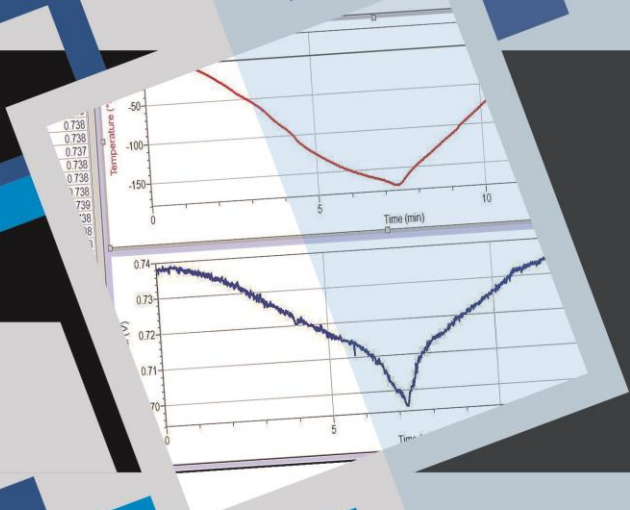


**PENGARUH WAKTU DEPOSISI
PADA ELEKTROPLATING Cu/Ni
BERBANTUAN MEDAN MAGNET SEJAJAR**

2020



**Julius Saputra, S.Pd,
Dr. Moh. Toifur, M.Si,
Drs. Ishafit, M.Si
Okimustava, M.Pd.Si**



MONOGRAF

**PENGARUH WAKTU DEPOSISI PADA
ELECTROPLATING Cu/Ni BERBANTUAN MEDAN
MAGNET SEJAJAR**

- Penulis** : Julius Saputra, S.Pd, Dr. Moh. Toifur, M.Si,
Drs. Ishafit, dan M.Si, Okimustava, M.Pd.Si
- Content Review** : Damar Yoga Kusuma, B.Eng., Ph.D
Dr. Eng. Ahmad Kusumaatmaja, S.Si., M.Sc.
- Design Review** : Moh. Irma Sukarelawan, M.Pd.
Prof. Dr. Ir. Dwi Sulisworo, M. T.
Rachmad Resmiyanto, S.Si., M.Sc.
- Tata Letak** : Efi Kurniasari
- Desain Sampul** : Julius Saputra, S.Pd,
- Cetakan** : Oktober 2020



Monograf

**PENGARUH WAKTU DEPOSISI PADA
ELECTROPLATING Cu/Ni BERBANTUAN
MEDAN MAGNET SEJAJAR**

Julius Saputra, S.Pd

Dr. Moh. Toifur, M.Si

Drs. Ishafit, M.Si

Okimustava, M.Pd.Si



KATA PENGANTAR


Alhamdulillah, puji dan syukur kehadiran Allah SWT yang senantiasa memberikan rahmat dan karunia-Nya yang tiada terkira kepada Penulis sehingga dapat menyelesaikan penyusunan monograf berkaitan dengan pengaruh waktu deposisi pada hasil *electroplating* lapisan tipis Cu/Ni. Monograf ini disusun agar dapat digunakan sebagai rujukan mahasiswa dalam memahami materi tentang sensor suhu rendah dari lapisan tipis Cu/Ni khususnya mata kuliah sains dan teknologi nano yang berkaitan dengan proses penumbuhan lapisan tipis. Monograf ini disusun berdasarkan acuan Prof. Dr. Sutikno yang terdiri dari rumusan masalah, nilai kebaruan, metodologi pemecahan masalah, teori yang lengkap, kesimpulan dan daftar pustaka. Tulisan ini merupakan hasil penelitian tesis dengan judul Pembuatan Sensor Suhu Rendah Cu/Ni Dengan Metode *Electroplating* Berbantuan Medan Magnet Sejajar Medan Listrik Pada Variasi Waktu Deposisi.

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Dr. Moh. Toifur, M.Si yang telah memberikan bimbingan dan arahan dalam penyusunan isi buku monograf ini. Penulis menyadari bahwa penelitian monograf ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang sifatnya membangun sangat diharapkan penulis guna penyempurnaan monograf ini. Penulis mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan monograf pengaruh waktu deposisi pada hasil *electroplating* lapisan tipis Cu/Ni.



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL	x
PENDAHULUAN	1
SENSOR SUHU	5
A. Pengerian Sensor Suhu	5
1. Linieritas	7
2. Sensitivitas	7
3. Jangkauan	7
B. <i>Resistance Temperature Detector (RTD)</i>	8
C. Material yang digunakan	10
1. Tembaga	11
2. Nikel	13
D. Electroplating	14
E. Resistivitas Keping	20
F. Probe Empat Titik	21
G. Pengaruh Waktu Deposisi	24
H. Kristal pada Zat Padat	25
1. Struktur Kristal	26
2. Indeks Miller	29
I. X-Ray Diffraction (XRD)	32
1. Intensitas	33
2. Jarak Bidang Kristal	34
3. Grain Size (D)	35
J. Diamond	37
K. Pengaruh Medan Magnet pada Proses Electroplating	39
L. Penerapan Medan Magnet pada Proses Elektrokimia	44




EKSPERI	47
MEN	48
A. Metode Eksperimen	48
1. Preparasi Sampel	48
2. Pembuatan lapisan tipis Cu/Ni	53
3. Uji Resistivitas Lapisan	58
4. Uji Struktur Mikro	59
5. Uji kinerja sensor	60
B. Analisis Data	63
1. Menentukan Tebal Lapisan Cu/Ni	63
2. Menentukan Resistivitas Keping	67
3. Uji Struktur Mikro	70
4. Kinerja sensor	79
KESIMPULAN	86
DAFTAR PUSTAKA	88
DAFTAR SIMBOL	97
GLOSARIUM	98
BIOGRAFI	101

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Standar relatif potensial elektroda E0 pada sebuah elektroda Cu/Cu ²⁺ (Vassimon and Rothschild 1990).	15
Gambar 2. Skema alat probe empat titik (Toifur, 2007)	22
Gambar 3. Model penyebaran arus listrik pada lapisan tipis oleh probe empat titik (Toifur, 2014)	22
Gambar 4. Bentuk dan posisi struktur kristal jenis FCC (a) mode bola pejal untuk sel unit FCC dan (b) pusat atom diwakili oleh bola kecil untuk memberikan perspektif posisi atom yang lebih baik (Callister and Rethwisch 2015)	27
Gambar 5. Bentuk dan posisi struktur kristal jenis BCC (a) satu atom di pusat kubus dan (b) atom yang berada di pusat kubus memiliki jarak terdekat dengan delapan sudut atomnya (Callister and Rethwisch 2015)	28
Gambar 6. Bentuk dan posisi struktur kristal jenis HCP (a) sel unit dengan memperkecil ukuran atom dan (b) Kumpulan beberapa sel unit HCP (Callister and Rethwisch 2015)	29
Gambar 7. Bidang Indeks Miller	30
Gambar 8. Indeks Miller (111) (Kittel 2005)	31
Gambar 9. Difraksi sinar X (Beiser 2003)	32
<u>Gambar 10. FWHM</u> <u>(https://en.wikipedia.org/wiki/Full_width_at_half_maximum)</u>	36
Gambar 11 Difraktogram Tembaga	37

Gambar 12. Difraktogram Nikel	38
Gambar 13. (a) Kecepatan q searah B dan (b) kecepatan q tegak lurus dengan B (Agung, R, 2019)	41
Gambar 14. Electroplating dengan medan magnet sejajar medan listrik (Agung, R, 2019)	42
Gambar 15. Rangkaian Electroplating berbantuan medan magnet	56
Gambar 16. Skema rangkaian <i>probe</i> empat titik (Toifur, 2007)	59
Gambar 17. Sampel untuk uji sensor	61
Gambar 18. Sensor yang dihubungkan dengan kabel	61
Gambar 19. Rangkaian uji sensor lapisan tipis Cu/Ni (Khusnani 2019)	62
Gambar 20. Grafik hubungan ketebalan lapisan Ni terhadap waktu deposisi	66
Gambar 21. Grafik hubungan waktu deposisi dengan resistivitas	69
Gambar 22. Spektrum XRD lapisan tipis Cu/Ni dengan variasi waktu deposisi	71
Gambar 23. Hubungan waktu deposisi terhadap intensitas difraksi Cu dan Ni	74
Gambar 24. Hubungan waktu deposisi terhadap grain size	76
Gambar 25. Grafik hubungan waktu deposisi terhadap d-spacing pada material nikel (Ni)	78
Gambar 26. Grafik hubungan Temperatur terhadap tegangan output suhu sensor Cu/Ni pada waktu deposisi 60 sekon.	81
Gambar 27. Grafik hubungan Temperatur terhadap tegangan output suhu sensor Cu/Ni pada waktu deposisi 180 sekon.	82
Gambar 28. Grafik hubungan Temperatur terhadap tegangan output suhu sensor Cu/Ni pada waktu deposisi 300 sekon.	82

- 
- Gambar 29. Grafik hubungan Temperatur terhadap tegangan output suhu sensor Cu/Ni pada waktu deposisi 420 sekon. 83
- Gambar 30. Grafik hubungan Temperatur terhadap tegangan output suhu sensor Cu/Ni pada waktu deposisi 540 sekon. 83
- Gambar 31. Pengaruh waktu deposisi terhadap koefisien suhu 85




