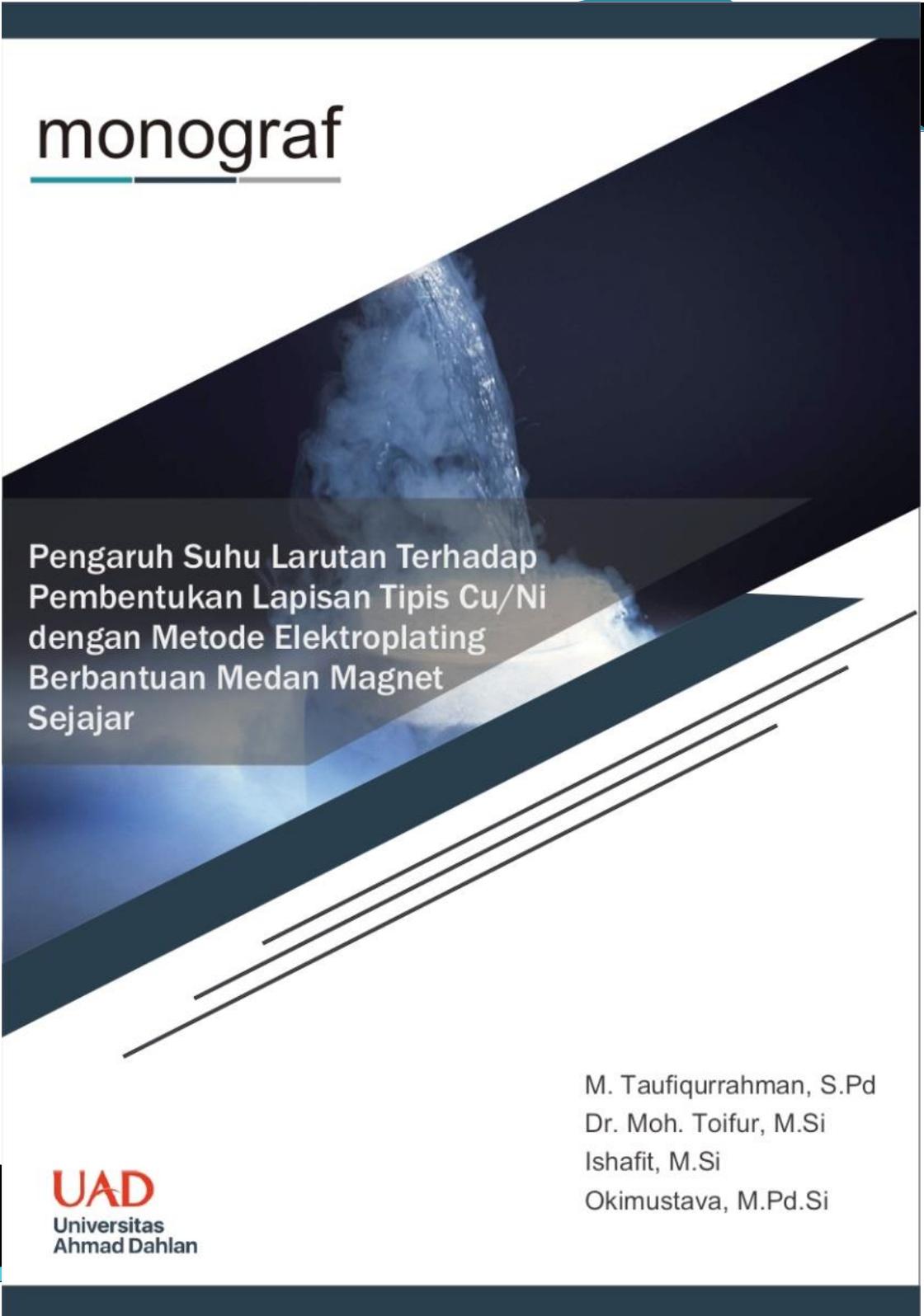


monograf



Pengaruh Suhu Larutan Terhadap Pembentukan Lapisan Tipis Cu/Ni dengan Metode Elektroplating Berbantuan Medan Magnet Sejajar

UAD
Universitas
Ahmad Dahlan

M. Taufiqurrahman, S.Pd
Dr. Moh. Toifur, M.Si
Ishafit, M.Si
Okimustava, M.Pd.Si

MONOGRAF

Pengaruh Suhu Larutan Terhadap Pembentukan Lapisan
Tipis Cu/Ni dengan Metode Elektroplating Berbantuan
Medan Magnet Sejajar

vii + 57 hal ; 14 x 21 cm

- Penulis** : M. Taufiqurrahman, S.Pd, Dr. Moh.
Toifur, M.Si, Drs. Ishafit, M.Si,
Okimustava, M.Pd.Si
- Content
Review** : Cand. Dr. Romi Aprianto, M.Sc,
Cand. Dr. Moh. Irma Sukarelawan,
M.Pd.
- Design Review** : Prof. Dr. Ir. Dwi Sulisworo, MT,
Fahmi Yahya, M.Pd.
- Tata Letak** : Efi Kurniasari
- Desain Sampul** : Mentari Eka Wahyuni
- Cetakan** : Oktober 2020



MONOGRAF

Pengaruh Suhu Larutan Terhadap Pembentukan
Lapisan Tipis Cu/Ni dengan Metode Elektroplating
Berbantuan Medan Magnet Sejajar

M. Taufiqurrahman, S.Pd.
Dr. Moh. Toifur, M.Si.
Ishafit, M.Si.
Okimustava, M.Pd.Si.

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirabbil'alamin, 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 struktur lapisan tipis dengan menggunakan metode elektroplating berbantuan medan magnet sejajar pada variasi suhu larutan. 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 Ishafit, M.Si. 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, September 2020

Penulis

DAFTAR ISI

MONOGRAF	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL	ix
PENDAHULUAN	1
SENSOR SUHU	5
A. Elektroplating	5
1. Pada katoda	10
2. Pada anoda terjadi	10
B. Resistance Temperature Detector (RTD)	11
C. Probe empat titik	12
D. Resistivitas listrik pada logam	15
E. Pengaruh suhu pada elektroplating	17
F. Pengaruh medan magnet	23
G. Difraksi sinar-X	28
H. Material plating	32
1. Tembaga	33
2. Nikel	34
I. Struktur kristal	35
J. Sensor suhu	36
1. Linieritas	37
2. Sensitivitas	37
3. Jangkauan	38
EKPERIMEN	39
A. Metode Eksperimen	39
1. Preparasi Sampel	39
2. Uji resistivitas keping	40
3. Pengujian X-Ray Diffraction (XRD)	42
4. Pengujian kinerja sensor	42
B. Analisis Data	44

1. Menentukan tebal lapisan	46
2. Menentukan resistivitas lapisan	51
3. X Ray Diffraction (XRD)	55
4. Kinerja Sensor	66
KESIMPULAN	72
DAFTAR PUSTAKA	74
Daftar Simbol	81
GLOSARIUM	82
BIOGRAFI	83

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Skema Elektroplating	6
Gambar 2. Pola penyebaran arus listrik dipermukaan pelat logam	15
Gambar 3. Hubungan resistivitas dengan suhu (Callister et all, 2015)	16
Gambar 4. Resistansi pada logam tiga dimensi (Prasetyo dkk., 2018)	17
Gambar 5. Difraksi Bragg	30
Gambar 6. Grafik hubungan intensitas dengan 2θ (Cullity & Stock, 1956)	31
Gambar 7. Tampak depan bentuk dan posisi kristal jenis FCC (Callister et all, 2015)	35
Gambar 8. Rangkaian alat proses elektroplating	40
Gambar 9. Rangkaian alat kinerja sensor suhu rendah	44
Gambar 10. (A) Bagian square wave,	45
Gambar 11. Sampel tembaga sebelum pelapisan (A), dan sesudah pelapisan (B)	46
Gambar 12. Grafik hubungan ketebalan lapisan	48
Gambar 13. Grafik hubungan arus terhadap waktu selama proses deposisi berlangsung	49
Gambar 14. Grafik hubungan pH, berat zat terlarut, Jumlah arus terhadap suhu deposisi	51
Gambar 15. Grafik resistivitas Cu	53
Gambar 16. Grafik perbandingan resistivitas Cu dan resistivitas Cu/Ni	55
Gambar 17. Hasil uji XRD dari lapisan Cu/Ni pada variasi suhu larutan	57
Gambar 18. Perbandingan d-spacing Cu dan Ni	59
Gambar 19. Grain size (D), lattice strain (ϵ), jumlah partikel persatuan area (N), density dislocation (δ)	62
Gambar 20. Grafik kesalahan susun terhadap suhu deposisi	63
Gambar 21. Grafik perbandingan intensitas	65
Gambar 22. Grafik hubungan kristalinitas bahan terhadap suhu deposisi.	65

Gambar 23. . Grafik hubungan tegangan output terhadap suhu sensor Cu/Ni pada suhu deposisi 70°C	67
Gambar 24. Grafik hubungan tegangan output terhadap suhu sensor Cu/Ni pada suhu deposisi 60°C	67
Gambar 25. Grafik hubungan tegangan output terhadap suhu sensor Cu/Ni pada suhu deposisi 50°C	68
Gambar 26. Grafik hubungan tegangan output terhadap suhu sensor Cu/Ni pada suhu deposisi 40°C	68
Gambar 27. Grafik hubungan tegangan output terhadap suhu sensor Cu/Ni pada suhu deposisi 30°C	69
Gambar 28. Pola tingkat kepekaan sensor suhu dan R2 terhadap suhu deposisi	71

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Sifat fisis tembaga (Cu)	33
Tabel 2. Sifat fisis nikel (Ni)	34
Tabel 3. Struktur kristal logam	36
Tabel 4. Tabulasi data penentuan Resistivitas listrik lapisan tipis	41
Tabel 5. Tabulasi data analisis sensor suhu rendah	44
Tabel 6. Hasil pengukuran massa dan tebal lapisan Ni	47
Tabel 7. Resistivitas keping Cu	52
Tabel 8. Resistivitas keping Cu/Ni	53
Tabel 9. Data hasil fitting uji kepekaan sensor suhu rendah Cu/Ni	70

PENDAHULUAN

Kebutuhan sensor suhu rendah (Cryogenic) pada abad ke-21 menjadi sangat penting dikarenakan sangat dibutuhkan berbagai bidang, salah satunya pada bidang industri pangan (Balasubramanian et al., 2012). Bahan makanan yang biasa diawetkan menggunakan teknik pengawetan cryogenic adalah daging, ikan, bahkan buah. Alasan teknik ini lebih banyak digunakan karena tingkat kedinginan yang sangat stabil bila dibandingkan metode pendinginan konvensional yang berbahan dasar amonia. Teknik pengawetan cryogenic adalah teknik pengawetan dengan menggunakan *liquid nitrogen* (LN₂) dengan suhu yang sangat rendah yaitu -196°C (Bo at all, 2013). Rendahnya suhu LN₂ mengakibatkan pembekuan kadar air makanan sehingga menghambat pertumbuhan organisme pembusuk pada bahan makanan. Namun penggunaan LN₂ juga perlu diperhatikan karena tidak cocok

untuk semua jenis bahan makanan karena dapat merusak struktur jaringan makanan seperti halnya sayur. Oleh karena itu metode pembekuan dengan teknik ini perlu dikontrol dengan keberadaan sensor suhu rendah yang mampu mendeteksi perubahan suhu tersebut secara terus menerus.

Sensor cryogenic yang umum digunakan adalah *resistance temperature detector* (RTD) dan thermocouple (Lebioda & Rymaszewski, 2015). Namun dalam fakta di lapangan penggunaan thermocouple biasanya sering mengalami keterbatasan batas pengukuran, bahkan kurang peka mendeteksi suhu yang sangat rendah. Hal ini justru sangat berbeda dengan RTD yang memiliki keunggulan yaitu dengan *output* yang lebih baik dan akurasi sensor yang tinggi (Sung et al, 2014;Zhu, 2015). Prinsip dasar kerja RTD adalah dengan memanfaatkan hambatan jenis bahan yang berubah terhadap perubahan suhu.

Pembuatan RTD biasanya menggunakan logam murni seperti, platinum (Pt), nikel (Ni), tembaga (Cu). Dalam penelitian ini akan dibuat lapisan Cu/Ni sebagai sensor suhu rendah tersebut karena harganya yang relatif lebih murah di bandingkan Pt. Selain itu Cu sebagai sensor suhu memiliki keunggulan linier, akurat, dan jangkau ukur yang luas. Kekurangannya adalah resistivitasnya yang rendah.

Oleh karena itu untuk menaikkan resistivitas maka Cu disintesis dengan Ni untuk menghasilkan lapisan Cu/Ni. Metode sintesis yang digunakan adalah elektroplating. Elektroplating sendiri memiliki beberapa keunggulan yaitu proses lebih cepat, ekonomis, dan proses yang dapat dikontrol (Prasad., 2018) . Terlebih lagi metode sintesis ini mulai banyak mendapat perbaikan dalam pengoptimalan hasil pelapisannya salah satunya dengan penerapan medan magnet.

Medan magnet dalam proses elektroplating bertujuan untuk meningkatkan struktur endapan. Namun pada penelitian terdahulu yang dilakukan oleh (Wustha et all., 2020) dengan menerapkan medan magnet tegak lurus dilaporkan bahwa terdapat struktur lapisan yang terbakar dan menurunnya nilai resistivitas bahan. Timbulnya cacat seperti ini di khawatirkan mempengaruhi kinerja sensor (Yan et all., 2015). Karena adanya hamburan elektron pada saat pengujian kepekaan sensor.

