface Engineering*, 30(2), 83–86. <https://doi.org/10.1179/1743294413Y.0000000229>

Zielinsky, M., Miękoś, E., Szczukocki, D., Dałkowski, R., Leniart, A., Krawczyk, B., & Juszcak, R. 2015. Effects of Constant Magnetic Field on Electrodeposition of Co- W-Cu Alloy.

Daftar Simbol

T	Suhu	$^{\circ}\text{C}$
R_T	Tahanan pada suhu T	Ω
R_0	Tahanan pada suhu T_0	Ω
α	Koefisien suhu tahanan TCR	
ΔT	Selisih suhu antara T_0 dan T	$^{\circ}\text{C}$
δ	Tebal lapisan	m
w	Massa yang terbentuk	kg
ρ_{Ni}	Massa jenis Ni	kg/m^3
A	Luas permukaan	m^2
v	Kecepatan	m/s
q	Muatan listrik	Coulomb
S	Jarak antar probe	M
t	Waktu	S
V	Tegangan	volt
I	Arus listrik	Ampere
ρ	Resistivitas	Ωcm
R_s	Resistivitas keping	Ω/Sq
d	Jarak antar bidang	\AA
d_{hkl}	Indek bidang hkl	\AA
hkl	Indeks miller	



GLOSARIUM

- Sensor suhu : Sebuah alat yang dapat mengubah input besaran fisika berupa suhu menjadi besaran tegangan maupun arus sebagai outputnya.
- Elektroplating : Proses pelapisan suatu bahan logam pada logam lain.
- Larutan elektrolit : Larutan yang dapat menghantarkan arus listrik.
- RTD : Material yang bekerja berdasarkan perubahan hambatan yang disebabkan oleh perubahan suhu.
- Lapisan Cu/Ni : Pelapisan nikel dengan teknik elektroplating di atas permukaan tembaga pada papan PCB
- PCB : Sebuah papan yang digunakan untuk mendukung semua komponen-komponen dalam elektronika.
- X-Ray Diffraction* : Alat karakterisasi struktur mikro untuk mengetahui struktur kristal yang telah dibentuk dari proses pelapisan.
- SEM-EDX : Alat karakterisasi struktur mikro untuk mengetahui gambar permukaan dan komposisi dari lapisan yang terbentuk.

Penerbit: K-Media
Bantul, Yogyakarta
@kmediacorp
@kmedia.c@gmail.com
www.kmedia.co.id

ISBN 978-602-451-626-0