DAFTAR TABEL

Tabel 1. Sifat fisika pada logam tembaga (Cu)	12
Tabel 2. Sifat fisis nikel (Ni)	14
Tabel 3. crystallography untuk material tembaga (Cu)	38
Tabel 4. Crystallography Untuk Material Nikel (Ni)	39
Tabel 5. Tabulasi massa plat tembaga (Cu)	63
Tabel 6. Tabulasi massa lapisan tipis Cu/Ni	64
Tabel 7. Data ketebalan lapisan tipis Cu/Ni yang terbentuk dengan variasi waktu deposisi berbantuan medan magnet sejajar	65
Tabel 8. Tabulasi pengukuran <i>probe</i> empat titik untuk tegangan listrik	67
Tabel 9. Tabulasi pengukuran probe empat titik untuk kuat arus listrik	68
Tabel 10. Sudut difraksi dan intensitas lapisan tipis Cu/Ni	72
Tabel 11. Data intensitas (I) dan 2θ untuk tembaga dan nikel dari lapisan tipis Cu/Ni	74
Tabel 12. Grain size dari nikel pada lapisan tipis Cu/Ni pada variasi waktu deposisi	76
Tabel 13. Jarak bidang kristal nikel pada lapisan tipis Cu/Ni pada variasi waktu deposisi	78
Tabel 14. Persamaan polinomial orde dua antara tegangan (V) dan suhu (T) pada kinerja sensor suhu	84



PENDAHULUAN

Teknologi kriogenik mempelajari materi dengan temperatur sangat rendah (di bawah -150°C). Pembekuan kriogenik dilakukan didalam suatu lemari pembeku yang terisolasi dan berlangsung secara kontinyu. Dalam pengawetan makanan dengan metode pembekuan kriogenik pembentukan kristal es akan jauh berkurang dibandingkan dengan metode pendinginan konvensional sehingga produk tidak banyak mengalami penambahan bobot dan kualitas makanan tetap terjaga (Goswami 2010). Bahkan teknologi kriogenik digunakan pada berbagai bidang, diantaranya yaitu pada bidang peternakan (Moh et al. 2020), dan bidang kesehatan (de Miguel-Soto et al. 2017)(Khadatkar, Kumar, and Pattanayak 2004). Media pengawet yang digunakan yaitu *Liquid Nitrogen* (LN_2).




LN₂ memiliki nilai titik beku sekitar -196,1°C sampai -198°C (Hirose et al. 2014)(Bo, Baruselli, and Mapletoft 2013).

Seiring perkembangan teknologi kriogenik, maka pengendalian terhadap perubahan suhu menjadi faktor penting. Oleh karena itu dibutuhkan suatu termometer pengukur suhu rendah yang dapat berfungsi dengan baik. Salah satu sensor yang dapat digunakan adalah sensor berbasis *Resistance temperature detector* (RTD). Bahan sensor RTD pada umumnya terbuat dari logam atau *alloy*, baik berbentuk koil maupun lapisan tipis atau *thin film* (Fraden 2016)(Chowdhury 2010). Prinsip kerja RTD adalah dengan memanfaatkan perubahan resistansi yang dipengaruhi oleh suhu (Blasdel et al. 2015)(Wang et al. 2012).


Salah satu bahan logam yang digunakan dalam pembuatan lapisan tipis pada elemen RTD adalah platina (Pt), karena platina memiliki ketahanan terhadap oksidasi, mempunyai akurasi tinggi, dan memiliki stabilitas yang baik (Maher et al. 2014)(Sen, Pan, and Ghosal 2011). Namun platina merupakan logam yang harganya relatif mahal. Maka dari itu untuk membuat lapisan tipis pada RTD digunakan alternatif lain, yaitu tembaga (Cu) dan Nikel (Ni)(Toifur, Yuningsih, and Khusnani 2018)(Fraden 2003)(Li et al. 2017).

Pada dasarnya Cu memiliki potensi menjadi sensor suhu (Athanassiou, Grass, and Stark 2006), tetapi Cu masih



kurang sensitif terhadap perubahan suhu. Hal ini dikarenakan resistivitas yang dimiliki oleh Cu cenderung masih sangat rendah (Awangku Metosen, Pang, and Chin 2015) serta sifat Cu yang mudah teroksidasi. Maka dari itu kepekaan Cu dapat ditingkatkan dengan mensistesisikannya dengan Ni yang memiliki resistivitas lebih baik agar terbentuk lapisan tipis Cu/Ni. Kelebihan lain Ni ialah memiliki gaya adhesi yang lebih baik dibandingkan dengan Pt sehingga memudahkan deposisi film (Garraud, Combette, and Giani 2013).

Medan magnet memegang peranan sangat penting karena berhubungan dengan peningkatan transport massa ion nikel (Ebadi, Basirun, & Alias, 2010). Pemakaian medan magnet sejajar pada saat elektrodeposisi sudah banyak dilakukan oleh peneliti. Peran medan magnet sejajar adalah membentuk pola penyebaran partikel Ni yang lebih teratur pada substrat (Aguilera et al. 2019). Medan magnet sejajar juga dapat mempengaruhi efisiensi arus dan struktur morfologi pelapisan (Gu et al. 2017), selain itu peran medan magnet sejajar bertujuan untuk membentuk lapisan nanokomposit dengan tekstur yang lebih kuat. Karena penggunaan medan magnet tegak lurus pada proses elektrodeposisi pada penelitian terdahulu struktur mikro lapisan belum terbentuk, sehingga ion massa logam tidak terdeposisi secara koheren pada substrat (Fattahi and Bahrololoom 2014).



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, Adigio, and Jombo 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 mikro dengan *X-ray diffraction* (XRD) dan uji kinerja sensor suhu rendah.


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



SENSOR SUHU

A. Pengerian Sensor Suhu

Sensor adalah suatu alat yang digunakan untuk pendeteksi adanya perubahan fisik atau kimia dalam suatu lingkungan. Sensor juga diketahui sebagai perangkat yang dapat menerima suatu sinyal dan diubah menjadi besaran listrik. Sinyal yang dimaksud dapat berupa kuantitas, suatu keadaan yang dapat dideteksi lalu dikonversi ke sinyal listrik (Fraden 2003). Sinyal listrik yang berasal dari suatu variabel keluaran alat sensor ini dikenal sebagai transduser.



Perkembangan sensor saat ini berkembang dengan cepat dan pesat, sehingga banyak penelitian yang dilakukan untuk menciptakan sensor yang lebih efektif, efisien dan akurat. Bahkan untuk ukuran, sensor saat ini sudah ada yang memiliki ukuran sangat kecil dengan orde nanometer. Pemanfaatan sensor sangatlah membantu pekerjaan manusia terutama berkaitan dengan besaran-besaran fisika. Salah satu besaran fisika yang dimaksud adalah suhu, yaitu suatu besaran fisika yang erat kaitannya dalam kehidupan di dunia ini. Maka untuk mendeteksi suhu suatu zat atau keadaan lingkungan perlu alat detektor yang sesuai dengan besaran tersebut yang dikenal dengan sensor suhu.

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 (Fraden 2016). Ada beberapa hal penting yang perlu dimiliki oleh sensor untuk menentukan karakteristik esensialnya (Fraden 2016).

1. Linieritas


Linieritas adalah hubungan yang diperoleh dari data masukan (input) dan data keluaran (output) haruslah berbanding lurus atau sebanding sehingga penggambaran menggunakan grafik akan memiliki karakteristik membentuk sebuah garis lurus (linier).

2. Sensitivitas

Sensitivitas merupakan tingkat kepekaan sebuah alat sensor terhadap suatu kuantitas dari objek yang diukur. Tingkat kepekaan alat sensor pada beberapa jenis dinyatakan dalam satuan volt per oC (V/oC), yang artinya bahwa adanya perubahan tegangan sebagai keluaran pada tiap satu derajat yang sebagai masukan. Tingkat sensitivitas sensor juga dipengaruhi oleh bentuk linieritasnya, apabila tanggapan yang diperoleh membentuk linier maka jangkauan pengukuran keseluruhan akan memiliki sensitivitas yang sama (Robby, 2012).

3. Jangkauan

Jangkauan atau kesanggupan menjadi salah satu kriteria dalam memilih sebuah sensor. Apabila sensor tersebut memiliki suatu jangkauan yang luas,




maka bisa dikatakan bahwa kinerja sensor tersebut baik.

Jenis-jenis dari sensor suhu memiliki spesifikasi dan kinerja masing-masing, salah satunya jenis RTD yang memiliki prinsip perubahan besaran resistansi terhadap perubahan besaran suhu. Suhu yang tinggi akan menyebabkan getaran-getaran pada elektron bebas yang terdapat dalam suatu penghantar akan tinggi. Akibatnya muatan listrik akan menjadi terhambat dan menimbulkan hambatan pada penghantar tersebut menjadi semakin tinggi dan demikian juga sebaliknya.

B. *Resistance Temperature Detector (RTD)*

RTD merupakan salah satu jenis dari sensor suhu yang banyak digunakan dalam kehidupan terutama dalam bidang kontrol dan otomatisasi. Sensor RTD memiliki prinsip kerja yaitu dengan perubahan pada hambatan listrik karena akibat dari perubahan suhu. Kemampuan dalam pengukuran suhu oleh RTD tidak terlepas karena adanya suatu elemen yang sensitif terhadap besaran temperatur. Elemen tersebut berasal dari logam platina, tembaga atau nikel (Raharjo and Toifur n.d.).

RTD sendiri memiliki dua tipe konfigurasi yang secara umum digunakan, antara lain adalah tipe wire-




wound dan tipe thin-film. Tipe dari wire-wound merupakan tipe dimana elemennya terdiri lilitan kawat logam platina yang dililitkan pada kaca atau keramik dan ditutup dengan slubung probe. Sedangkan thin-film merupakan tipe yang elemennya tersusun dari lapisan yang tipis dan resistif dan diletakkan pada substrat keramik serta dilapis dengan kaca atau epoxy sebagai pelindungnya.

Perolehan nilai temperatur pada RTD dapat diketahui dengan adanya aliran arus listrik yang tetap dan kedua ujung dari RTD diukur beda potensialnya. Suhu yang terukur akan mengakibatkan perubahan tahanan, hal ini ditunjukkan pada persamaan (2.1).