Berdasarkan penumbuhan struktur lapisan yang tidak seragam tersebut dilakukan variasi medan magnet sejajar pada proses elektroplating. Peran medan magnet sejajar adalah membantu penyebaran ion agar menjadi lebih seragam (Aguilera et all., 2019). Berbeda dengan penerapan

medan magnet tegak lurus yang menyebabkan penyebaran ion menyimpang diakrena oleh hadirnya gaya Lorentz. Parameter penting lain yang sangat perlu diperhatikan selama proses elektroplating adalah suhu. Suhu larutan memiliki peranan yang sangat penting dalam elektroplating berkaitan dengan transport massa. Pada suhu tinggi kekentalan larutan berkurang dan terjadinya peredaman aktivitas gas hidrogen (Mordechay & Milan, 2010). Hal ini akan memudahkan ion-ion Ni menembus medium menuju ke katoda. Akibatnya pembentukan deposit menjadi lebih cepat serta lebih halus. Sehingga dengan perlakuan suhu dapat diharapkan dapat menghasilkan lapisan Ni yang halus dan homogen sehingga dapat dihasilkan sebagai sensor suhu yang lebih berkualitas.

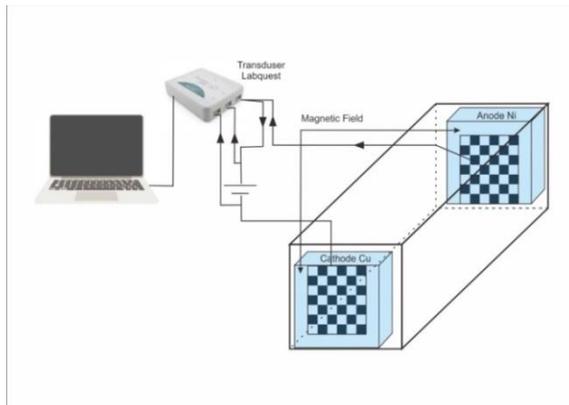
Pada kajian ini akan dibuat bahan sensor *cryogenic* berupa lapisan Cu/Ni dengan bantuan medan magnet sejajar. Proses elektrodeposisi nikel (Ni) dilakukan dengan metode elektroplating pada tegangan 4,5 V, suhu elektrolit divariasasi 30°C - 70°C, jarak antar elektroda 4 cm selama 60 detik, dan medan magnet sebesar 200 gauss. Permasalahan yang perlu ditelaah adalah bagaimana pengaruh suhu deposisi terhadap resistivitas lapisan, struktur kristal yang terbentuk dan kinerja bahan saat diaplikasikan sebagai sensor suhu rendah.

SENSOR SUHU

A. Elektroplating

Elektroplating dalam dunia industri merupakan proses pengerjaan akhir (*finishing*). Elektroplating adalah proses pengendapan ion logam pada elektroda negatif melalui proses elektrolit dengan aliran arus listrik sehingga membentuk lapisan struktur logam pada substrat (Le et al., 2015). Teknologi pelapisan logam dengan metode ini dapat mengubah sifat suatu bahan, baik sifat fisik, optik, elektrik maupun sifat mekanik suatu bahan. Manfaat elektroplating begitu banyak mendapat perhatian dari dunia industri maupun scientist karena produksinya cepat, proses pengaplikasiannya yang sangat mudah, serta polusi yang dihasilkan rendah (Chuang et al, 2019). Selama proses elektroplating parameter arus listrik searah

penting untuk digunakan karena menyebabkan terjadinya proses reduksi pada elektroda seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema Elektroplating

Selama proses elektroplating melibatkan dua reaksi yaitu reaksi fisika dan kimia. Reaksi fisika yang dimaksud adalah hukum Faraday. Dalam hal ini hukum Faraday menyatakan jumlah reaksi elektrokimia yang terjadi pada elektroda sebanding dengan jumlah kuantitas muatan listrik Q yang melewati seluruh sel elektrokimia (Mordechay & Milan, 2010). Jika diasumsikan berat suatu partikel adalah w maka hukum Faraday menyatakan.

$$w = ZQ \quad (1)$$

dengan, w = massa atom yang tedeposit (g)

Z = equivalen elektrokimia (gC^{-1})

Q = muatan listrik (C)

Nilai Q sendiri merupakan produk yang dihasilkan dari I dalam bentuk *ampere* yang berlalu dalam waktu t berupa detik.

$$Q = It \quad (2)$$

dengan, Q = muatan listrik (C)

I = arus listrik (A)

t = waktu (s)

Sehingga jika persamaan (1) disubstitusikan kedalam persamaan (2) maka menjadi.

$$w = ZIt \quad (3)$$

dengan, w = massa atom yang terdeposit (g)

Z = equivalent elektrokimia (gC^{-1})

I = arus listrik (A)

t = waktu (s)

Menurut hukum Faraday, produksi satu gram sebanding dengan produk yang terdeposisi di elektroda W_{eq} , di dalam sel membutuhkan 96,487 C. Nilai 96,487 C disebut sebagai konstanta Faraday (F). Jumlah tersebut adalah jumlah listrik yang diangkut oleh aliran listrik satu ampere yang dialirkan selama satu detik. Jadi satu dapat disimpulkan bahwa satu ekuivalen W_{eq} adalah fraksi molar yang sesuai dengan transfer molar satu elektron.

Beberapa faktor yang mempengaruhi kualitas hasil pelapisan dalam proses elektroplating menurut (Schmitz et al., 2016) adalah:

1. Konsentrasi larutan elektrolit yang bertujuan untuk perataan penyebaran ion masa logam, penyempurnaan butir ion masa logam yang terdeposisi, sebagai pembawa ion masa logam untuk terdeposisi pada substrat, dan memfasilitasi ion partikel masa logam untuk terdeposit secara istimewa pada goresan di permukaan substart.

2. Waktu deposisi yang mempengaruhi perbedaan ketebalan lapisan yang terbentuk serta jumlah ion masa logam yang terdeposisi.

Kemudian menurut (Poroch-Seritan et al, 2015) faktor lain yang mempengaruhi plating adalah:

1. pH larutan elektrolit mempengaruhi ukuran ion masa logam yang terdeposisi dan tekanan pada deposit meningkat.
2. Suhu larutan mempengaruhi penurunan pH larutan elektrolit.

Selama proses elektroplating akan terjadi perbedaan massa sampel sebelum dan sesudah plating hal ini dikarenakan adanya perbedaan ketebalan lapisan Ni yang terdeposisi pada substrat dalam bentuk lapisan tipis, sehingga dapat dihitung dengan persamaan berikut (Toifur et al, 2018).

$$\delta = \frac{W}{\rho A} \quad (4)$$

dengan, δ = tebal lapisan terbentuk (cm)

ρ = masa jenis bahan pelapis (g/cm^3)

W = selisi masa pelapisan (g)

A = luas lapisan sampel (cm^2)

Selain reaksi fisika yang tidak kalah penting yang terjadi adalah reaksi kimia. Reaksi kimia yang terjadi selama proses elektroplating Ni yang terjadi dapat dijabarkan sebagai berikut (Prasetyo dkk, 2018).

1. Pada katoda

a. Pembentukan lapisan Ni



b. Pembentukan gas hidrogen

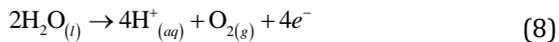


c. Reaksi reduksi oksigen terlarut

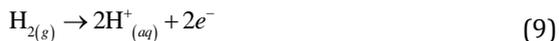


2. Pada anoda terjadi

a. Pembentukan gas oksigen



b. Oksidasi gas oksigen



B. Resistance Temperature Detector (RTD)

Dalam aplikasi tenaga nuklir, pengukuran suhu yang membutuhkan tingkat akurasi yang tinggi dilakukan menggunakan detektor suhu resistansi, karena RTD merupakan salah satu jenis alat ukur suhu. Keuntungan penggunaan RTD adalah karena kepekaan sensor yang begitu tinggi dalam waktu respon perubahan suhu. Terbukti dari perubahan tahanan pada keping RTD yang lebih linier dibandingkan dengan temperatur uji, akan tetapi memiliki resistansi yang lebih rendah dari *thermistor* (Raharjo & Toifur, 2014). RTD merupakan termometer resistansi yang memiliki prinsip kerja memanfaatkan hambatan listrik dari logam yang bervariasi secara linier dengan suhu (Wang et al., 2017). Model matematis linier resistor adalah sebagai berikut.

$$R_T = R_0(1 + \alpha\Delta T) \quad (10)$$

dengan,

R_T = tahanan konduktor pada temperature (Ω)

R_0 = tahanan konduktor pada suhu awal (Ω)

α = koefisien *temperature*

ΔT = selisih antara suhu awal dan akhir ($^{\circ}\text{C}$)

Sampai saat ini sudah dikenal ada dua jenis RTD yaitu *Resistance Temperature Detector Coil* (RTD-C) dan *Resistance Temperature Detector Flim* (RTD-F). Apabila data keluaran RTD membentuk grafik yang tidak linier maka menganalisisnya dapat menggunakan persamaan Callendar-Van Dusen (Jacob Fraden, 2015) sebagai berikut.

$$R_T = R_0(1 + AT + BT^2 + CT^3(T - 100)) \quad (10)$$

dengan A , B dan C adalah koefisien Callendar-van Dusen. Kemudian penentuan karakteristik sensor ditentukan melalui 3 parameter yaitu nilai nominal tahanan, toleransi, dan TCR. Besar nilai TCR menentukan tingkat kepekaan dari RTD, kemudian nilai nominal tahanan pada suhu 0°C adalah 100Ω pada bahan dasar platina, sedangkan toleransinya dapat dilihat dari nilai R saat berada pada suhu 0°C .

C. Probe empat titik

Probe empat titik adalah alat yang digunakan untuk mengukur nilai resistivitas suatu bahan dalam

bentuk lapisan tipis yang terdentuk pada substrat atau pada suatu logam (Toifur & Asmiarto, 2017). Penggunaan probe empat titik sangat akurat dalam mengukur tahanan suatu bahan karena keempat kaki probe empat titik memiliki fungsi yang berbeda, yang mana dua untuk mengukur tegangan dan dua untuk mengalirkan arus pada permukaan bahan, sehingga tahanan yang terukur pada multi master adalah murni tahanan bahan itu sendiri dikarenakan tidak terkontaminasinya bahan dengan tahanan dari probe luar. Probe luar pada proses pengukuran resistivitas mengakibatkan munculnya tahanan pada bahan dikarenakan aliran listrik yang mengalir pada bahan sehingga bahan menjadi panas dan menyumbang tahanan pada bahan (Toifur, 2014). Konsep dasar kerja alat ini adalah pada ke empat kaki probe yang memiliki fungsi yang berbeda, dimana dua digunakan untuk mengukur tegangan dan dua kaki lainnya digunakan untuk mengalirkan arus listrik. Penggunaan *probe* empat titik akan menimbulkan aliran arus listrik disepanjang permukaan bahan sehingga tegangan dapat diukur pada kaki dua dan tiga *probe* empat titik tersebut. Saat bahan memiliki resistivitas atau hambatan jenis logam akan menyebabkan penurunan

pada tegangan. Pola penyebaran arus pada permukaan pelat logam dapat dilihat pada Gambar 2. Dari prinsip tersebut maka terbentuk persamaan berikut (Toifur & Asmiarto, 2017; Dinç et al., 2017).

$$R_s = \frac{\pi \cdot V_{BC}}{\ln 2 \cdot I} \quad (11)$$

Sehingga pada pengolahan data resistivitas menggunakan regresi linier antara V dan I saat pengukuran maka diperoleh.

$$y = ax + b \quad (12)$$

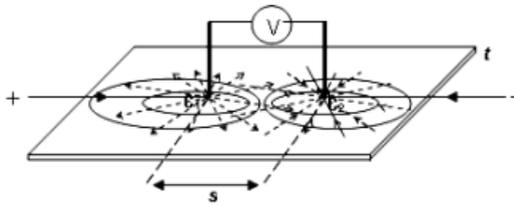
Sehingga persamaan (11) menjadi.

$$V_{BC} = \frac{R_s I}{\pi} \ln 2 \quad (13)$$

dengan, R_s = resistivitas keping (Ω/sq)

V_{BC} = beda potensial (Volt)

I = kuat arus (A)



Gambar 2. Pola penyebaran arus listrik dipermukaan pelat logam

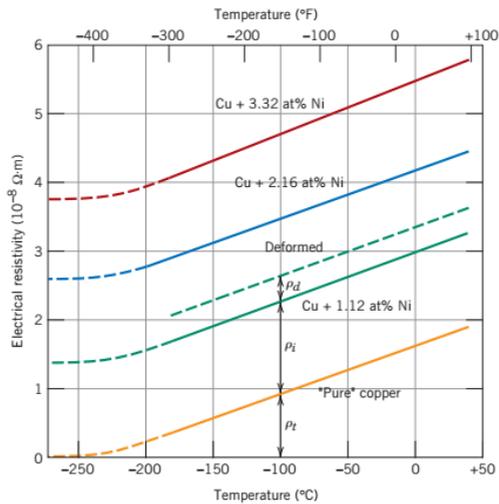
(Toifur & Asmiarto, 2017)

D. Resistivitas listrik pada logam

Secara eksperimental resistivitas total logam adalah kontribusi dari keseluruhan getaran termal elektron, kotoran dan mekanisme hamburan yang terjadi secara independen satu sama lainnya (Callister et al, 2015). Sehingga secara matematika dapat direpresentasikan sebagai berikut.

$$\rho_{total} = \rho_t + \rho_i + \rho_d \quad (14)$$

dengan, ρ_t adalah resistivitas getaran termal, ρ_i adalah resistivitas ketakmurnian bahan, dan ρ_d adalah resistivitas deformasi atau perubahan bentuk bahan.