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

dimana RT adalah tahanan saat suhu T, Ro adalah tahanan saat suhu awal, α adalah suatu koefisien suhu dari tahanan TCR (Temperatur coefficient of Resistance) dan ΔT adalah perubahan atau selisih suhu saat T dengan suhu awal (T-To).

Apabila dalam pengukuran mendapatkan nilai keluaran yang terbaca sensor berbentuk data tidak linier, maka dapat digunakan persamaan Callender Van-Dusen (Fraden 2016) yang ditunjukkan pada persamaan (2.2).


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

dengan A, B, dan C adalah suatu koefisien Callender Van-Dusen. Sensor memiliki karakteristik yang ditentukan oleh tiga parameter yaitu TCR, nilai tahanan nominal dan toleransi. Hubungan suatu tahanan akibat pengaruh dari suhu ditentukan oleh suatu TCR, artinya semakin bahan itu memiliki sifat sensitivitas yang baik maka nilai TCR semakin besar. Adapun untuk nilai tahanan nominal merupakan suatu tahanan saat suhu 0oC dan toleransi dapat diperhatikan dari fluktuasi hambatan saat suhu 0oC, dimana nilai toleransi inilah yang digunakan untuk menentukan tingkat akurasi suatu sensor.

C. Material yang digunakan

Dalam penelitian ini menggunakan dua bahan logam yang berbeda. Kedua logam tersebut memiliki peran dan fungsi masing-masing yang mana ada satu jenis logam yang ditempatkan sebagai substrat dan ada logam yang digunakan sebagai bahan pelapis. Adapun material yang digunakan dalam penelitian ini adalah tembaga (Cu) dan nikel (Ni).

1. Tembaga

Tembaga merupakan salah satu jenis logam dari sekian banyak logam yang dimanfaatkan oleh manusia karena jumlahnya yang melimpah di dunia ini. Logam tembaga memiliki karakteristik yang unggul dari logam-logam lainnya yaitu relatif lunak, mudah ditempa, apabila digosok maka akan berkilau, laju korosinya lambat dan memiliki sifat penghantar panas dan listrik yang baik.

Logam tembaga dalam susunan sistem periodik tergolong pada golongan I B pada periode IV. Logam tersebut memiliki lambang dengan simbol Cu (Chang, 2003). Adapun untuk susunan konfigurasi elektron pada logam tembaga adalah $[\text{Ar}] 3d^{10} 4s^1$. Sama halnya dengan logam lainnya, logam tembaga juga memiliki sifat fisika dan sifat kimia. Berikut pada tabel 1 merupakan spesifikasi dari logam tembaga yang ditinjau dari segi sifat fisika.

Tabel 1. Sifat fisika pada logam tembaga (Cu)

Kriteria	Spesifikasi
Nomor massa	63,55
Nomor atom	29
Massa atom	63,546 g/mol
Massa jenis	8,96 g/cm ³
Titik lebur	1084 °C
Titik didih	2562 °C
Fase	Solid
Struktur kristal	FCC
Jari-jari atom	128 pm
Resistivitas	16,78 nΩ.m pada suhu 20 °C
Kalor peleburan	13,26 kJ/mol
Kalor penguapan	300,4 kJ/mol
elektronegativitas	1,90
Koefesien ekspansi linier	1,65 μm.m ⁻¹ .K ⁻¹ pada suhu 25 °C

sumber:(Wiliam D. Callister 2001)

Logam tembaga menjadi salah satu bahan alternatif dalam menggantikan elemen RTD dari bahan platina. Tembaga itu sendiri memiliki nilai koefisien temperatur yang lebih rendah dari bahan platina, tetapi nilainya cukup tinggi (Sukarelawan, 2015). Adapun untuk nilai koefisien temperatur logam tembaga adalah 0,00393 Ω/oC dan memiliki kemampuan yang baik dalam merespon perubahan suhu. Jangkauan suhu terendah yang dapat dijangkau oleh logam tembaga adalah -234 oC (Boylestad 2014), sehingga dapat digunakan untuk mendeteksi suhu yang relatif rendah.

2. Nikel

Nikel merupakan logam dengan karakteristik yaitu warna putih perak yang mengkilat, sifatnya yang keras dan mulur. Sifatnya yang keras, namun nikel dapat dibentuk karena memiliki sifat yang fleksibel dan tidak berubah sifatnya apabila terkena udara. Selain itu memiliki sifat yang tahan akan oksidasi dan apabila berada pada suhu yang ekstrim, logam nikel tetap mempertahankan sifat-sifat aslinya.

Dalam tatanama sistem periodik, logam nikel diberi lambang dengan Ni yang berada pada barisan logam transisi yaitu periode ke IV. Konfigurasi elektron yang dimiliki oleh logam nikel yaitu $[Ar] 4s^2 3d^8$. 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 dkk, 2014), serta meningkatkan nilai resistivitas bahan, dan pelapisan tembaga dan nikel dengan menggunakan metode Electroplating memiliki gaya adhesi yang kuat (Okamoto, Wang, and

Watanabe 2004). Terkait dengan sifat fisis dari logam nikel ditunjukkan pada tabel 2.

Tabel 2. Sifat fisis nikel (Ni)

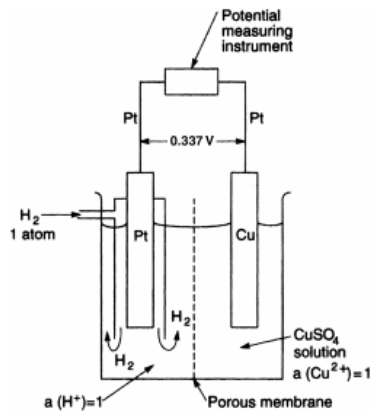
Kriteria	Spesifikasi
Nomor massa	58,69
Nomor atom	28
Massa atom	58,6934 g/mol
Massa jenis	8,908 g/cm ³
Titik lebur	1455 °C
Titik didih	2913 °C
Fase	Solid
Struktur kristal	FCC
Jari-jari atom	124 pm
Resistivitas	69,3 nΩ.m pada suhu 20 °C
Kalor peleburan	17,48 kJ/mol
Kalor penguapan	300,4377,5 kJ/mol
elektronegativitas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

sumber: (Wiliam D. Callister 2001)

D. Electroplating


Electroplating adalah sebuah 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. *Electroplating* sendiri telah menerima begitu

banyak perhatian dari dunia industri maupun sains karena memberikan banyak manfaat seperti produksinya cepat, proses pengaplikasiannya yang sangat mudah, serta polusi yang dihasilkan rendah (Chuang, Su, and Sanchez 2019). Prinsip kerja dari metode *Electroplating* didasarkan pada dua reaksi yaitu reaksi oksidasi dan reaksi reduksi. Selama proses *Electroplating* parameter arus listrik searah penting untuk digunakan karena menyebabkan terjadinya proses reduksi pada elektroda seperti pada Gambar 1.

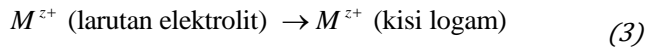


Gambar 1. Standar relatif potensial elektroda E0 pada sebuah elektroda Cu/Cu²⁺ (Vassimon and Rothschild 1990).

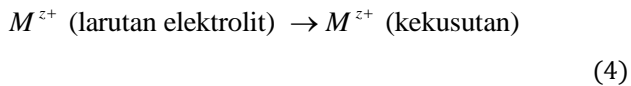
Pada proses electrodeposisi logam, umumnya proses tranfer ion logam Mz^+ dipindahkan dari larutan elektrolit ke dalam kisi logam ionik yang bertindak sebagai



substrat. Proses refrentasi atomik sederhana dari proses ini adalah.




Reaksi ini juga disertai dengan proses tranfer elektron z dari sebuah sumber elektron dari luar menuju gas elektron dalam logam M yang dalam penelitian ini berupa Cu (tembaga). Pada persamaan 2.3 juga menggambarkan proses atom yang membentuk proses elektrodeposisi. Karena pada proses awal tersebut strukturnya $Mz+$ (larutan elektrolit), dan keadaan akhir dari reaksi tersebut menjadi $Mz+$ (kisi logam). Hal ini terjadi dikarenakan ion logam dalam cairan elektrolit terhidrasi.



Adapun beberapa parameter yang dapat mempengaruhi pelapisan dalam proses *Electroplating* menurut (Schmitz, dkk, 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 atau waktu pelapisan akan 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.

Kemudian menurut (Poroch-seritan et al. 2015)

faktor lain yang mempengaruhi plating adalah:

1. 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. Tujuan dalam penentuan derajat keasaman ini untuk mengecek kemampuan dari larutan dalam upaya menghasilkan lapisan yang baik.
2. Temperatur terlalu rendah dan rapat arus yang cukup optimum akan 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. Daya larut akan bertambah besar sehingga konduktivitas menjadi tinggi dan menambah mobilitas ion logam tetapi viskositas jadi berkurang sehingga endapan ion logam pada katoda akan lebih cepat sirkulasinya.