Gambar 3. Hubungan resistivitas dengan suhu (Callister et all, 2015)

Hubungan resistivitas suhu dengan tembaga serta beberapa perpaduan antara tembaga dengan nikel, yang salah satunya telah dideformasi ditampilkan pada Gambar 3. suatu bahan juga dipengaruhi oleh suhu yang secara teori resistivitas meningkat secara linier dengan suhu kira-kira diatas $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$, sehingga persamaannya dapat ditulis sebagai berikut.

$$\rho_T = \rho_0 + \alpha T \quad (15)$$

dengan, ρ_0 adalah resistivitas awal, α adalah konstanta tahanan suhu, dan T adalah suhu.

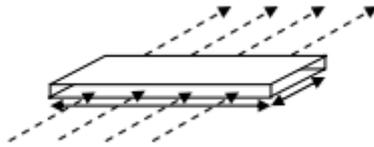
Namun resistivitas pada lapisan tipis berbeda dengan resistivitas bahan yang tiga dimensi, dikarenakan lapisan tipis merupakan bahan dengan lapisan dua dimensi. Jadi secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut.

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (15)$$

dengan, A = luas penampang (cm^2)

l = panjang batang logam (cm)

ρ = resistivitas bahan (Ωm)



Gambar 4. Resistansi pada logam tiga dimensi (Prasetyo dkk., 2018)

E. Pengaruh suhu pada elektroplating

Penggunaan suhu pada saat plating dapat merubah kekentalan cairan elektrolit yang digunakan sebagai media perpindahan ion massa logam dielektroda dari logam ke substrat. Karena saat

kekentalan dari cairan berkurang dengan adanya penambahan suhu akan menyebabkan mudahnya bagi ion massa logam untuk menembus larutan untuk dapat terdepositasi pada substrat. Selain itu pengaruh suhu juga dapat menyebabkan permukaan substrat berpori terbuka dan saling berhubungan dengan partikel logam sehingga menutup pori-pori tersebut dengan butiran mikro berdasarkan ukuran dan bentuk yang berbeda (Gheitaghy et al., 2017). Adanya peningkatan suhu pada proses elektroplating juga menyebabkan adanya perubahan bentuk partikel yang terdepositasi dari yang awalnya berbentuk bulat menjadi berbentuk sudut. Namun penggunaan parameter suhu perlu diperhatikan lagi dikarenakan pada suhu yang relatif tinggi akan merusak kualitas struktur lapisan ion massa logam yang akan terdepositasi pada substrat dan mengganggu laju depositasi (Rashidi & Amadeh, 2010). Sehingga menyebabkan ion massa logam yang terdepositasi pada substrat tidak akan membentuk kristal melainkan amorf (Hamid et al., 2010).

Panas yang dihasilkan dari variasi suhu yang diberikan pada larutan juga merupakan salah satu bentuk dari energi yang dapat diserap oleh molekul ataupun oleh partikel. Sehingga pada saat suhu larutan



meningkat akan mengakibatkan adanya peningkatan pada energi partikel. Energi partikel sendiri berfungsi dalam memberi aktivasi termal kepada partikel sehingga meningkatkan kecepatan gerak dari partikel itu sendiri. Dengan kata lain peningkatan suhu berbanding lurus dengan kecepatan gerak partikel dalam larutan. Peningkatan kecepatan transfer elektron meningkat memungkinkan terjadinya tabrakan antar partikel juga semakin besar. Kejadian ini beresiko menyebabkan bertambahnya jumlah tumbukan antar partikel bahkan hancurnya partikel saat terjadi tumbukan. Saat terjadi tumbukan antar partikel juga menyebabkan kemungkinan reaksi antar partikel semakin besar sehingga menyebabkan terjadinya perubahan struktur atom.

Selama proses termal pembentukan struktur lapisan tipis mengakibatkan terjadinya proses defusi dalam larutan. Defusi adalah proses perpindahan zat atau molekul dari konsentrasi tinggi ke rendah. Proses defusi secara umum dipandang sebagai suatu model permasalahan pada transportasi ion masa logam dalam cairan karena ion massa logam akan bergerak dalam larutan yang memiliki tingkat konsentrasi larutan yang berbeda. Adanya perbedaan konsentrasi larutan

elektrolit disebut dengan gradien konsentrasi. Perbedaan konsentrasi larutan ini menyebabkan terjadinya defusi partikel dalam wadah pengendapan. Hubungan ini dikenal sebagai hukum *Fick's* yang dapat ditulis sebagai berikut.

$$\text{Fluks partikel} = (\text{Koefisien defusi}) \times (\text{Kekuatan pendorong}) \quad (16)$$

Dari persamaan (16) juga dapat ditulis menggunakan bahasa matematika sebagai berikut (Han et al., 2004).

$$J_n = -L\chi \quad (17)$$

dengan, J_n adalah fluks, χ merupakan potensial termodinamik defusi yang bisa ditulis dalam bentuk matematika sebagai berikut.

$$\chi = \frac{\partial F_{\text{sistem}}}{\partial c} = N_v \left[\frac{\partial f_{\text{hom}}}{\partial c} - 2\tilde{K}\nabla^2 c \right] \quad (18)$$

Sehingga persamaan fluks yang sebanding dengan gradien defusi potensial $\nabla\chi$ maka persamaan dapat ditulis sebagai berikut.

$$J = -LN_v \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial f_{\text{hom}}}{\partial c} - 2\tilde{K} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right] \quad (19)$$

dengan, x merupakan variabel spasial dan L adalah koefisien kinetik, dan f_{hom} adalah energi bebas. Sehingga dalam berbagai kasus untuk menyatakan fluks secara umum dapat ditulis sebagai berikut.

$$J = -LN_v \frac{\partial^2 f_{\text{hom}}}{\partial c^2} \frac{\partial c}{\partial x} + 2LK \frac{\partial^3 c}{\partial x^3} \quad (20)$$

dengan, K adalah koefisien gradien energi (\tilde{K}) yang dikalikan dengan nomor atom per satuan volume (N_v). Dalam bentuk ini persamaan Chan-Hilliard dan persamaan fluks Ficks menjadi lebih jelas. Persamaan Ficks memang pada dasarnya dapat diperoleh dengan persamaan 20 dengan menetapkan nilai K dengan nol. Namun dalam hal ini untuk menentukan koefisien difusi bahan kimia secara sederhana dapat menggunakan persamaan berikut.

$$D_{\text{kimia}} = N_v L \frac{\partial^2 f}{\partial c^2} \quad (21)$$

Pada persamaan (21) gaya penggerak untuk defusi tidak hanya bergantung pada gradien potensial kimia meainkan juga bergantung pada gradien lokal dalam konsentrasi dan juga bergantung pada profil konsentrasi larutan itu sendiri. Kemudian kelanjutan dari persamaan (21) dapat mendeskripsikan persamaan konservasi untuk defusi partikel sehingga menjadi.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[L \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial f_{\text{hom}}}{\partial c} - 2\tilde{K} \nabla^2 c \right) \right] \quad (22)$$

Pesamaan 22 merupakan persamaan diferensial untuk menjelaskan evolusi pada sebuah padatan yang dapat mengalami perubahan komposisi dan tranformasi fase fusi pada kisi induk yang sama. Secara umum pada persamaan Cahn-Hilliard merupakan persamaan yang ideal untuk mempelajari topotaktik senyawa interkalasi yang mana secara umum tiga kuantitas antara energi bebas (f_{hom}), koefesiel kinetik L , dan \tilde{K} energi gradien diharapkan bergantung pada suhu dan konsentrasi. Saat ini tidak ada taktik eksperimental yang dirancang untuk mengukur gradien namun ada beberapa metode ekprimen untuk

menentukan koefisien defusi pada persamaan fluks Ficks dengan cukup akurat yang walaupun tidak jelas kaitannya dengan parameter L yang muncul pada persamaan Cahn-Hilliard yaitu dengan persamaan berikut (Mordechay & Milan, 2010).

$$J_n = -D\nabla c \quad (23)$$

dengan, c adalah konsentrasi spesies yang dalam hal ini berupa ion massa logam atau partikel. Dalam proses ini gradien konsentrasi tidak bertindak sebagai pendorong. Istilah fluks pada hukum *Fick's* adalah jumlah zat yang terdefusi yang melewati penampang luas dalam satuan waktu. Gradien konsentrasi sendiri mengacu pada perubahan konsentrasi zat sebagai fungsi jarak. Kedua kuantitas tersebut memiliki arah di samping memiliki nilai eksperimental dan dipandang sebagai vektor. Sedangkan D merupakan defusi konstant secara eksperimental.

F. Pengaruh medan magnet

Penerapan medan magnet pada proses elektroplating menyebabkan adanya pengangkutan pada ion massa logam yang dikarenakan oleh

perbedaan susceptibilitas (kerentanan magnetik) dalam larutan elektrolit yang digunakan pada permukaan elektroda. Proses elektroplating yang menggunakan medan magnet memiliki dua gaya pendorong pada peristiwa tranfer massa ion logam yaitu medan magnet dan tegangan listrik. Persamaan untuk mengetahui energi medan magnet dalam larutan dapat ditulis sebagai berikut (Waskaas & Kharkats, 1999).

$$W_s = \frac{1}{2} \mu_0 (1 + \kappa_s) H_s^2 \quad (24)$$

dengan medan magnet sebagai berikut.

$$B = (1 + \kappa_s) \mu_0 H_s = \text{Konstan} \quad (25)$$

Berdasarkan persamaan (25) jika disubstitusikan kedalam persamaan (24) memberikan persamaan untuk mengetahui pengaruh medan magnet pada proses elektrokimia sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 W_s &= \frac{1}{2} H_s B \\
 W_s &= \frac{B^2}{2\mu_0(1+\kappa_s)} \\
 W_s &= \frac{(1+\kappa_s)^2 \mu_0^2 H_s^2}{2\mu_0(1+H_s)}
 \end{aligned}
 \tag{26}$$

Selain menimbulkan pengaruh, penggunaan medan magnet pada proses elektrokimia berfungsi memberi gaya penggerak tambahan pada ion massa logam dalam larutan sehingga terjadi pergerakan ion massa logam dalam larutan yang biasa ditulis sebagai berikut.

$$\vec{f}_m = -\nabla W_s
 \tag{27}$$

Persamaan (26) disubstitusikan ke (27) sehingga menjadi.

$$\begin{aligned}
\vec{f}_m &= -\nabla \left[\frac{B^2}{2\mu_0(1+\kappa_s)} \right] \\
\vec{f}_m &= -\nabla(1+\kappa_s)^{-1} \frac{B^2}{2\mu_0} \\
\vec{f}_m &= \nabla 2\kappa_2(1+\kappa_2)^{-2} \frac{B^2}{2\mu_0} \\
\vec{f}_m &= \nabla \kappa_2(1+\kappa_2)^{-2} \frac{B^2}{\mu_0}
\end{aligned}
\tag{28}$$

Sehingga terbentuk persamaan untuk mendapatkan gaya penggerak magnetik dalam larutan elektrolit dituliskan sebagai berikut.

$$\vec{f}_m = \frac{B^2}{\mu_0(1+\kappa_s)^2} \nabla \kappa_s
\tag{29}$$

dengan, $\alpha = \frac{d\kappa_s}{dC_p}$ sehingga persamaan (29) menjadi.

$$\vec{f}_m = \frac{B^2 \alpha}{2\mu_0} \nabla C_p
\tag{30}$$

Selain untuk mengetahui efek yang ditimbulkan oleh medan magnet dan persamaan gaya penggerak dalam larutan harus ditambahkan didalam gaya yang lain sesuai yang sangat penting berdasarkan persamaan Navier-Stocks karena berdasarkan persamaan tersebut menjelaskan aliran larutan didalam sistem (Waskaas & Kharkats, 1999).

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}\nabla)\vec{v} = \nu\nabla^2\vec{v} - \frac{\nabla P}{\rho} + \vec{g} + \frac{\vec{f}_m}{\rho} \quad (31)$$

Persamaan secara percepatan secara kontinyu ditulis sebagai berikut.

$$(\vec{v}\nabla) = 0 \quad (32)$$

Persamaan (30) disubstitusikan ke persamaan (31) akan memberikan kita gambaran tentang aliran dalam dalam sistem sebagai berikut.

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} = 0 - \frac{\nabla P}{\rho} + \vec{g} + \frac{B^2 \alpha}{2\mu_0 \rho} \nabla C_p \quad (33)$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} = 0 - \frac{\nabla P}{\rho} + \vec{g} + \frac{B^2 \alpha}{2\mu_0 \rho} \nabla C_p$$

Berdasarkan penurunan persamaan gaya penggerak magnetik kedalam persamaan Navier-Stocks didapatkan persamaan yang dapat digunakan untuk mendeskripsikan aliran dalam cairan sebagai berikut.

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} = - \frac{\left(\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial P}{\partial z} \right)}{\rho} + \vec{g} + \frac{B^2 \alpha}{2\mu_0 \rho} \left(\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \right) C_p \quad (34)$$

G. Difraksi sinar-X

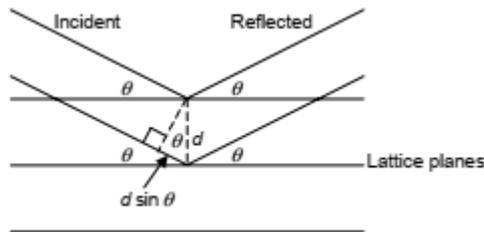
Difraksi sinar-X merupakan serangkaian yang digunakan untuk mempelajari struktur kristalinitas dalam suatu bahan. Difraksi sinar-X memberikan informasi secara terperinci perihal struktur kristal pada sampel karena berkas elektron dapat difokuskan pada

satu area kecil sehingga karakteristik distribusi unsur kimia tertentu pada bahan dapat dilihat (Aliofkhazraei, 2015). Proses difraksi sinar-X adalah dengan mentransmisikan berkas sinar pada suatu bahan dengan intensitas yang lebih kecil daripada intensitas sinar datang. Peristiwa ini terjadi dikarenakan bahan menyerap dan menghamburkan sinar oleh kandungan material bahan. Berkas sinar datang akan saling menguatkan jika memiliki fase yang sama dan saling menghilangkan jika sinar memiliki perbedaan fase. Saat proses sinar saling menguatkan disebut difraksi. Proses difraksi sinar-X harus memenuhi prinsip difraksi Bragg dikarenakan prinsip ini merupakan prinsip sederhana yang diilustrasikan pada Gambar 2.6. pada difraksi sinar-X yang menggunakan prinsip Bragg berasumsi bahwa sudut sinar datang yang ditembakkan sama dengan sudut pantul sinar. Saat proses transmisi sinar-X pada bahan secara konstan radiasi akan tersebar secara elastis pada material bahan sehingga gelombang pantul memiliki panjang gelombang yang sama. Untuk perpaduan antara dua gelombang cahaya membutuhkan perbedaan jalur antara sinar yang dipantulkan dengan jumlah panjang gelombang (λ). Dengan mengacu pada Gambar 5 maka persamaan

untuk kondisi puncak difraksi adalah (Patterson & Bailey, 2010).

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (35)$$

dengan, n adalah bilangan bulat (1, 2, 3, ...), λ adalah panjang gelombang sinar-X yang digunakan dalam penembakan pada sampel, d adalah jarak antar partikel Kristal yang tersusun pada sampel, dan θ yang merupakan sudut penembakan sinar-X terhadap bahan.

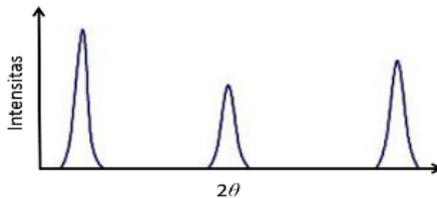


Gambar 5. Difraksi Bragg

(Patterson & Bailey, 2010)

Pada persamaan (35) juga memberikan kita informasi bahwa pada proses deposisi lapisan dengan melakukan variasi pada satu parameter tertentu dan terjadinya perubahan posisi sudut difraksi, hal ini

menyebabkan terjadinya perubahan jarak antar bidang partikel (d). Perubahan besar kecilnya jarak antar bidang ditandai dengan besar sudut θ . Semakin besar sudut θ maka semakin kecil rapat bidang (d) begitu pun sebaliknya. Berkas sinar-X yang terpantulkan oleh bahan tidaklah hanya serta merta di pantulkan oleh permukaan bahan itu saja melainkan juga dipantulkan oleh material bidang-bidang dibawahnya.



Gambar 6. Grafik hubungan intensitas dengan 2θ (Cullity & Stock, 1956)

Pola pemantulan yang dihasilkan oleh bidang ini berupa pola defraktograf sinar-X yang berupa grafik hubungan intensitas dengan 2θ dapat dilihat pada Gambar (6). Dari data defraktograf sinar-X yang berupa grafik struktur lapisan yang terbentuk dapat ditentukan apakah struktur mikro partikel yang terdeposisi tersebut amorf atau kristal serta arah pertumbuhan atomnya. Sehingga arah pertumbuhan atomnya dapat dinyatakan pada bidang dengan indeks

miller. Hubungan antara jarak bidang dengan struktur kristal kubik dinyatakan sebagai berikut.

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (36)$$

dengan, d adalah jarak bidang, hkl adalah indeks miller, a adalah konstanta kisi. Sehingga dari pers (35) dan (36) nilai konstanta kisi dapat diketahui sebagai berikut.

$$a = \frac{\lambda \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}{2 \sin \theta} \quad (37)$$

H. Material plating

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah tembaga (Cu) dan nikel (Ni). Kedua logam tersebut memiliki perang fungsi yang berbeda yang mana ada satu jenis logam yang ditempatkan sebagai substrat dan ada yang logam yang digunakan sebagai bahan pelapis

1. Tembaga

Tembaga merupakan unsur bahan pada sistem periodik dengan lambang Cu yang memiliki nomor masa 63,55 dengan konfigurasi [Ar] $3d^{10} 4s^1$. Tembaga sendiri merupakan bahan dasar yang sangat layak digunakan sebagai sensor suhu rendah karena tembaga mampu merespon perubahan suhu sampai pada $-234,5^{\circ}\text{C}$ (Boylestad, 2014). Sifat-sifat mekanis maupun kimia tembaga dapat ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Sifat fisis tembaga (Cu)

Kriteria	Spesifikasi
Nomor massa	63,55
Nomor atom	29
Massa atom	63,546 g/mol
Massa jenis	$8,96 \text{ g/cm}^3$
Titik lebur	1084°C
Titik didih	2562°C
Fase	Solid
Struktur Kristal	FCC
Jari-jari atom	128 pm
Resistivitas	$16,78 \text{ n}\Omega\cdot\text{m}$ pada suhu 20°C
Kalor peleburan	$13,26 \text{ kJ/mol}$
Kalor penguapan	$300,4 \text{ kJ/mol}$
Elektronegativitas	1,90
Koefisien ekspansi linier	$1,65 \mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ pada suhu 25°C

sumber: (Callister *et all*, 2015)

2. Nikel

Pada proses pembuatan sensor suhu rendah nikel digunakan sebagai pelapis substrat karena Ni memiliki hambatan logam yang lebih besar dibandingkan dengan Cu yaitu $7,3 \mu\Omega\text{cm}$ dan $\mu\Omega\text{cm}$ (Toifur et al, 2017). Pelapisan menggunakan Ni bertujuan untuk meningkatkan kekerasan bahan (An et al., 2015), memberikan perlindungan pada bahan dari korosi (Fu et al., 2014), serta meningkatkan nilai resistivitas bahan, dan pelapisan Cu dan Ni yang menggunakan metode elektroplating memiliki gaya adhesi yang kuat (Okamoto & Watanabe, 2004).

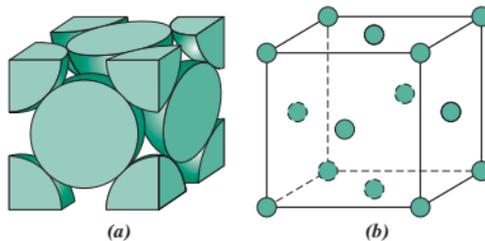
Tabel 2. Sifat fisis nikel (Ni)

Kriteria	Spesifikasi
Nomor massa	58,69
Nomor atom	28
Massa atom	58,6934 g/mol
Massa jenis	8,908 g/cm ³
Titik lebur	1455 °C
Titik didih	2913 °C
Fase	Solid
Struktur Kristal	FCC
Jari-jari atom	124 pm
Resistivitas	69,3 nΩ.m pada suhu 20 °C
Kalor peleburan	17,48 kJ/mol
Kalor penguapan	300,4377,5 kJ/mol
Elektronegativitas	1,91
Koefisien ekspansi linier	13,4 $\mu\text{m.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$ pada suhu 25 °C

sumber: (Callister *et al*, 2015)

I. Struktur kristal

Ada beberapa perbedaan struktur kristal yang ditinjau dari jarak susunan atomnya mulai dari bahan padat yang memiliki struktur yang sederhana bahkan hingga memiliki struktur yang sangat kompleks. Salah satu contoh pada bahan keramik maupun polimer. Urutan atom pada bahan yang berupa padatan menunjukkan struktur atomnya berkelompok kecil dengan pola susunan yang teratur ataupun berulang (Callister et al, 2015). Jadi akan sangat mudah bila menggambarkan struktur kristal bila membaginya dalam sel satuan atau membaginya menjadi entitas kecil secara berulang.



Gambar 7. Tampak depan bentuk dan posisi kristal jenis FCC (Callister et al, 2015)

Pada kebanyakan logam memiliki struktur kristalnya berbentuk satuan geometri kubik, dengan

posisi letak atom pada masing-masing sudut dan pusat permukaan kubus atau biasa disebut struktur kristal FCC. Beberapa bahan logam yang dikenal memiliki struktur kristal ini adalah tembaga, nikel, emas, perak, aluminium, dan emas. Pada Gambar 7 a) menunjukkan gambar pola model struktur kristal FCC pada bola pejal, sedangkan pada gambar b) adalah gambar perpektif yang menunjukkan pusat atom dan posisi atom yang lebih baik.

Tabel 3. Struktur kristal logam

Logam	Struktur Kristal	Radius antar atom (nm)
Aluminium	FCC	0,1431
Tembaga	FCC	0,1278
Emas	FCC	0,1442
Nikel	FCC	0,1246

sumber: (Callister *et al*, 2015)

J. Sensor suhu

Sensor suhu adalah adalah alat yang berfungsi mengkonversi besaran fisis suhu menjadi besaran elektrik tegangan karakteristik sensor suhu adalah sensitivitas yang linier antara suhu dengan tegangan (Rahayuningtyas dkk, 2014). Besaran yang diterima sensor berupa sinyal dimodifikasi oleh rangkaian elektronik didalam sensor. Untuk pengukuran suhu



menggunakan sensor juga harus menggabungkannya secara termal ke objek. Sensor suhu dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu sensor suhu absolut dan sensor suhu relatif. Sensor suhu absolut adalah mengukur suhu dengan merujuk pada titik absolut nol atau titik absolut lainnya contohnya RTD, sementara sensor suhu relatif adalah sensor suhu yang mengukur perbedaan suhu antara dua objek contohnya termokopel (Jacob Fraden, 2016). Ada beberapa hal penting yang perlu dimiliki oleh sensor untuk menentukan karakteristik esensialnya (Fraden, 2010).

1. Linieritas

Linieritas adalah kesesuaian antara besaran input yang diterima sensor yang menghasilkan suatu besaran output yang dikonfersi sensor membentuk hubungan grafik yang linier atau menggambarkan hubungan yang linier.

2. Sensitivitas

Sensitivitas adalah perbandingan besaran output dengan besan input. Sensitivitas suatu sensor ditunjukkan oleh seberapa cepatnya sensor mendeteksi perubahan suhu dalam rentang waktu



yang terbilang singkat. Seperti halnya RTD yang menyatakan suhu dalam bentuk volt per °C ($V/^\circ\text{C}$).

3. Jangkauan

Salah satu parameter yang menandakan sensor itu baik dan layak adalah kesanggupan sensor dalam mengukur dengan jangkauan cakupan yang luas. Jangkauan pengukuran yang sangat luas menandakan rentang pengukuran yang sangat besar.

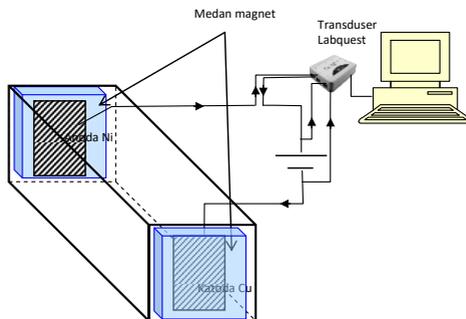
EKSPERIMEN

A. Metode Eksperimen

1. Preparasi Sampel

- a. Pertama alat dirangkai seperti pada gambar 8.
- b. Plat tembaga sebelum disintesis terlebih dahulu dibersihkan menggunakan autosol dan tisu.
- c. Setelah bersih tembaga dibentuk dengan pola *square wave*.
- d. Larutan elektrolit disiapkan dengan campuran H_3BO_3 (Asam Boraks), NiSO_4 (Nikel Sulfat), NiCl_2 (Nikel Klorida), dan H_2O (Air).
- e. Medan magnet sejajar diatur 200 G.
- f. Waktu plating diatur selama 180 s.
- g. Tegangan plating ditetapkan 4,5 V.

- h. Sebelum plating massa Cu diukur dengan neraca ohaus.
- i. Saat akan melakukan plating Cu diletakkan pada katoda dan Ni pada anoda.
- j. Setelah elektroplating, sampel dikeringkan dan diukur massa Ni setelah pelapisan menggunakan neraca ohaus
- k. Suhu deposisi bervariasi mulai dari 30°C sampai 70°C.



Gambar 8. Rangkaian alat proses elektroplating

2. Uji resistivitas keping

Melakukan identifikasi resistivitas keping dilakukan menggunakan *probe* empat titik *home*

made. Peralatan yang digunakan untuk mengukur resistivitas keping bahan antara lain:

- a. Sampel Cu dan Cu/Ni
- b. *Probe* empat titik *Home made*
- c. Sumber tegangan DC
- d. Multimaster
- e. Resistor 5 buah 4.7Ω
- f. *Breadboard*
- g. Kabel jumper

Langkah-langkah uji resistivitas keeping bahan sebagai berikut:

- a. Merangkai alat kemudian meletakkan keempat kaki probe empat titik dipermukaan sampel.
- b. Sumber tegangan DC dihidupkan.
- c. Tegangan ditetapkan pada 6 V.
- d. Nilai tegangan dan arus yang terukur dicatat selama lima kali proses pengukuran pengukuran dan mentabulasinya ke dalam Tabel 4.