Electroplating atau dikenal dengan pelapisan dengan listrik yang bersumber dari DC memiliki kerja dengan mengendapkan ion-ion suatu logam pada katoda (negatif). Terjadinya endapan pada katoda diakibatkan karena ion-ion yang bermuatan listrik berpindah melalui elektrolit dan sifat dari endapan terhadap logam dasar bersifat adhesif (Saleh 2014). Adanya endapan pada katoda akan menyebabkan perbedaan massa dari sampel sebelum dan sesudah proses Electroplating, yang mana akan memiliki ketebalan suatu lapisan yang terbentuk dan hal ini dapat diketahui seberapa tebalnya menggunakan persamaan Lowenheim (5) (Toifur et al. 2018)

$$\delta = \frac{\Delta m}{\rho A} = \frac{m_{CuNi} - m_{Cu}}{\rho A} \quad (5)$$

dengan,

δ = tebal lapisan yang terbentuk (cm)

ρ = massa jenis pelapis (g/cm^3)

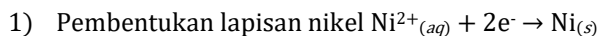
Δm = $m_2 - m_1$ = massa lapisan yang terbentuk (g)

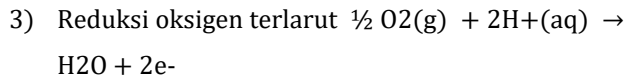
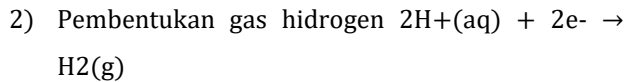
A = luas permukaan lapisan (cm^2)

Pada saat proses Electroplating Cu dengan Ni tingkat keasaman larutan juga dapat mempengaruhi proses elektrodeposisi nikel, dikarenakan perbedaan pH cairan elektrolit dapat mempengaruhi tebal lapisan yang terbentuk. Pada proses pelapisan Ni pH yang baik yaitu diatas 4,0 (Wu, Eliaz, and Gileadi 2015). Namun ketentuan pH yang baik juga tergantung dari parameter yang digunakan. Agar pH tetap dalam kesetimbangan selama proses pelapisan maka perlu ditambah bahan kimia asam borak (H_3BO_3). Serta dapat digunakannya garam nikel yaitu nikel sulfat dan nikel chloride (Afriany dkk, 2012).

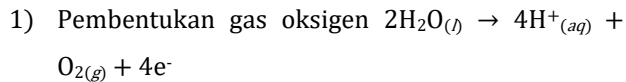
Adapun reaksi kimia yang terjadi selama proses Electroplating Ni yang terjadi dapat dijabarkan sebagai berikut (Prasetyo, Toifur, and Khusnani 2018).

a. Pada katoda:





b. Pada anoda:




E. Resistivitas Keping

Resistivitas merupakan elemen yang dapat digunakan sebagai pengelompokkan suatu bahan dalam jenis konduktor, semikonduktor atau isolator. Sifat resistivitas pada logam tergantung dari sifat logam tersebut. Secara matematis (Callister and Rethwisch 2015), bahwa jumlah dari resistivitas sebuah logam mengungkapkan jumlah dari getaran termal, pengotoran dan deformasi plastik yang dituliskan dalam persamaan (6).

$$\rho_{\text{Total}} = \rho_t + \rho_d + \rho_i \quad (6)$$

dimana ρ_t adalah resistivitas dari vibrasi termal, ρ_d adalah resistivitas kontribusi dari deformasi (perubahan bentuk) dan ρ_i adalah resistivitas kontribusi dari impuritas (ketidakmurnian bahan).



Pada suatu material, nilai dari resistivitas akan mempengaruhi nilai suatu resistansi pada material tersebut. Hal ini dapat ditunjukkan pada persamaan (7).

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (7)$$

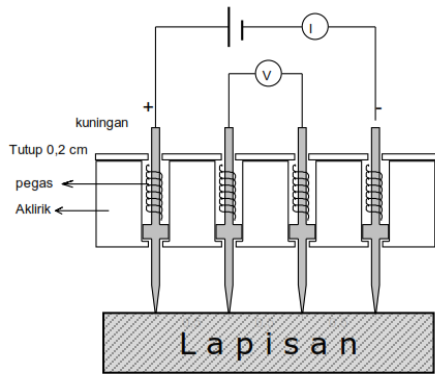
dimana R adalah suatu resistansi (Ω), ρ adalah resistivitas atau hambatan jenis ($\Omega \cdot \text{cm}$), l adalah panjang dari material dan A adalah luas penampangnya (cm^2). Apabila material itu memiliki bentuk persegi dengan lebar (w) dan panjangnya (l) sama, maka persamaan (7) dapat diubah menjadi persamaan (8).

$$R_s = \frac{\rho}{t} \quad (8)$$

Apabila nilai dari t sangat kecil sekali ($t \ll w$), maka persamaan (2.8) dikenal dengan resistivitas keeping (Ω/sq). Pada lapisan tipis, nilai resistivitas dapat kita ukur menggunakan alat probe empat titik.

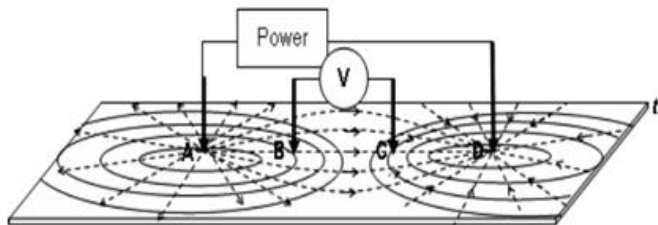
F. Probe Empat Titik

Alat yang digunakan untuk mengukur resistivitas keeping daripada lapisan tipis dapat menggunakan probe empat titik atau dikenal dengan istilah Four Point Probe yang ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2. Skema alat probe empat titik (Toifur, 2007)

Alat probe empat titik memiliki cara kerja yaitu terdapat dua bagian dari probe yaitu A dan D bekerja untuk alirkan arus listrik yang konstan sedangkan dua probe bagian dalam yaitu B dan C bekerja untuk mengukur tegangan listrik. Berikut pada gambar 3 diskemakan model dari sebaran arus listrik pada lapisan tipis yang diukur menggunakan probe empat titik.



Gambar 3. Model penyebaran arus listrik pada lapisan tipis oleh probe empat titik (Toifur, 2014)

Berdasarkan gambar 3, maka dapat digunakan persamaan untuk menentukan nilai resistivitas keping pada lapisan tipis dengan menggunakan persamaan (9) (Toifur, 2014).

$$R_s = \frac{\pi V_{BC}}{\ln 2 I} \quad (9)$$

dengan R_s adalah resistivitas keping (Ω/sq), V_{BC} adalah beda potensial B dan C (volt) dan I adalah kuat arus listrik (A). Berdasarkan persamaan (9) terlihat bahwa V_{BC} sebanding dengan I sehingga hal ini dapat membentuk suatu persamaan garis lurus yang ditunjukkan dengan persamaan (10).

$$y = ax + b \quad (10)$$

Sehingga persamaan (2.10) dapat dibentuk menjadi persamaan (11).

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

dengan,

R_s = resistivitas keping (Ω/sq)

V_{BC} = beda potensial (Volt)

I = kuat arus (A)

G. Pengaruh Waktu Deposisi

Waktu pelapisan substrat akan mempengaruhi hasil kuantitas pelapisan yang terjadi dipermukaan yang dilapisi. Semakin lama waktu saat pelapisan maka rata-rata hasil lapisan yang terjadi pada permukaan substrat 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.

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 and Martijanti 2007) sesuai dengan hukum Faraday (Mordechay and Milan 2006) dalam persamaan (12) kemudian disubstitusi dengan persamaan (5) maka diperoleh persamaan kaitan antara tebal dengan waktu deposisi yang dituliskan pada persamaan (12)

$$w_i = \frac{ItM_{Ni}}{nF} \quad (12)$$

$$\rho V = \frac{ItM_{Ni}}{nF} \quad (13)$$

$$\rho A \delta = \frac{ItM_{Ni}}{nF} \quad (14)$$


$$\delta = \frac{ItM_{Ni}}{nF\rho A} \quad (15)$$

Dengan

w_t = berat deposit yang terbentuk (g)

t = waktu (s)

M_{Ni} = massa molar nikel (g/mol)

F = Konstanta Faraday (96500 C/mol)

n = jumlah elektron

δ = tebal (cm)

I = Arus (A)


ρ = massa jenis (g/cm³)

A = Luas permukaan lapisan (cm²)

Dari persamaan (15) diperoleh informasi bahwa ketebalan lapisan sebanding dengan waktu deposisinya. Variasi waktu kontak yang diberikan pada percobaan Electroplating yang berbanding lurus dengan ketebalan dan berat deposit pada substrat (Furqon and Sulistijono 2015)

H. Kristal pada Zat Padat

Kristal merupakan suatu susunan atom pada zat padat yang memiliki bentuk periodik dalam pola tiga dimensi. Sifat dari kristal itu tergolong zat padat, akan tetapi tidak semua dari suatu zat padat itu memiliki struktur sebuah kristal. Apabila atom-atom dari zat padat



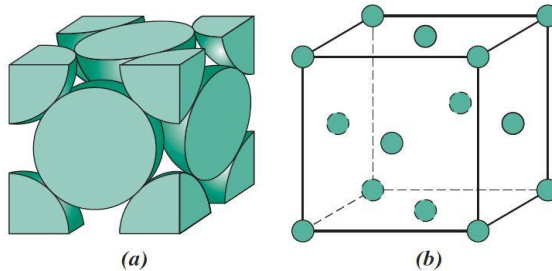
itu tertata dengan teratur dan secara periodik maka dikatakan zat padat berstruktur kristal. Peninjauan pada kristal yang dilihat dari sisi strukturnya terbagi menjadi tiga yaitu monokristal, polikristal dan amorf (Ariswan, 2008).

Pada bagian struktur kristal logam yang sederhana, maka ada tiga jenis struktur kristalnya yaitu FCC (Face-Centered Cubic), BCC (Body-Centered Cubic) dan HCP (Hexagonal Close-Packed) (Callister, 2012). Logam tembaga dan nikel merupakan logam yang memiliki struktur yang sama yaitu jenis FCC.