Tabel 4. 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 untuk karakterisasi struktur mikro (XRD) bahan adalah Rigaku Miniflex 600.
- b. Langkah-langkah penelitian
 - 1) Sampel diletakkan 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.

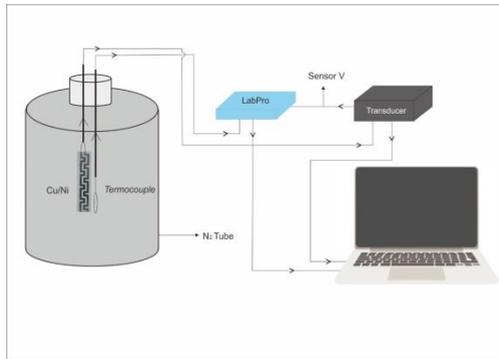
4. Pengujian kinerja sensor

- a. Alat penelitian
 - 1) *Container* nitrogen cair
 - 2) Transduser sebagai pengubah data analog ke digital
 - 3) *Mini Labquest* dari vernier

- 4) Sensor tegangan dari vernier untuk mengukur tegangan keluaran dari sensor Cu/Ni
 - 5) *Thermocouple* sebagai sensor suhu rendah suhu dan alat kalibrasi kinerja sensor
 - 6) Laptop dengan *software logger pro* sebagai penampil data kinerja sensor grafik ($V-T$).
- b. Bahan penelitian

Bahan yang digunakan dalam uji kinerja sensor suhu rendah adalah nitrogen cair (LN_2).

- c. Langkah-langkah pengujian sensor suhu rendah dilakukan sebagai berikut:
- 1) Semua alat dirangkai seperti pada Gambar 9.
 - 2) Membuka *Software logger pro*,
 - 3) Data jenis pengukuran suhu rendah pada *logger pro* diatur.
 - 4) Grafik hubungan $V-T$ sensor Cu/Ni dan *termocouple* diambil secara bersamaan dengan cara memasukkan dan mengeluarkan secara perlahan dalam *container* LN_2 .



Gambar 9. Rangkaian alat kinerja sensor suhu rendah

Tabel 5. Tabulasi data analisis sensor suhu rendah

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

B. Analisis Data

Bahan yang digunakan sebagai sampel merupakan tembaga (Cu) dengan ukuran (10x1,3) cm². Desain sampel terbagi menjadi dua bagian yaitu berbentuk persegi sebagai bagian karakterisasi dan bagian berbentuk square wave yang digunakan sebagai bagian untuk sensor *cryogenic*. Proses deposisi dilakukan menggunakan 5 variasi suhu larutan mulai dari suhu 30°C-70°C yang masing masing dideposisi pada satu

sampel. Desain sampel penelitian dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. (A) Bagian square wave,
(B) Bagian persegi

Desain dibentuk dengan *cutting sticker* yang kemudian dilarutkan dalam larutan feriklorit agar terbentuk sesuai dengan pola litografi yang diinginkan. Setelah sampel terbentuk kemudian sampel dilapisi dengan nikel menggunakan metode electroplating berbantuan medan magnet sejajar. Saat setelah proses pelapisan dilakukan sampel berubah warna dari coklat kemerahan menjadi putih keperakkan. Perubahan warna ini menandakan deposisi telah berhasil dilakukan yang ditandai dengan adanya ion massa Ni pada Substrat Cu sehingga terbentuk Cu/Ni. Perbandingan perubahan warna sampel sebelum dan sesudah pelapisan dapat dilihat pada Gambar 11.



A



B

Gambar 11. Sampel tembaga sebelum pelapisan (A), dan sesudah pelapisan (B)

1. Menentukan tebal lapisan

Ketebalan struktur lapisan Cu/Ni dapat dihitung dengan menggunakan selisih massa sebelum dan sesudah pelapisan. Alat yang digunakan untuk menimbang sampel adalah neraca ohaus dengan tipe PA214. Ketebalan lapisan Ni yang terbentuk dapat dihitung melalui persamaan Lowenheim.

$$\delta = \frac{W}{\rho A_{\text{Ni}}} = \frac{(m_{\text{Cu/Ni}} - m_{\text{Cu}})}{\rho A_{\text{Ni}}} \quad (38)$$

Sedangkan penentuan nilai ralat ketebalan lapisan Ni diperoleh dari perambatan ralat dari $m_{\text{Cu/Ni}}$, m_{Cu} dan A sehingga menjadi:

$$S_{\delta} = \sqrt{\left(\frac{1}{\rho A} S_{m_{\text{Cu/Ni}}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\rho A} S_{m_{\text{Cu}}}\right)^2 + \left(\frac{m_{\text{Cu/Ni}} - m_{\text{Cu}}}{\rho A^2} S_A\right)^2} \quad (39)$$

Penerapan variasi suhu larutan saat elektroplating menyebabkan terjadinya perbedaan ketebalan struktur lapisan yang terbentuk karena ion massa menerima energi termal yang berbeda

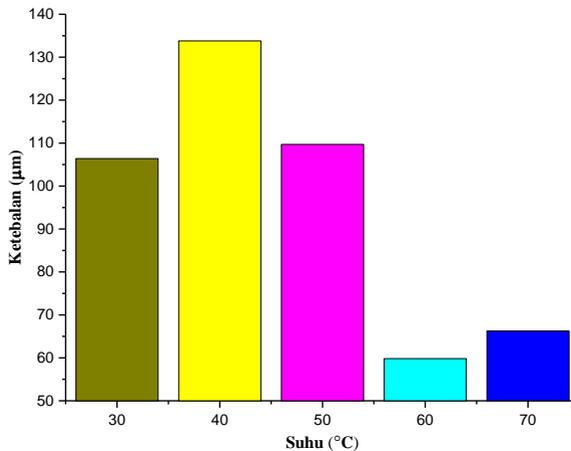
beda. Perbedaan energi tersebut mengakibatkan adanya perbedaan ketebalan lapisan tipis yang terdeposit. Karena adanya perbedaan jumlah kuantitas ion massa Ni yang berpindah pada permukaan Cu. Penentuan ketebalan lapisan dihitung secara langsung dengan mengukur selisih massa sampel sebelum dan sesudah dilapisi dan mengolahnya dengan persamaan (34). Hasil pengukuran tebal lapisan dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil pengukuran massa dan tebal lapisan Ni

Suhu larutan (°C)	Δm (gr)	$(\delta \pm S_\delta) (x 10^{-5})$ (cm)
70	0,045	$66,26 \pm 0,6598$
60	0,041	$59,83 \pm 0,6270$
50	0,074	$109,7 \pm 0,8489$
40	0,091	$133,8 \pm 0,9745$
30	0,072	$106,4 \pm 0,8409$

Berdasarkan Tabel 6 tampak terjadi perubahan massa sebelum dan sesudah deposisi karena adanya ion massa Ni yang terdeposit pada Cu sehingga memberi sumbangsi massa terhadap Cu. Peristiwa ini menandakan sintesis telah berhasil dilakukan. Secara fisik hasil deposisi Ni pada substrat Cu sampel yang mendapat lapisan

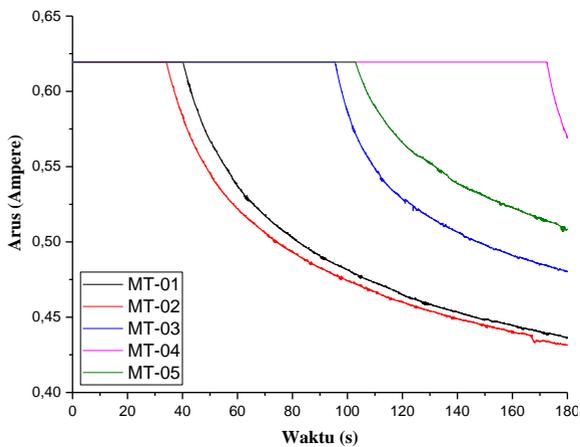
paling tebal adalah sampel yang dideposisi dengan suhu 40°C yaitu $109,7 \times 10^{-5}$ cm dan yang paling tipis dengan suhu deposisi 60°C dengan ketebalan $59,83 \times 10^{-5}$ cm. Perbedaan ketebalan yang terbentuk dari hasil deposisi pada variasi suhu larutan ditampilkan pada Gambar 12.



Gambar 12. Grafik hubungan ketebalan lapisan terhadap suhu deposisi

Perbedaan ketebalan lapisan Cu/Ni yang terbentuk saat deposisi dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti arus saat plating, jumlah azat yang terlarut, pH larutan, dan jumlah arus yang terlibat selama proses deposisi. Arus yang mengalir selama proses elektroplating dengan

bentuk kurva yang lurus merepresentasikan bahwa terjadinya proses pelapisan. Sedangkan patahan yang terbentuk menandakan tidak terjadinya pelapisan karena hambatan yang sudah terlalu besar pada sampel sehingga arus pada katoda tidak mampu lagi menarik ion massa logam untuk terdeposisi (Saleh., 2014).

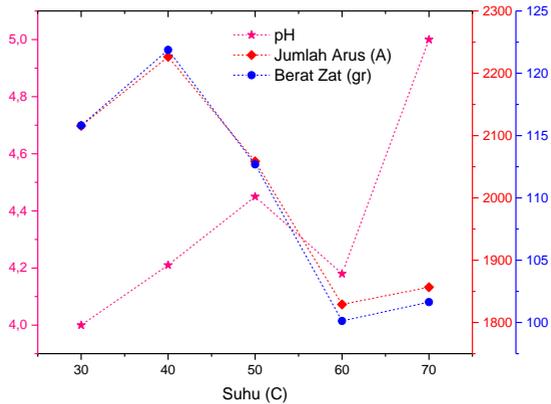


Gambar 13. Grafik hubungan arus terhadap waktu selama proses deposisi berlangsung

Perbedaan bentuk kurva arus saat deposisi menyebabkan adanya perbedaan daya dorong ion massa saat deposisi. Ada yang terjadi secara singkat bahkan secara ada yang terjadi dalam rentan waktu yang lebih lama. Perbedaan ini mengakibatkan adanya perbedaan jumlah partikel



yang luruh dan terbentuk dalam larutan elektrolit selama pelapisan berlangsung. Karena berdasarkan hukum Faraday tentang prinsip dasar pelapisan listrik menyatakan bahwa jumlah zat yang terlepasa sebanding dengan dengan jumlah arus yang mengalir (Saleh.,2014). Sehingga keduanya membentuk pola yang sama dengan ketebalan lapisan. Kemudian parameter selanjutnya yang mempengaruhi ketebalan adalah pH. pH larutan akan berubah seiring meningkatnya suhu larutan. pH memberikan pengaruh yang sangat signifikan terhadap besar kecilnya ukuran kristal yang terdeposit (Kockar et all., 2010 ; Tian et all., 2011), bahkan akan mempengaruhi struktur morfologi lapisan.



Gambar 14. Grafik hubungan pH, berat zat terlarut, Jumlah arus terhadap suhu deposisi

2. Menentukan resistivitas lapisan

Penentuan nilai resistivitas keping lapisan tipis Cu/Ni, dapat menggunakan persamaan (40)

$$V = R_s \frac{\ln 2}{\pi} I \quad (40)$$

Sedangkan penentuan ralat nilai resistivitas bahan menjadi:

$$S_{R_s} = \sqrt{\left(\frac{\partial R_s}{\partial a} S_a\right)^2} = \frac{\pi}{\ln 2} S_a \quad (41)$$

Uji resistivitas keping dilakukan sebanyak lima kali sebelum dan sesudah pelapisan,

tujuannya untuk mengetahui peningkatan resistivitas bahan setelah disintesis. Penentuan resistivitas bahan diukur menggunakan probe 4 titik home made yaitu dengan mencatat arus dan tegangan saat pengukuran.

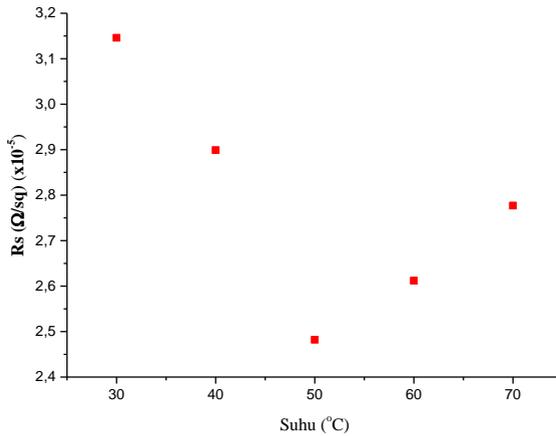
a. Resistivitas Keping Cu

Resistivitas keping Cu adalah resistivitas bahan sebelum di sintesis dengan nikel. Hasil olah data resistivitas dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Resistivitas keping Cu

Suhu Larutan (°C)	R_s (Ω /sq)	$(R_s \pm S_{R_s})$ ($\times 10^{-5}$) (Ω /sq)
70	$4,187 \times 10^{-5}$	$4,187 \pm 2,33$
60	$3,436 \times 10^{-5}$	$3,436 \pm 2,34$
50	$3,445 \times 10^{-5}$	$3,445 \pm 3,34$
40	$4,195 \times 10^{-5}$	$4,195 \pm 2,34$
30	$3,998 \times 10^{-5}$	$3,998 \pm 3,56$

Guna mempermudah pengamatan resistivitas Cu sebelum disintesis dengan Ni dapat dilihat pada Gambar 21.



Gambar 15. Grafik resistivitas Cu

b. Resistivitas keping Cu/Ni

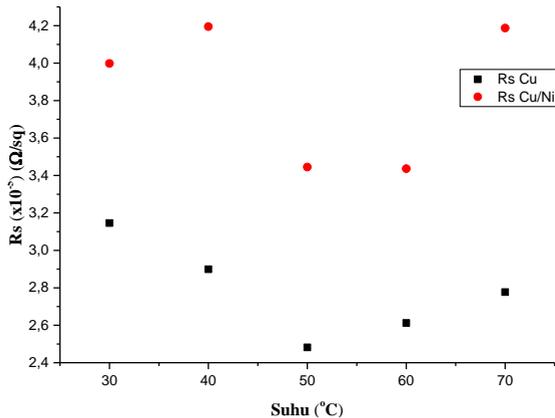
Resistivitas keping Cu/Ni adalah resistivitas keping setelah disintesis dengan Ni. Hasil perhitungan resistivitas keping Cu/Ni dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Resistivitas keping Cu/Ni

Suhu Larutan (°C)	R_s (Ω/sq)	$(R_s \pm S_{R_s})$ ($\times 10^{-5}$) (Ω/sq)
70	$4,187 \times 10^{-5}$	$4,187 \pm 2,33$
60	$3,436 \times 10^{-5}$	$3,436 \pm 2,34$
50	$3,445 \times 10^{-5}$	$3,445 \pm 3,34$
40	$4,195 \times 10^{-5}$	$4,195 \pm 2,34$
30	$3,998 \times 10^{-5}$	$3,998 \pm 3,56$



Berdasarkan Tabel 8 terlihat bahwa resistivitas keping mengalami peningkatan yang sangat signifikan setelah disintesis dengan Ni. Karena untuk meningkatkan resistivitas keping Cu harus mengkombinasikannya dengan bahan yang lain agar membentuk suatu perpaduan (Jacob Fraden, 2016). Terbentuknya perpaduan yang baik secara teori baiknya memenuhi beberapa syarat seperti adanya kesamaan ukuran atom, dan kesamaan kristal (Toifur et al., 2017). Peningkatan resistivitas bahan Cu/Ni juga tampak bergantung pada kadar Ni pada struktur lapisan. Grafik perbandingan resistivitas keping Cu dan resistivitas keping Cu/Ni dapat dilihat pada Gambar 16.



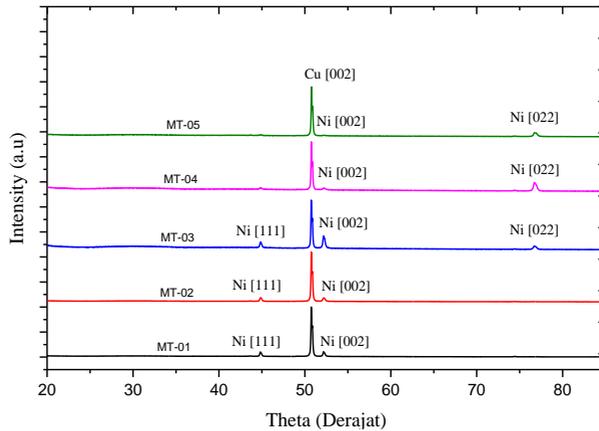
Gambar 16. Grafik perbandingan esistivitas Cu dan resistivitas Cu/Ni

3. X Ray Diffraction (XRD)

Analisis struktur mikro lapisan dilakukan dengan cara menggunakan difraksi sinar-X dengan cara menganalisis setiap puncak yang terdapat pada grafik Intensitas dengan sudut-sudut hamburan tertentu. Penentuan unsur bahan dilakukan dengan cara membandingkan data puncak Cu dan Ni dengan bank data *crystallography* menggunakan *software Diamonds*. Analisis ketinggian intensitas bertujuan untuk mengetahui keteraturan susunan atom lapisan Ni hasil deposisi.

Analisis indeks miller bertujuan untuk mengetahui bagaimana pola bidang atom yang terbentuk.

Karakterisasi sampel Cu/Ni menggunakan uji XRD dilakukan bertujuan untuk mengidentifikasi struktur kristal lapisan yang terbentuk pada setiap treatment yang berikan. Parameter uji karakterisasi bahan Cu/Ni dilakukan dengan panjang gelombang (λ) adalah 1,54060 Å dengan rentang sudut pengujian mulai dari 2°-100°. Hasil uji XRD berupa defraktogram dengan menampilkan intensitas (I) difraksi sinar-X dan sudut hamburan (2θ) pada bahan. Keseluruhan pola difraksi yang terbentuk merepresentasikan struktur mikro kristal dengan orientasi bidang tertentu. Identifikasi defraktogram dilakukan dengan pencocokan data dengan bank data pada data base crystallografi untuk mengidentifikasi unsur pada bahan yang sesuai dengan data sampel. Hasil uji XRD pada sampel Cu/Ni dengan variasi suhu berbantuan medan magnet sejajar dapat dilihat pada Gambar 17.

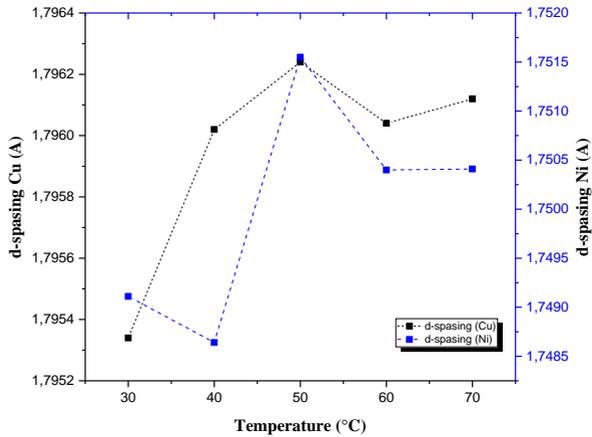


Gambar 17. Hasil uji XRD dari lapisan Cu/Ni pada variasi suhu larutan

Berdasarkan Gambar 17 menunjukkan bahwa adanya perbedaan jumlah dan lebar puncak difraksi yang terbentuk antara suhu deposisi rendah dengan suhu deposisi yang tinggi. Puncak difraksi yang muncul adalah struktur kristal milik Cu dan Ni. Keduanya sama-sama memiliki struktur kristal face centered cubic (fcc) (Rao et al., 2013). Puncak difraksi tertinggi yang terbentuk adalah milik Cu dengan bidang hkl [002] yang terletak di 2θ pada $50,81^\circ$, $50,79^\circ$, $50,78^\circ$, $50,79^\circ$, dan $50,79^\circ$. Sedangkan puncak difraksi tertinggi milik Ni berada pada sudut yang berbeda yaitu terletak pada $76,77^\circ$, $76,72^\circ$, $76,70^\circ$ dan $52,21^\circ$ dengan bidang hkl [002] serta 44,

84°, 44, 86°, 44,85° dengan bidang hkl [111]. Terbentuknya perbedaan puncak difraksi pada setiap sampel mengindikasikan bahwa suhu larutan sangat mempengaruhi struktur kristal lapisan (Wang et al., 2012). Pada Gambar 15 juga tampak struktur kristal yang tidak teratur di 2θ pada 5° sampai 20° sehingga sulit untuk diamati. Oleh karena itu hanya pola difraksi tertinggi milik Cu dan Ni saja yang diamati. Pola difraksi Cu/Ni juga mengalami pergeseran fasa kristal ke kiri pada setiap perubahan suhu larutan. Pergeseran fasa kristal menandakan adanya perubahan topografi dan morfologi lapisan. Pergeseran fasa difraksi Ni terjadi disebabkan oleh perubahan suhu larutan elektrolit saat proses electroplating berlangsung (Wustha et al., 2020). Pada penelitian lain (Khansa et al., 2020) juga disampaikan bahwa pergeseran fasa menyebabkan terbentuknya perubahan jarak antar bidang kristal lapisan. Jarak antar bidang struktur lapisan yang dideposisi dengan suhu larutan rendah (30°C dan 40°C) lebih kecil dibandingkan dengan jarak antar bidang yang dideposisi pada suhu tinggi (50°C-70°C). Jarak antar bidang cenderung bertambah seiring dengan meningkatnya suhu larutan. Namun jarak

antar bidang Cu lebih tinggi dibandingkan dengan jarak antar bidang Ni. Perbandingan jarak antar bidang partikel dapat dilihat pada Gambar 18.



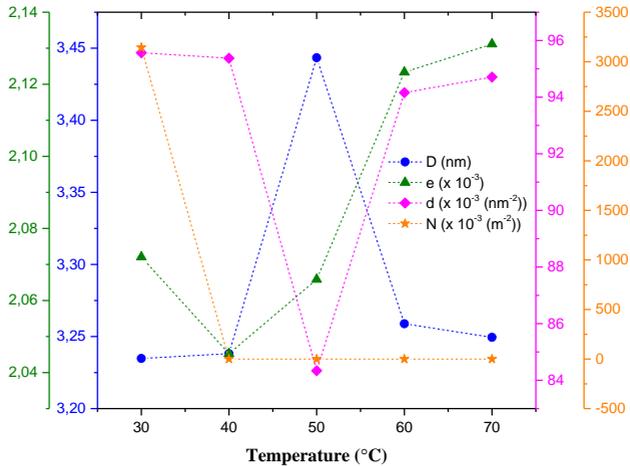
Gambar 18. Perbandingan d-spacing Cu dan Ni

Perubahan jarak antar bidang partikel akan sangat tampak besar kecilnya nilai FWHM setiap puncak difraksi data uji XRD. FWHM adalah lebar setengah dari puncak maksimum (Khalate et al., 2017). Nilai FWHM minimum menunjukkan struktur flim dengan kualitas tinggi yaitu membentuk struktur heksagonal (Mahdhi et al., 2014). FWHM sendiri sangat penting karena sangat dibutuhkan untuk menentukan ataupun meramal struktur mikro terpenting pada lapisan seperti grain size (D), lattice strain (ϵ), jumlah partikel persatuan area (N), density

dislocation (δ), dan stacking faults (SF). Penentuan grain size dapat dihitung menggunakan persamaan Scherrer (Xia et al., 2018). Grain size maksimum adalah 3,44 nm sedangkan grain size minimum adalah 3,23 nm. Grain size tampak meningkat seiring bertambahnya suhu larutan pada awal proses deposisi namun saat suhu larutan mencapai 50°C-70°C grain size mengalami penurunan yang sangat signifikan. Penurun grain size terjadi terkait dengan adanya pengaturan periodik atom didalam kisi kristal (Joishy & Rajendra, 2018). Grain size selalu menunjukkan perbandingan yang terbalik dengan density dislocation (Kariper, 2016). Secara umum density dislocation mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya suhu larutan. Density dislocation mengalami penurunan pada suhu awal deposisi 30°C-50°C namun kembali meningkat saat suhu meningkat menjadi 60°C-70°C. Peningkatan nilai density dislocation terjadi dikarenakan oleh adanya ketidakcocokan antara struktur dalam substrat dengan struktur nano lapisan (Devi et al., 2019). Sedangkan penurunan density dislocation yang terjadi diawal deposisi menyebabkan peningkatan penyempurnaan struktur

lapisan. Karena meningkatnya mobilitas elektron didalam lapisan (Alexeev et all., 2012). Besar kecilnya nilai density dislocation menginterpretasikan cacat yang terbentuk pada struktur lapisan. Nilai density dislocation yang rendah menginterpretasikan sedikitnya cacat yang timbul didalam struktur lapisan selama proses deposisi (Joishy & Rajendra, 2018). Sedangkan nilai density dislocation yang tinggi mengindikasikan banyaknya cacat yang timbul pada struktur lapisan. Sedangkan renggangan kisi tampak berbeda dengan density dislocation yaitu mengalami peningkatan seiring meningkatnya suhu deposisi walaupun keduanya sama-sama menginformasikan cacat pada struktur lapisan. Peningkatan nilai lattice strain terjadi dari $2,04 \times 10^{-3}$ ke $2,13 \times 10^{-3}$. Namun pada suhu deposisi 30°C lattice strain tampak lebih tinggi dibandingkan dengan suhu deposisi 40°C dan 50°C . Tingginya nilai lattice strain juga menginformasikan pembentukan film dengan kualitas yang rendah (John et all, 2019). Sedangkan jumlah partikel yang menempati suatu bidang per area yang tertinggi adalah sampel yang dideposisi dengan suhu 30°C . Sedangkan sampel yang dideposisi dengan suhu 40°C - 70°C relatif sama.

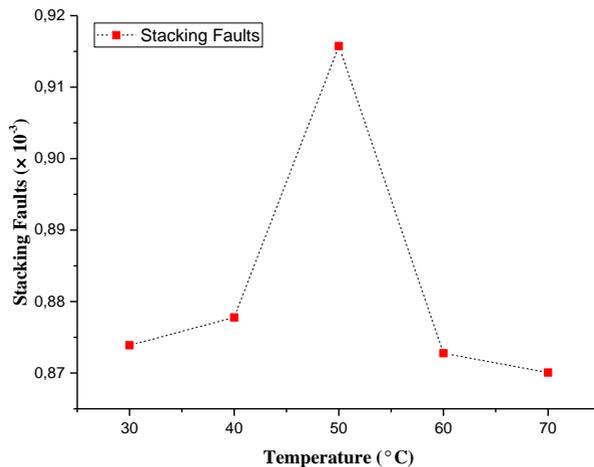
Tingginya nilai jumlah partikel per area menunjukkan jumlah kristal yang lebih banyak yang terbentuk per area (Kariper, 2018).