1. Struktur Kristal

a) FCC (*Face Centered Cubic*)

Face-centered cubic (FCC) merupakan jenis dari struktur kristal yang bentuk sel satuannya berbentuk geometrik kubik, dimana atomnya terletak pada setiap sudutnya dan permukaan kubusnya. Hal ini dapat ditunjukkan pada gambar 4.

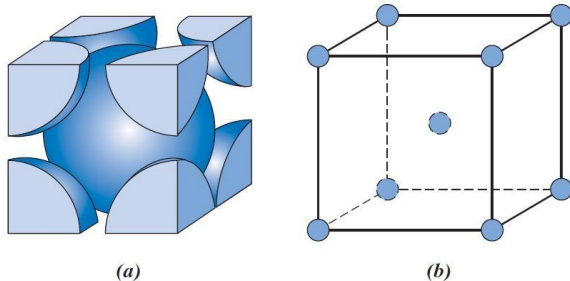


Gambar 4. Bentuk dan posisi struktur kristal jenis FCC (a) mode bola pejal untuk sel unit FCC dan (b) pusat atom diwakili oleh bola kecil untuk memberikan perspektif posisi atom yang lebih baik (Callister and Rethwisch 2015)

Berdasarkan gambar 4, apabila dalam satu sel dimana masing-masing sudut atom dijumlahkan maka akan didapatkan satu atom utuh. Bagian atom yang berpusat pada permukaan, jika dijumlahkan akan membentuk tiga atom utuh, sehingga totalnya akan terdapat empat atom utuh.

b) BCC (Body Centered Cubic)

Struktur kristal lainnya yaitu memiliki sel satuan kubik dimana atomnya terletak di delapan sudut dan satu atom terletak pada pusat kubus. Bentuk struktur kristal BCC dapat dilihat pada Gambar 5.

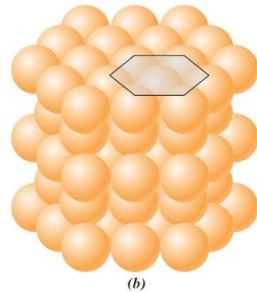
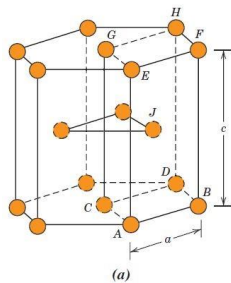


Gambar 5. Bentuk dan posisi struktur kristal jenis BCC (a) satu atom di pusat kubus dan (b) atom yang berada di pusat kubus memiliki jarak terdekat dengan delapan sudut atomnya (Callister and Rethwisch 2015)

Jumlah atom dalam satu sel pada struktur BCC adalah setara dengan dua atom utuh. Jumlah atom sudutnya membentuk seperdelapan bola jika dijumlahkan setara dengan satu bola utuh dan terletak satu atom utuh dibagian pusat kubus.

c) HCP (Hexagonal Close Packed)

Tidak semua jenis logam memiliki susunan sel satuan dengan simetri kubus. Ada bentuk struktur kristal yang umumnya juga dipelajari yaitu memiliki satuan sel heksagonal sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Bentuk dan posisi struktur kristal jenis HCP (a) sel unit dengan memperkecil ukuran atom dan (b) Kumpulan beberapa sel unit HCP (Callister and Rethwisch 2015)

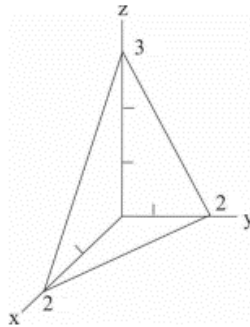
Berdasarkan Gambar 6 bahwa terbentuk enam atom pada sisi sudut atas dan bawah yang mengelilingi satu atom di tengahnya. Pada bagian tengah dari posisi atas dan bawah terdapat tiga atom tambahan yang memiliki atom terdekat di kedua dua bidang yang terdekat.

2. Indeks Miller

Indeks Miller adalah bidang parameter sebagai a/h , b/k dan c/l yang selanjutnya direduksi menjadi bilangan bulat paling sederhana. Nilai a , b dan c merupakan perpotongan yang berada di sepanjang sumbu x , y , dan z , sedangkan bidang diberi simbol (hkl) yang merupakan *indeks* Miller dan

menggambarkan semua bidang dalam kristal (Kittel 2005).

Berikut contoh dari penggambaran bidang *indeks* Miller yang ditunjukkan pada Gambar 7.

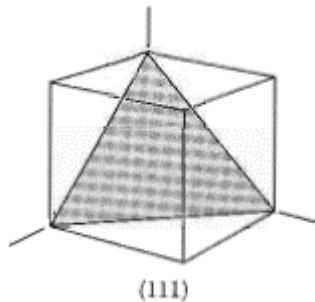


Gambar 7. Bidang Indeks Miller

Berdasarkan Gambar 7, perpotongan bidang dengan sumbu dinyatakan dengan 2, 2, dan 3 sehingga parameter numeriknya adalah 2, 2, 3 dan *indeks*

Miller bidang tersebut adalah $\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}$ atau bilangan bulat terkecil dengan rasio yang sama bahwa indeks Miller (hkl) bidang pada Gambar 6 yaitu (223). Contoh lainnya yang merupakan bidang dari FCC yang merupakan jenis untuk logam nikel dan tembaga

yaitu memiliki indeks Miller (111) dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Indeks Miller (111) (Kittel 2005)

Bidang yang terbentuk akan memiliki *space* atau jarak antara satu dengan lainnya yang dikenal dengan jarak bidang kristal. Untuk sel kubus atau kubik, jarak antar bidang (d_{hkl}) dapat dituliskan sesuai persamaan (16).

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (16)$$

dimana a merupakan parameter kisi yang nilai diperoleh dari persamaan (17).

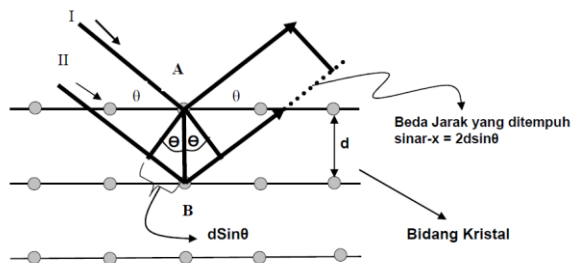
$$a = \frac{\lambda \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}{2 \sin \theta} \quad (17)$$

Dimana λ adalah panjang gelombang dari sinar-X, θ adalah sudut difraksi.

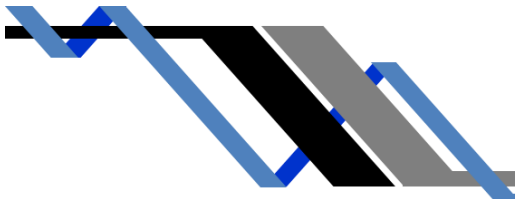
I. X-Ray Diffraction (XRD)

Bahwasanya zat padat merupakan zat yang terbagi menjadi dua kelompok yaitu ada yang berbentuk kristal dan ada berbentuk *amorf*. Perbedaan dari keduanya adalah bagaimana susunan dari atom-atomnya apakah teratur atau tidak. Logam dari tembaga dan nikel adalah logam yang memiliki pola teratur, maka kristalnya dapat dianalisis menggunakan difraksi sinar-X.

Sinar-X adalah sinar yang tergolong dalam jenis radiasi elektromagnetik yang panjang gelombangnya sebesar 0,1 nm atau 1 Å (Halliday, Resnick, and Walker 2010). Suatu bahan yang ditembak dengan sinar-X maka akan ada sebagian yang terserap dan sebagian lagi akan di hamburkan. Terhamburnya sinar-X yang terjadi karena adanya syarat yang harus memenuhi Hukum Bragg seperti yang ditunjukkan pada gambar 9.



Gambar 9. Difraksi sinar X (Beiser 2003)



Perbedaan lintasan pada berkas difraksi sinar-X harus suatu kelipatan dari panjang gelombang ($n\lambda$) sehingga dapat kita rumuskan menjadi persamaan (18).


$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (18)$$

dengan n adalah suatu bilangan bulat (1, 2, 3, ...), λ adalah panjang gelombang sinar-X, d adalah jarak bidang kristal dan θ adalah sudut yang dibentuk oleh sinar datang dengan bidang permukaan.

Terdapat tiga parameter yang digunakan dalam analisis struktur mikro dari data XRD berkaitan dengan nilai resistivitas keping lapisan tipis, yaitu intensitas, jarak bidang kristal dan grain size.

1. Intensitas

Pola difraksi yang berasal dari sinar-X dihasilkan dalam bentuk deretan puncak-puncak difraksi dengan intensitas relatif yang bervariasi sepanjang 2θ tertentu. Besar intensitas relatif puncak yang dihasilkan berasal dari deretan puncak yang tergantung pada jumlah atom atau ion yang ada dan distribusinya di dalam sel satuan material tersebut. Ketika θ diubah, maka detektor akan mencatat puncak intensitas yang bersesuaian dengan orde- n



yang divisualisasikan dalam bentuk difraktogram (Kurniawati, 2016).

Deretan puncak-puncak difraksi akan menggambarkan pola dari keberadaan fasa kristal dan fasa amorf. Keberadaan dari fasa kristal diketahui dari adanya puncak-puncak difraksi, sedangkan fasa amorf memberikan pola puncak difraksi atau intensitas yang tidak teratur.

2. Jarak Bidang Kristal

Sistem kristal akan memiliki susunan atom yang berulang dan membentuk suatu bidang yang dikenal dengan bidang kristal. Bidang kristal yang saling berdekatan disebut dengan jarak antar bidang atau *spacing* (d). Penting untuk diketahui dalam melakukan analisa struktur kristal, yaitu untuk mengetahui dimensi atau ukuran dari kristal yang terbentuk.