Gambar 19. Grain size (D), lattice strain (ϵ), jumlah partikel persatuan area (N), density dislocation (δ)

Selanjutnya parameter struktur mikro yang meramalkan cacat planar periodik dalam struktur nano lapisan yang tumbuh adalah stacking faults (SF) (Devi et all., 2019). Berdasarkan hasil analisis data stacking faults yang terbentuk pada struktur lapisan yang dideposisi pada variasi suhu berbantuan medan magnet sejajar berbanding lurus dengan ukuran kristal dan berbanding terbalik dengan dislokasi kepadatan. Stacking faults paling rendah adalah

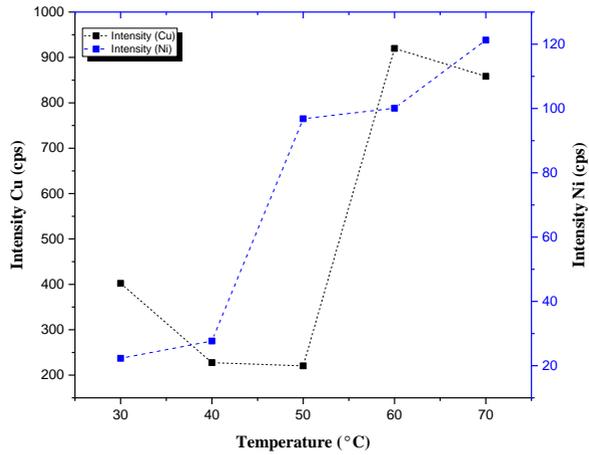
sampel yang dideposisi dengan suhu tinggi yaitu suhu 60°C sedangkan stacking faults paling tinggi adalah sampel dengan suhu deposisi 50°C. Rendahnya stacking faults menandakan bahwa minimnya cacat planar pada lapisan yang terdeposit. Perkiraan stacking faults lapisan dapat dilihat pada Gambar 20.



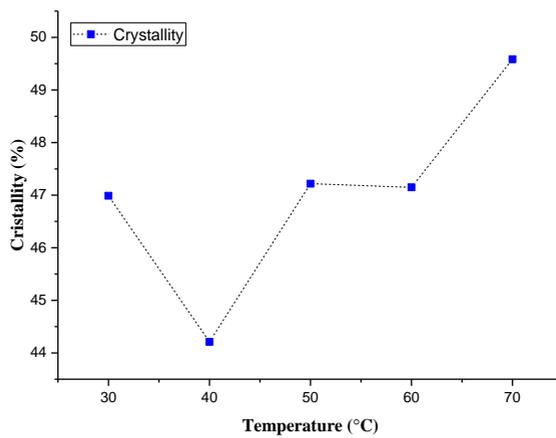
Gambar 20. Grafik kesalahan susun terhadap suhu deposisi

Perbedaan struktur susunan ion massa Ni pada permukaan Cu mengakibatkan meningkatnya intensitas difraksi XRD untuk mengkarakterisasi bahan. Semakin teratur susunan atom pada struktur

lapisan 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 meningkatnya intensitas terbentuk tajam dan tinggi. Perbedaan besar kecil intensitas difraksi yang digunakan dalam mengkarakterisasi bahan juga mengindikasikan bahwa adanya perbedaan kualitas kristalinitas bahan. Kristalinitas bahan dihitung dengan cara membagi luas daerah puncak dengan luas daerah dibawah puncak (Diantoro et al., 2016). Porsentase tingkat kristalinitas paling tinggi tampak terbentuk pada suhu deposisi 70°C dengan nilai 49,58% dan paling rendah 44,21% dengan suhu deposisi 40°C. Data lengkap kristalinitas lapisan dapat dilihat pada Gambar 21.



Gambar 21. Grafik perbandingan intensitas difraksi Cu dan Ni terhadap suhu deposisi



Gambar 22. Grafik hubungan kristalinitas bahan terhadap suhu deposisi.

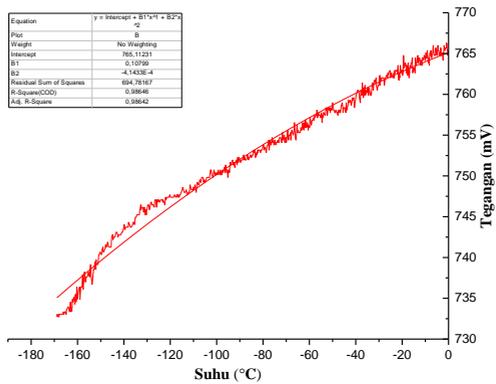
4. Kinerja Sensor

Penentuan kualitas kinerja sensor yang diuji didalam LN₂ guna mendapatkan grafik hubungan tegangan output terhadap suhu menggunakan metode *fitting* data polinomial orde dua (Bevington, 2003):

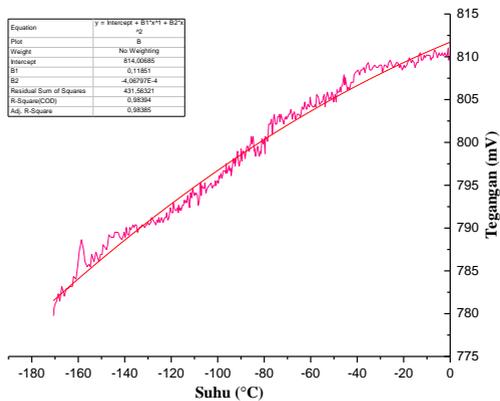
$$V = aT^2 + bT + c \quad (42)$$

Dimana nilai sensitivitas sensor adalah koefisien b.

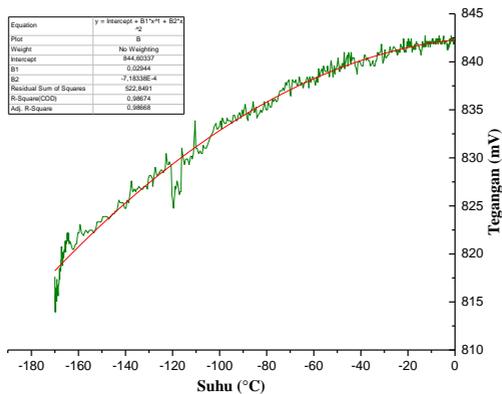
Uji kepekaan sensor Cu/Ni dilakukan dengan cara mengukur perubahan tegangan output sensor saat dipengaruhi oleh suhu. Profil kinerja sensor RTD sebagai sensor suhu rendah pada variasi suhu larutan berbantuan medan magnet sejajar ditampilkan pada gambar 23 – 27.



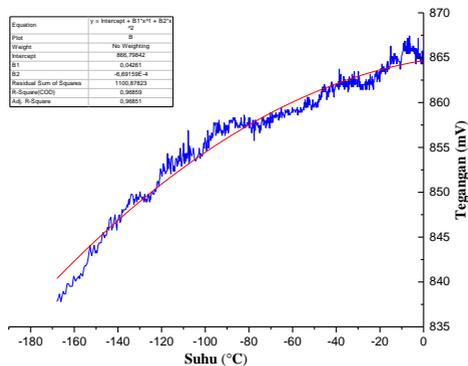
Gambar 23. . Grafik hubungan tegangan output terhadap suhu sensor Cu/Ni pada suhu deposisi 70°C



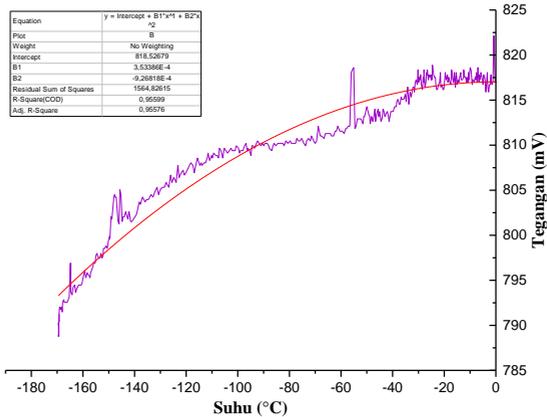
Gambar 24. Grafik hubungan tegangan output terhadap suhu sensor Cu/Ni pada suhu deposisi 60°C



Gambar 25. Grafik hubungan tegangan output terhadap suhu sensor Cu/Ni pada suhu deposisi 50°C



Gambar 26. Grafik hubungan tegangan output terhadap suhu sensor Cu/Ni pada suhu deposisi 40°C



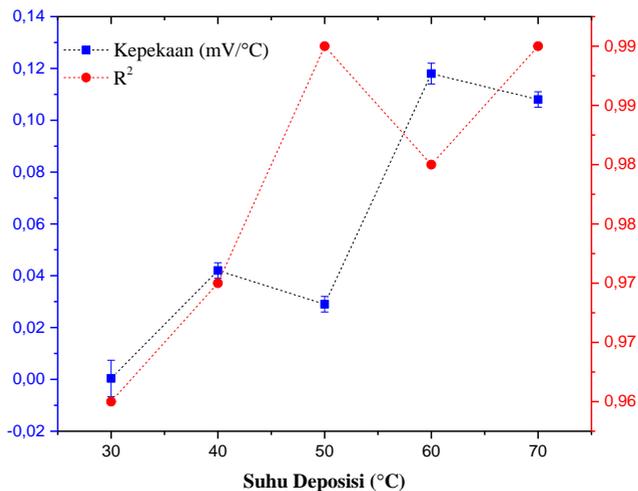
Gambar 27. Grafik hubungan tegangan output terhadap suhu sensor Cu/Ni pada suhu deposisi 30°C

Data pengujian sensor suhu rendah menunjukkan hubungan yang linier antara V terhadap T . Perubahan resistansi sebuah RTD sangat di pengaruhi oleh suhu (Chowdhury, 2010). Suhu pengujian dilakukan antara 0°C sampai -170°C karena menyesuaikan dengan batas maksimum kemampuan thermocouple. Pola penyebaran data tegangan *output* membentuk polinomial orde 2. Data hasil *fitting* kepekaan keseluruhan sensor suhu rendah Cu/Ni dengan variasi suhu larutan dapat dilihat Tabel 9.

Tabel 9. Data hasil fitting uji kepekaan sensor suhu rendah Cu/Ni

Suhu Larutan (°C)	$V = aT^2 + b$	R^2
70	$-0,0004 T^2 + 0,1080$	0,99
60	$-0,0004 T^2 + 0,1185$	0,98
50	$-0,0007 T^2 + 0,0294$	0,99
40	$-0,0007 T^2 + 0,0426$	0,97
30	$-0,0009 T^2 + 0,0004$	0,96

Berdasarkan Tabel 9 menunjukkan bahwa sensor dengan tingkat kepekaan paling tinggi adalah sensor yang dideposisi pada suhu 60°C yaitu $(0,1185 \pm 0,004)$ mV/°C dengan indeks determinasi 0,98. Kemudian sensor yang paling peka adalah sensor dengan suhu deposisi 30°C yaitu $(0,0004 \pm 0,0007)$ mV/°C dengan indeks determinasi 0,99. Pola tingkat kepekaan sensor suhu rendah dengan indeks determinasi terhadap variasi suhu deposisi dapat dilihat pada Gambar 28.



Gambar 28. Pola tingkat kepekaan sensor suhu dan R² terhadap suhu deposisi

Kepekaan sensor suhu rendah dikatakan sangat baik saat sensor mampu dengan akurat merepresentasikan suhu LN₂. Kinerja sensor paling baik pada penelitian ini ditunjukkan oleh sensor MT-02 yang dideposisi pada suhu 60°C dengan nilai koefisien suhu sebesar 0,1185 mV/°C.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai sintesis lapisan Cu/Ni dengan metode elektroplating berbantuan medan magnet sejajar pada variasi suhu larutan diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Variasi suhu larutan pada proses elektroplating sangat berpengaruh terhadap pembentukan tebal lapisan. Lapisan yang paling tebal terbentuk pada suhu deposisi rendah 30°C - 40°C dan struktur lapisan tipis terbentuk pada suhu deposisi tinggi 50°C - 70°C. Ketebalan lapisan yang terbentuk tidak memiliki hubungan linier terhadap resistivitas keping.
2. Hasil analisis *X Ray Diffraction* (XRD) menunjukkan bahwa keseluruhan sampel telah menunjukkan Ni telah terdeposit pada permukaan Cu.

- 
3. Kinerja sensor suhu rendah CU/Ni terbaik sebagai RTD dihasilkan dari sintesis pada suhu larutan 60°C dengan tingkat kepekaan $(0,1185 \pm 0,004)$ mV/°C dengan persamaan $V = -0,0004 T^2 + 0,1185$.