Jarak bidang kristal dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.18) dengan mengeluarkan d , sehingga persamaannya menjadi persamaan (19).

$$d_{hkl} = \frac{n\lambda}{2\sin\theta} \quad (19)$$

3. Grain Size (D)

Besar butiran-butiran kristal (*grain size*) dapat menunjukkan struktur mikro lapisan tipis yang terbentuk. Rata-rata ukuran kristal (D) yang diperoleh dari data XRD yaitu dengan menggunakan persamaan Scherrer (Aryanto, dkk. 2017).

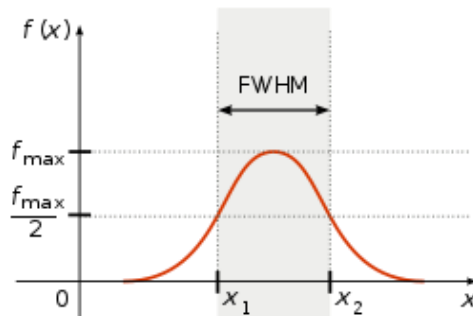
$$D = \frac{0,9\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (20)$$

dimana, λ adalah Panjang gelombang sinar-X (\AA), β adalah FWHM (full width at half maximum) dari puncak (hkl) yang sudah tercantum pada hasil XRD (deg) dan θ adalah sudut difraksi (deg) (nilai θ dapat diperoleh dengan nilai 2θ pada data XRD dibagi 2). Nilai FWHM dapat juga ditentukan dengan mencari dua titik setengah pada intensitas puncak difraktogram XRD.

Grain size dipengaruhi nilai FWHM pada puncak difraktogram XRD, dimana semakin kecil nilai FWHM maka ukuran butiran kristalnya (D) akan menjadi lebih besar. Ukuran butiran kristal yang lebih besar akan memudahkan arus listrik yang mengalir dalam lapisan tipis menjadi lebih mudah dan memiliki hambatan yang rendah (Zhou, dkk. 2004). Pengaruh

dari grain size juga berpengaruh pada nilai resistivitas, semakin berkurangnya ukuran butirnya (grain size) maka resistivitasnya akan makin meningkat dan saluran konduktif berkurang (Zhang, dkk. 1997).

Mengecilnya nilai FWHM disebabkan karena adanya peningkatan intensitas puncak difraksi sehingga FWHM akan menjadi lebar. Adanya pelebaran puncak dapat berasal akibat dari ukuran kristal dan microstrain (starin kisi karena perpindahan unit sel di daerah posisi normalnya). Pengaruh lainnya juga dapat muncul karena distorsi kisi yang tidak seragam, morfologi permukaan dan adanya pengotor.



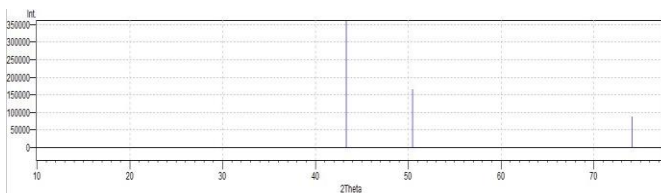
Gambar 10. FWHM
(https://en.wikipedia.org/wiki/Full_width_at_half_maximum)

Pada Gambar 10, bahwa FWHM atau lebar penuh pada setengah maksimum merupakan ekspresi tingkat fungsi yang diberikan karena perbedaan antara dua nilai pada variabel independen, dimana variabel dependen sama dengan setengah dari nilai maksimumnya.

J. Diamond

Diamond adalah perangkat lunak (*software*) yang dapat menampilkan struktur molekul dan kristal dari material atau logam. Melalui perangkat tersebut, dapat diketahui struktur logam atau material yang disesuaikan dengan data dari penelitian orang lain yang memiliki kemiripan. Tampilan dapat berupa *difraktogram* dari kandungan material atau logam dari tabel parameternya.

Berikut data *difraktogram* untuk logam Tembaga (Smura et al. 2011) yang diambil dari data *crystallography*, akan menjadi pembandingan dengan data kandungan tembaga pada penelitian lapisan tipis Cu/Ni.



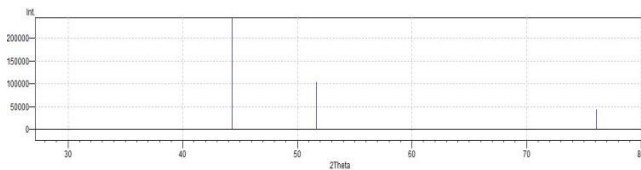
Gambar 11 Difraktogram Tembaga

Berdasarkan gambar 10, bahwa intensitas yang terbentuk terhadap sudut difraksi berupa 2θ dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3. crystallography untuk material tembaga (Cu)

No.	2θ (deg)	d (Å)	Intensitas (cps)	h	k	l
1.	43,312	2,087	361632,99	1	1	1
2.	50,444	1,807	166908,42	0	0	2
3.	74,117	1,278	89794,61	0	2	2

Adapun untuk data material nikel (Angel, Bismayer, and Marshall 2004) bentuk *difraktogram* yaitu ditunjukkan pada gambar 12.



Gambar 12. Difraktogram Nikel

Data pada gambar 11 untuk lebih detailnya dapat dilihat pada tabel 4.


Tabel 4. Crystallography Untuk Material Nikel (Ni)

No.	2θ (deg)	d (Å)	Intensitas (cps)	h	k	l
1.	44,342	2,041	244945,68	1	1	1
2.	51,666	1,767	105417,38	0	0	2
3.	76,085	1,250	43757,28	0	2	2

Pada gambar 11 dan gambar 12, bahwa intensitas hasil difraksi pada material nikel dan tembaga memiliki perbedaan pada sudut 2θ tertentu. Tiap puncak yang muncul pada pola XRD akan mewakili satu bidang kristal yang memiliki orientasi masing-masing dalam sumbu tiga dimensi. Berdasarkan data pada tabel 3 dan tabel 4 menunjukkan bahwa tembaga dan nikel memiliki persamaan pada nilai indeks Miller (hkl) yaitu (111), (002), dan (022).

K. Pengaruh Medan Magnet pada Proses Electroplating

Pengaruh medan magnet pada proses Electroplating logam telah banyak diselidiki sejak dekade terakhir. Adanya medan magnet akan mempengaruhi proses elektrokimia melalui magnetohydrodynamics (MHD), ilmu yang mempelajari tentang interaksi antara aliran fluida (bersifat elektrolit) yang sifatnya adalah elektrolit dengan medan magnet (Davidson 2001). MHD dapat



menyebabkan berpengaruhnya transportasi elektron menuju elektroda katoda dan akan meningkatkan massa endapan yang dihasilkan serta mengubah struktur morfologi pelapisan menjadi lebih homogen dan teratur (Aguilera et al. 2019).

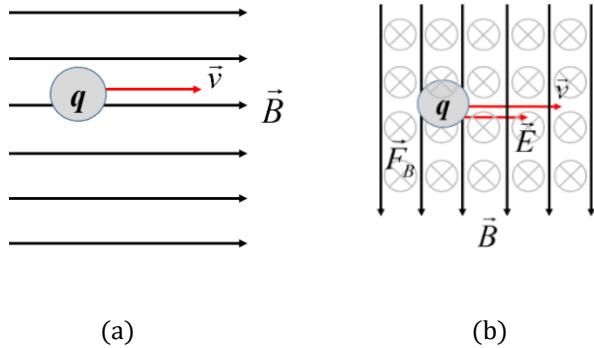
Apabila dalam suatu medium tertentu (larutan elektrolit) terjadi arus listrik (ada arus listrik), maka akan terdapat muatan listrik yang bergerak sebagai akibat dari gaya Coulomb. Arah gerakannya sesuai arah gerak muatan pada ion logam yang dimiliki, yaitu dari anoda ke katoda. Apabila pada medium tersebut dikenakan medan magnet luar maka pada sistem tersebut bekerja gaya yang dapat dinyatakan sebagai.

$$\vec{F} = q\vec{E} + q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (21)$$

dengan $q(\vec{v} \times \vec{B}) = \vec{F}_B$ merupakan gaya pada muatan

(q) yang bergerak dengan kecepatan \vec{v} di dalam medan magnet \vec{B} seperti pada Gambar 13, yang dituliskan pada persamaan (21) suku kedua, biasa disebut sebagai gaya Lorentz. Pada Gambar 13(a) kecepatan searah dengan medan magnet, sehingga mengakibatkan $\vec{F}_B = 0$. Hal ini berbeda pada Gambar 13(b), yaitu kecepatan muatan

tegak lurus dengan \vec{B} maka $\vec{F}_B \neq 0$, sehingga muatan bergerak masuk bidang.



Gambar 13. (a) Kecepatan q searah B dan (b) kecepatan q tegak lurus dengan B (Agung, R, 2019)

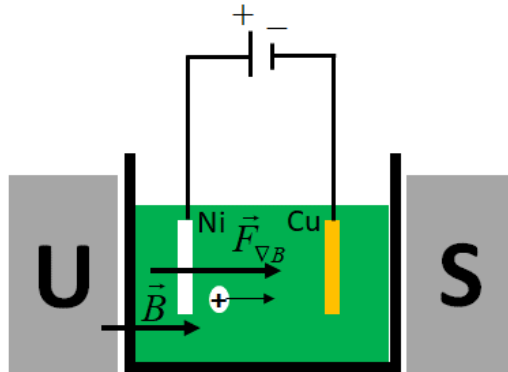
Berdasarkan Gambar 12 bahwa q dan \vec{v} adalah muatan dan kecepatan pada partikel yang bergerak. Pada proses elektrodposisi berlangsung kation dan anion bergerak saling berlawanan, sehingga q dan \vec{v} dapat disimbolkan dengan $q_+ \vec{v}_+$ dan $q_- \vec{v}_-$ (Leventis and Gao 2001).

Ketika medan magnet diterapkan dalam proses Electroplating yang dipasang tegak lurus dengan medan


listrik maka gaya Lorentz akan maksimal. Namun ketika medan magnet dipasang sejajar dengan medan listrik, gaya Lorentz harus diabaikan dan dominan akan gaya pendorong berupa gaya gradien magnetik $\vec{F}_{\nabla B}$ (Long, dkk., 2014).

$$\vec{F}_{\nabla B} = \frac{\chi V \vec{B} \cdot \nabla \vec{B}}{\mu_0} \quad (22)$$

dimana μ_0 yaitu $4\pi \times 10^{-7}$ V.s/(A.m) merupakan permeabilitas vakum, χ merupakan suseptibilitas magnetik partikel bahannya, B adalah medan magnet (T), V adalah volume partikel yang terdeposisi (m³) dan $\nabla \vec{B}$ adalah gradien medan magnetnya (Tm⁻¹).




Gambar 14. Electroplating dengan medan magnet sejajar medan listrik (Agung, R, 2019)



Berdasarkan Gambar 14, bahwa medan magnet yang sejajar dengan medan listrik dalam proses Electroplating akan menimbulkan gaya gradien sebagai pendorong ion positif menuju katoda. Munculnya gaya gradien dikarenakan medan magnet sepanjang lintasan tidak homogen, yang mana semakin jauh dari magnet maka medan magnetnya akan berkurang. Adanya garis medan magnet akan memunculkan gradien magnet disekitar elektroda, sehingga dengan adanya gradien magnet akan memperkuat proses penggabungan dalam pelapisan.

Gaya gradien magnet akan meningkat secara linier dengan meningkatnya suseptibilitas magnetik atau gradien medan magnetnya. Partikel-partikel magnetik yang tersuspensi dalam larutan elektrolit akan mengalami $\vec{F}_{\nabla B}$ yang kuat, yang mendorong partikel-partikel magnetik tersebut ke arah permukaan elektroda yaitu katoda dan akan meningkatkan kandungan partikel pelapis (Long, dkk. 2014). Besarnya gaya gradien akan membantu dalam meningkatkan volume partikel dari ion positif menuju katoda sehingga meningkatkan transportasi massa pada katoda.

Pengaruh penggunaan medan magnet sejajar dengan elektroda sesungguhnya menimbulkan begitu banyak



pengaruh yang lain diantaranya, 1) lapisan yang diendapkan homogen dengan struktur lapisan yang sangat padat (Koza et al. 2010), 2) membentuk struktur lapisan sampai pada orde nano namun membentuk struktur lapisan yang lebih solid (Fattahi and Bahrololoom 2014), 3) dapat meningkatkan rapat arus sehingga menyebabkan transfer massa ion logam meningkat (Tschulik et al., 2009).

L. Penerapan Medan Magnet pada Proses Elektrokimia

Penerapan medan magnet menyebabkan adanya pengangkutan pada semua ion yang dikarenakan oleh perbedaan susceptibilitas (kerentanan magnetik) dalam larutan dipermukaan elektroda (Waskaas and Kharkats 1999). Kepadatan energi medan magnet dalam larutan dapat ditulis sebagai berikut.

$$W_s = \frac{1}{2} \mu_0 (1 + \kappa_s) H_s^2 \quad (23)$$

Dengan hubungan

$$B = (1 + \kappa_s) \mu_0 H_s = \text{Konstan} \quad (24)$$

Jadi efek medan magnet pada proses elektrokimia dapat ditulis sebagai berikut.

$$W_s = \frac{1}{2} H_s B \quad (25)$$

$$W_s = \frac{B^2}{2\mu_0(1+\kappa_s)} \quad (26)$$

$$W_s = \frac{(1+\kappa_s)^2 \mu_0^2 H_s^2}{2\mu_0(1+H_s)} \quad (27)$$

$$W_s = \frac{1}{2} \mu_0 (1+\kappa_s) H_s^2 \quad (28)$$

Penerapan medan magnet dalam proses elektrokimia juga berfungsi sebagai gaya penggerak dalam larutan yang biasa ditulis sebagai berikut.

$$\vec{f}_m = -\nabla W_s \quad (29)$$

Kemudian substitusikan persamaan (2.31) ke persamaan (30) sehingga menjadi.

$$\vec{f}_m = -\nabla \left[\frac{B^2}{2\mu_0(1+\kappa_s)} \right] \quad (31)$$

$$\vec{f}_m = -\nabla (1+\kappa_s)^{-1} \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (32)$$

$$\vec{f}_m = \nabla 2\kappa_2 (1+\kappa_2)^{-2} \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (33)$$

$$\vec{f}_m = \nabla \kappa_2 (1+\kappa_2)^{-2} \frac{B^2}{\mu_0} \quad (34)$$

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

$$\vec{f}_m = \frac{B^2}{\mu_0 (1 + \kappa_s)^2} \nabla \kappa_s \quad (35)$$

Dengan, $\alpha = d\kappa_s / dC_p$ (36)

$$\vec{f}_m = \frac{B^2 \alpha}{2\mu_0} \nabla C_p \quad (37)$$

Gaya magnetik harus ditambahkan didalam gaya yang lain sesuai dengan persamaan Navier-Stocks karena berdasarkan persamaan tersebut menjelaskan aliran larutan didalam sistem.

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} = \nu \nabla^2 \vec{v} - \frac{\nabla P}{\rho} + \vec{g} + \frac{\vec{f}_m}{\rho} \quad (38)$$


Persamaan kontinuitas dapat ditulis sebagai berikut.

Jika, $(\vec{v} \nabla) = 0$ (39)

Sehingga persamaan diatas menjadi.

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} = 0 - \frac{\nabla P}{\rho} + \vec{g} + \frac{B^2 \alpha}{2\mu_0} \nabla C_p \quad (40)$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} = 0 - \frac{\nabla P}{\rho} + \vec{g} + \frac{B^2 \alpha}{2\mu_0 \rho} \nabla C_p \quad (41)$$



Model matematika untuk mendeskripsikan aliran pada larutan berdasarkan pada persamaan Navier-Stocks adalah:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} = - \frac{\left(\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial P}{\partial z} \right)}{\rho} + \vec{g} + \frac{B^2 \alpha}{2\mu_0 \rho} \left(\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \right) C_p \quad (42)$$



EKSPERIMEN


A. Metode Eksperimen

1. Preparasi Sampel

a. Alat

- 1) Gelas ukur 1000 mL sebagai pengukur volume larutan.
- 2) Gunting untuk memotong plat tembaga.
- 3) Penggaris baja untuk mengukur panjang dari sampel.
- 4) Pinset untuk menjepit sampel.
- 5) Baki untuk wadah sampel.
- 6) *Hair dryer* untuk mengeringkan sampel.
- 7) *Ultrasonic cleaner* sebagai wadah untuk mencuci sampel.

- 8) *Neraca Ohaus* P214 sebagai alat ukur massa sampel.
- 9) Sikat gigi yang memiliki bulu lembut untuk membersihkan sampel.
- 10) Bak plating terbuat dari kaca sebagai wadah untuk proses *Electroplating*.
- 11) DC *power supply* sebagai sumber dari tegangan searah (DC).
- 12) Pemanas yang digunakan untuk memanaskan larutan elektrolit.
- 13) Termometer sebagai alat ukur dari suhu larutan elektrolit.
- 14) *Current probe* yaitu alat untuk mengetahui nilai kuat arus listrik selama proses *Electroplating* berlangsung.
- 15) *Voltage probe* yaitu alat untuk mengetahui nilai tegangan listrik DC yang digunakan.
- 16) *Thermocouple* yaitu alat untuk mengetahui nilai suhu pada larutan selama proses *Electroplating* berlangsung.
- 17) Medan magnet yaitu untuk memberikan efek pada proses *Electroplating*.
- 18) *Slide regulator* untuk membangkitkan medan magnet yang digunakan.

- 
- 19) Kabel penghubung untuk menghubungkan alat listrik.
 - 20) Resistor sebagai penghambat arus listrik dalam sambungan rangkaian dari *probe* empat titik.
 - 21) *Breadboard* yaitu untuk tempelan daripada resistor.
 - 22) *Microwave* Tipe *Minecraft* digunakan untuk memanaskan lapisan tipis Cu/Ni.
 - 23) Tabung nitrogen cair 10 liter yaitu cairan yang akan digunakan untuk uji sensor lapisan tipis.


b. Bahan

- 1) Plat tembaga yang memiliki tebal 0,5 mm dengan ukuran 10 mm x 1,3 mm sebanyak 5 sampel.
- 2) Plat nikel sebagai anoda yang akan melapisi plat tembaga.
- 3) Aquades untuk mengencerkan larutan yang digunakan.
- 4) Alkohol digunakan untuk membersihkan sampel.
- 5) *Cutting sticker* untuk ditempelkan pada plat tembaga yang sudah didesain bentuknya.
- 6) Plastik klip untuk wadah penyimpanan sampel.

- 7) Pasta gigi untuk membersihkan sampel dari kotoran.
- 8) Autosol yaitu untuk membersihkan plat tembaga dari kotoran dan untuk menghaluskan serta mengkilapkan permukaan.
- 9) Kertas tisu untuk mengeringkan dan membungkus sampel.
- 10) Penghapus karet digunakan untuk menghapus *cutting sticker*.
- 11) Ferrie Klorida (FeCl_3) yaitu larutan yang digunakan untuk melarutkan plat tembaga yang sudah ditemplei dengan *cutting sticker*.
- 12) Asam borak (H_3BO_3) dengan komposisi sebanyak 40 gr/l yang berfungsi untuk mengontrol pH larutan elektrolit.
- 13) Nikel sulfat (NiSO_4) dengan komposisi sebanyak 260 gr/l yang digunakan untuk pembuatan larutan elektrolit.
- 14) Nikel klorida (NiCl_2) dengan komposisi 60 gr/l juga sebagai pembuatan larutan elektrolit.

c. Langkah-langkah Preparasi Sampel

- 1) Menyiapkan sampel dari plat logam tembaga yang memiliki ketebalan 0,3 mm.