DAFTAR PUSTAKA

- Aguilera, L., Leyet, Y., Romaguera-Barcelay, Y., Thaines, E. H. N. S., Terezo, A. J., Souza, G. L. C., ... Pocrifka, L. A. (2019). Influence of electrodeposition temperature in the electrochemical properties of Ni(OH)₂: An experimental and theoretical study. *Thin Solid Films*, 670, 24–33.
- Alexeev, A. N., Krasovitsky, D. M., Petrov, S. I., & Chaly, V. P. (2012). Deposition of GaN Layers with a lowered dislocation density by molecular-beam epitaxy. *Semiconductors*, 46(11), 1429–1431.
- Aliofkhazraei, M. (2015). Electroplating of Nanostructures. In *Published by AvE4EvA*.
- An, Z., He, L., Toda, M., Yamamoto, G., Hashida, T., & Ono, T. (2015). Microstructuring of carbon nanotubes-nickel nanocomposite. *Nanotechnology*, 26(19), 195601.
- Balasubramanian, S., Gupta, M. K., & Singh, K. K. (2012). Cryogenics and its application with reference to spice grinding: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 52(9), 781–794.
- Bo, G. A., Baruselli, P. S., & Mapletoft, R. J. (2013). Synchronization techniques to increase the utilization of artificial insemination in beef and dairy cattle. *Anim. Reprod.*, 10(3), 137–142.
- Boylestad, R. (2014). *Introductory Circuit Analysis (11th edition)*. England: Pearson.

- Chowdhury, T. (2010). Design of a Temperature Sensitive Voltage Regulator for AC Load using RTD. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2(12), 7896–7903.
- Chuang, H. C., Su, H. C., & Sanchez, J. (2019). The characteristics of nickel film produced by supercritical carbon dioxide electroplating with ultrasonic agitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 57(May), 48–56.
- Cullity, B. D., & Stock, S. R. (1956). *Elements of X-Ray Diffraction: Pearson New International Edition*.
- Devi, P. M. B., Reddy, G. P., & Reddy, K. T. R. (2019). Effect of Deposition Time on Structural, Morphological and Optical Properties of PVA Capped SnS Films Grown by CBD Process. *Semiconductors*, 53(13), 1745–1750.
- Diantoro, M., Hidayati, N. N. S., Latifah, R., Fuad, A., Nasikhudin, Sujito, & Hidayat, A. (2016). Electrical conductivity modification using silver nano particles of *Jatropha Multifida L.* and *Pterocarpus Indicus w.* extracts films. *AIP Conference Proceedings*, 1719(March), 1–8.
- Dinç, F., Akalin, H., Özakin, C., Sinirtaş, M., Kebabçi, N., Işçimen, R., Schimmel, T. (2017). Measurement of sheet resistivities. *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 43, p. 1.
- Fraden, J. (2010). *Handbook of Modern sensors: Fourth edition*. New York: Springer.
- Fraden, Jacob. (2015). *Handbook of Modern Sensors*. New York : Springer.
- Fraden, Jacob. (2016). *Handbook of Modern Sensors: Fifth Edition*. New York: Springer.
- Fu, T., Wang, M., Cai, W., Cui, Y., Gao, F., Peng, L., ... Ding, W.

- (2014). Acid-resistant catalysis without use of noble metals: Carbon nitride with underlying nickel. *ACS Catalysis*, 4(8), 2536–2543.
- Gheithaghy, A. M., Saffari, H., Ghasimi, D., & Ghasemi, A. (2017). Effect of electrolyte temperature on porous electrodeposited copper for pool boiling enhancement. *Applied Thermal Engineering*, 113, 1097–1106.
- Hamid, Z. A., Hassan, H. B., & Attyia, A. M. (2010). Influence of deposition temperature and heat treatment on the performance of electroless Ni-B films. *Surface and Coatings Technology*, 205(7), 2348–2354.
- Han, B. C., Van Der Ven, A., Morgan, D., & Ceder, G. (2004). Electrochemical modeling of intercalation processes with phase field models. *Electrochimica Acta*, 49(26), 4691–4699.
- John, J., Suresh, S., Chalana, S. R., & Mahadevan Pillai, V. P. (2019). Effect of substrate temperature, laser energy and post-deposition annealing on the structural, morphological and optical properties of laser-ablated perovskite BaSnO₃ films. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 125(11).
- Joishy, S., & Rajendra, B. V. (2018). Effect of deposition temperature and Zn composition on structure, optical and electrical properties of CdO thin films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29(15), 12603–12614.
- Kariper, Ishak Afsin. (2018). A new route to synthesize mns thin films by chemical bath deposition method. *Materials Research*, 21(2), 2–7.
- Kariper, Ishak Afşin. (2016). Structural, optical and porosity properties of CdI₂ thin film. *Journal of Materials*

Research and Technology, 5(1), 77–83.

- Khalate, S. A., Kate, R. S., Kim, J. H., Pawar, S. M., & Deokate, R. J. (2017). Effect of deposition temperature on the properties of Cu₂ZnSnS₄ (CZTS) thin films. *Superlattices and Microstructures*, 103, 335–342.
- Khansa, M. L., Toifur, M., Maruto, G., Pramudya, Y., & Khusnani, A. (2020). The effect of deposition time on the microstructure and resistivity of Cu/Ni thin film prepared by magnetized electroplating. *International Journal of Scientific and Technology Research*, 9(1), 63–67.
- Kockar, H., Alper, M., Sahin, T., & Karaagac, O. (2010). Role of electrolyte pH on structural and magnetic properties of Co-Fe films. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 322(9–12), 1095–1097.
- Le, N. N., Cam, T., Phan, H., Le, A. D., My, T., Dang, D., & Dang, M. C. (2015). Optimization of copper electroplating process applied for microfabrication on flexible polyethylene terephthalate substrate. *IOP Prosiding* 6 035007.
- Lebioda, M., & Rymaszewski, J. (2015). Dynamic properties of cryogenic temperature sensors. *PRZEGLAD Elektrotechniczny*, 1(2), 227–229.
- Mahdhi, H., Ben Ayadi, Z., Alaya, S., Gauffier, J. L., & Djessas, K. (2014). The effects of dopant concentration and deposition temperature on the structural, optical and electrical properties of Ga-doped ZnO thin films. *Superlattices and Microstructures*, 72, 60–71.
- Mordechay, S., & Milan, P. (2010). *Modern electroplating*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc Publication.
- Okamoto, N., & Watanabe, T. (2004). *The Adhesion of Electrodeposited Copper, Nickel and Silver Films on*

- Copper, Nickel and Silver Substrates. *Nippon Kinzoku Gakkaishi/Journal of the Japan Institute of Metals*, 68(2), 110–113.
- Patterson, J. D., & Bailey, B. C. (2010). Solid-State Physics. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53).
- Poroch-Seritan, M., Cretescu, I., Cojocar, C., Amariei, S., & Suci, C. (2015). Experimental design for modelling and multi-response optimization of Fe-Ni electroplating process. *Chemical Engineering Research and Design*, 96, 138–149.
- Prasad, Dora, S., Ebenezer, Nitla, S., Shoba, C., & Rao, Pujari, S. (2018). *The dissipated energy in a material in the form of heat under repeated loads is referred to d M us*.
- Prasetyo, R. D., Toifur, M., & Khusnani, A. (2018). Hubungan suhu anil dengan perubahan nilai resistivitas lapisan tipis Cu / Ni Hasil deposisi menggunakan teknik elektroplating. *Seminar Nasional Quantum*, 25, 597–604.
- Raharjo, P. W., & Toifur, M. (2014). Kawat Solenoida sebagai Sensor Suhu Berbasis Resistor Temperature Detector Coils (RTD-C). In *Prosiding Pertemuan Ilmiah XXVIII HFI Jateng & DIY* (pp. 168–169).
- Rahayuningtyas, A., Furqon, M., & Santoso, T. (2014). Rancang Bangun Alat Penetas Telur Sederhana Menggunakan Sensor Suhu Dan Penggerak Rak Otomatis. *Prosiding SNaPP 2014 Sains, Teknologi, Dan Kesehatan*, 245–252.
- Rao, S. I., Dimiduk, D. M., Parthasarathy, T. A., Uchic, M. D., & Woodward, C. (2013). Atomistic simulations of surface cross-slip nucleation in face-centered cubic nickel and copper. *Acta Materialia*, 61(7), 2500–2508.

- Rashidi, A. M., & Amadeh, A. (2010). Effect of electroplating parameters on microstructure of nanocrystalline nickel coatings. *Journal of Materials Science and Technology*, 26(1), 82–86.
- Schmitz, E. P. S., Quinaia, S. P., Garcia, J. R., De Andrade, C. K., & Lopes, M. C. (2016). Influence of commercial organic additives on the nickel electroplating. *International Journal of Electrochemical Science*, 11(2), 983–997.
- Sung, W. T., Chen, J. H., & Hsiao, C. L. (2014). Data fusion for PT100 temperature sensing system heating control model. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 52(1), 94–101.
- Tian, L., Xu, J., & Qiang, C. (2011). The electrodeposition behaviors and magnetic properties of Ni-Co films. *Applied Surface Science*, 257(10), 4689–4694.
- Toifur, M., 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. *Journal of Physics: Conference Series*, 997(1).
- Toifur, M. (2014). Memahami Resistivitas berbagai Jenis Probe Arus-Tegangan. *Prosiding Pertemuan Ilmiah XXVIII HFI Jateng & DIY, Yogyakarta*, (April), 1–7.
- Toifur, Moh, A. N., Okimustava, & Sukarelawan, I. (2017). Pengaruh Waktu Deposisi Pada Tebal Lapisan , Struktur Mikro , Resistivitas Keping Lapisan Tipis Cu/Ni Hasil Deposisi Dengan Teknik Elektroplating. Aplikasi materia. *Jurnal Material Dann Energi Indonesia*, 07(02), 33–43.
- Toifur, Moh, & Asmiarto, D. (2017). Perbaikan Kinerja Probe 4 Titik Melalui Pelapisan Perak. *THE 5 Th URECOL PROCEEDING*, (February), 1280–1286.

- Wang, Y. M., Zhao, D. D., Zhao, Y. Q., Xu, C. L., & Li, H. L. (2012). Effect of electrodeposition temperature on the electrochemical performance of a Ni(OH)₂ electrode. *RSC Advances*, 2(3), 1074–1082.
- Wang, Y., Zhang, C., Li, J., Ding, G., & Duan, L. (2017). Fabrication and characterization of ITO thin film resistance temperature detector. *Vacuum*, 140, 121–125.
- Waskaas, M., & Kharkats, Y. I. (1999). Magnetoconvection phenomena: A mechanism for influence of magnetic fields on electrochemical processes. *Journal of Physical Chemistry B*, 103(23), 4876–4883.
- William D. Callister, J., & David G. Rethwisch. (2015). *Fundamentals Materials science and Engineering: An Integrated Approach*. USA: Wiley.
- Wustha, J., Toifur, M., Khusnani, A., & Mustava, O. (2020). Microstructure and resistivity of Cu/Ni thin film prepared by magnetized electroplating on various electrolyte temperature. *International Journal of Scientific and Technology Research*, 9(1), 2763–2767.
- Xia, F. F., Jia, W. C., Ma, C. Y., Yang, R., Wang, Y., & Potts, M. (2018). Synthesis and characterization of Ni-doped TiN thin films deposited by jet electrodeposition. *Applied Surface Science*, 434, 228–233.
- Yan, C., Wang, J., & Lee, P. S. (2015). Stretchable graphene thermistor with tunable thermal index. *ACS Nano*, 9(2), 2130–2137.
- Zhu, M. ling. (2015). A thermometer based on diverse types thermocouples and resistance temperature detectors. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 20(1), 93–100.

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
SF	Stacking faults	$\times 10^{-3}$
ε	Lattice strain	$\times 10^{-3}$
δ	Density dislocation	$\times 10^{-3}(\text{nm}^{-2})$
N	Jumlah partikel persatuan area	$\times 10^{-3}(\text{m}^{-2})$
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 selama proses elektroplating.
- RTD : Bahan yang digunakan sebagai sensor suhu dengan cara memanfaatkan perubahan hambatan yang disebabkan oleh perubahan suhu.
- Lapisan Cu/Ni : Pelapisan nikel dengan teknik elektroplating di atas permukaan tembaga
- X-Ray Diffraction* : Alat karakterisasi struktur mikro untuk mengetahui struktur kristal yang telah terbentuk dari proses pelapisan.

BIOGRAFI



M. Taufiqurrahman lahir di desa sempe Kec. Moyo Hulu Kab. Sumbawa Provinsi Nusa Tenggara barat pada 6 Januari 1996. Penulis menempuh pendidikan strata 1 di jurusan pendidikan fisika FKIP Universitas Samawa (UNSA) Sumbawa Besar pada tahun 2013-2017. Penulis memiliki keyakinan tidak ada pembangunan yang baik tanpa adanya latar pendidikan yang berkualitas. Saat ini penulis sedang menempuh pendidikan magister di jurusan pendidikan fisika Universitas Ahmad Dahlan Yogyakarta.



Moh. Toifur lahir di Blitar, 18 Juli 1964. Menempuh pendidikan S1, S2, S3 di Universitas Gadjah Mada pada jurusan Fisika. saat ini sedang bekerja sebagai dosen PNS di Universitas Ahmad Dahlan dengan bidang keahlian fisika material (Lapisan Tipis).



Ishafit is currently Associate Professor at physics education department, Universitas Ahmad Dahlan. He received M.Sc degree in Physics at Univesitas Gadjah Mada in 2000 and has been teaching physics for more than 25 years. His current research interests is laboratory based physics instruction and ICT-based physics experiment.



Okimustava lahir di Bayumas, 27 Oktober 1985. Menempuh pendidikan S1 dan S2 di Universitas Ahmad Dahlan pada jurusan pendidikan fisika. saat ini bekerja sebagai dosen di Universitas Ahmad Dahlan.