- 
- 2) Membersihkan sampel dengan menggunakan autosol agar sampel bersih dari kotoran.
 - 3) Menyiapkan *cutting sticker* yang sebelumnya sudah di desain dan dicetak.
 - 4) Menempelkan *cutting sticker* pada plat logam tembaga.
 - 5) Menggunting sampel dengan ukuran 10 cm x 1,3 cm.
 - 6) Pada bagian belakang sampel akan kita temple menggunakan lakban.
 - 7) Sampel kemudian kita masukkan ke dalam larutan Feri Klorida (FeCl_3).
 - 8) Selama dalam larutan Feri Klorida (FeCl_3) sebaiknya wadahnya sambil di goyang agar proses pengikisan bisa berlangsung lebih cepat.
 - 9) Selanjutnya sampel kita bersihkan pada air yang mengalir lalu dikeringkan.
 - 10) Gunakan penghapus karet untuk membersihkan *cutting sticker* yang menempel pada sampel.
 - 11) Permukaan sampel kita bersihkan lagi menggunakan autosol.
 - 12) Selanjutnya membersihkan permukaannya dibersihkan lagi menggunakan pasta gigi.

- 13) Sampel dicuci kembali dan digosok menggunakan sikat gigi dengan bulu yang halus.
- 14) Setelah dibersihkan, sampel dicuci kembali menggunakan aquades.
- 15) Selanjutnya sampel dibersihkan dengan memasukkan ke dalam *ultrasonic cleaner* yang berisikan alkohol selama 3 menit.
- 16) Sampel selanjutnya dikeringkan dengan menggunakan *hair dryer* secara bergantian sampai kering.
- 17) Sampel yang sudah dikeringkan kita bungkus dengan menggunakan tisu kering dan disimpan dalam plastik klip.

2. Pembuatan lapisan tipis Cu/Ni

a. Alat

- 1) Gelas ukur 1000 mL untuk pengadukan larutan elektrolit
- 2) Gelas ukur 250 mL untuk aquades.
- 3) *Magnetic Stirrer* jenis MS400 untuk mengaduk larutan elektrolit.
- 4) *Neraca ohaus* PA214 untuk menimbang massa bahan-bahan pembuatan larutan elektrolit.

- 5) Kompor listrik untuk memanaskan larutan elektrolit.
- 6) Botol air mineral ukuran 1,5 liter untuk penampungan dan penyimpanan larutan elektrolit.
- 7) Termometer raksa sebanyak 2 buah untuk mengukur suhu larutan elektrolit saat pemanasan dan selama proses *Electroplating*.
- 8) *Current probe* untuk mengukur arus yang digunakan pada proses *Electroplating*.
- 9) *Voltage probe* untuk mengukur tegangan listrik yang digunakan pada proses *Electroplating*.
- 10) *Labquest* mini *Vernier* sebagai penghubung *current probe* dan *voltage probe* dengan *software* loggerpro pada laptop.
- 11) Bak plating sebagai penampungan larutan elektrolit.
- 12) Kabel penghubung secukupnya.
- 13) Magnet untuk memberikan pengaruh ketika proses *Electroplating*
- 14) Sensor medan magnet untuk mengetahui kutub-kutub magnet.
- 15) *Regulator* untuk menaikkan tegangan listrik.
- 16) DC *power supply* EXTECH 382213

17) Pinset untuk menjepit sampel.

18) Laptop Dell Inspiron 64 bit RAM 8 GB untuk menampilkan program *logger pro* sebagai data dari kinerja sensor.

b. Bahan

1) Asam borak (H_3BO_3) sebanyak 40 g/l sebagai pengontrol pH larutan elektrolit.

2) Nikel sulfat (NiSO_4) sebanyak 260 g/l sebagai campuran larutan untuk pembuatan larutan elektrolit.

3) Nikel Klorida (NiCl_2) sebanyak 60 g/l sebagai campuran untuk pembuatan larutan elektrolit.

4) Aquades sebagai pengencer larutan elektrolit.

5) Tisu untuk membungkus sampel.

c. Langkah-langkah pembuatan lapisan tipis Cu/Ni

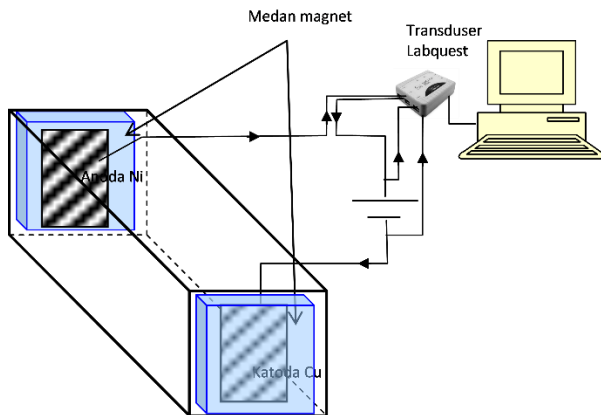
1) Membuat larutan elektrolit dengan mencampurkan nikel sulfat, nikel klorida, asam borak dengan aquades sebanyak 1 L.

2) Mengaduk larutan dengan mesin *Magnetic Stirrer*.

3) Menyimpan larutan yang sudah diaduk ke dalam botol 1,5 L.


(catatan: sebelum proses *Electroplating* dilakukan, maka terlebih dahulu dilakukan pengecekan kutub magnet menggunakan sensor medan magnet yang terhubung dengan *Labquest*).

- 4) Selanjutnya menyiapkan rangkaian untuk proses *Electroplating* yang ditunjukkan pada gambar 15.



Gambar 15. Rangkaian Electroplating berbantuan medan magnet

- 5) Memasukkan larutan elektrolit ke dalam wadah dan dipanaskan diatas kompor listrik sampai suhu yang terukur pada termometer adalah 60 °C.

- 
- 6) Menghubungkan sensor tegangan listrik dan arus listrik pada *labquest* yang selanjutnya dihubungkan dengan USB laptop.
 - 7) Mengaktifkan program *LoggerPro* pada laptop yang digunakan, sehingga akan menampilkan grafik tegangan listrik dan kuat arus listrik terhadap waktu.
 - 8) Medan magnet diatur pada nilai 200 G.
 - 9) Pasanglah plat nikel pada anoda dan tembaga pada katoda.
 - 10) Hidupkan sumber tegangan DC yaitu DC *power supply*.
 - 11) Rekam data melalui program *LoggerPro* selama proses *Electroplating* yaitu dengan variasi waktu dari 1-10 menit dengan rentang 1 menit setiap sampel.
 - 12) Angkatlah sampel lapisan Cu/Ni dan masukkan ke dalam gelas kimia 50 mL yang berisikan aquades.
 - 13) Lakukan langkah dari f sampai j untuk empat sampel lainnya.

3. Uji Resistivitas Lapisan

a. Alat

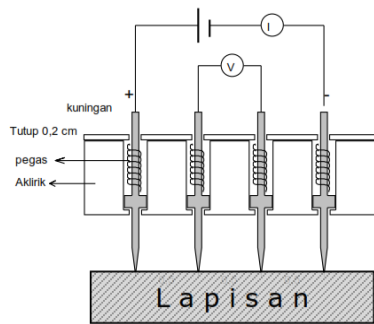
- 1) Multimeter digital EXTECH MM560A sejumlah dua unit sebagai amperemeter dan voltmeter
- 2) Kabel penghubung secukupnya.
- 3) DC *Power supply* CELLKIT 1502DDU.
- 4) Resistor yang nilainya 100 Ω .
- 5) Obeng berfungsi untuk membuka dan mengunci baut.
- 6) *Breadboard* untuk tempat pemasangan resistor.
- 7) *Probe* 4 titik yang digunakan adalah produk buatan sendiri.

b. Bahan

Sampel yang digunakan adalah plat tembaga yang sudah dicetak dan dibersihkan

c. Langkah-langkah uji resistivitas lapisan

- 1) Menyiapkan dan merangkai rangkaian seperti pada gambar 15.



Gambar 16. Skema rangkaian *probe* empat titik
(Toifur, 2007)

- 2) Meletakkan lapisan tipis Cu/Ni tepat dibawah alat *probe* empat titik.
- 3) Nyalakan sumber tegangan DC.
- 4) Putar *knop* pada sumber tegangan DC dengan perlahan-lahan pada pengaturan nilai tegangan tertentu.
- 5) Amati dan catat nilai tegangan listrik dan kuat arus listrik yang muncul pada amperemeter dan voltmeter.

4. Uji Struktur Mikro

- 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.

5. Uji kinerja sensor

a. Alat

- 1) Tabung nitrogen cair
- 2) *Tranduser* sebagai pengubah data analog menjadi digital.
- 3) *Labquest* mini Vernier untuk penyambung sensor tegangan dan sensor suhu.
- 4) *Voltage probe* untuk mengukur tegangan sebagai data keluaran dari sensor lapisan tipis Cu/Ni.
- 5) *Thermocouple* sebagai sensor suhu yang disambungkan dengan *Labquest* mini.
- 6) Kabel sepanjang 1 m digunakan untuk penghubung lapisan tipis Cu/Ni bagian sensor dengan tranduser.

- 7) Laptop untuk menampilkan *software loggerpro* 3.15 sebagai penampil data kinerja sensor.

b. Bahan

- 1) Sampel dari bagian lapisan tipis Cu/Ni yang ditunjukkan pada gambar 17.



Gambar 17. Sampel untuk uji sensor

- 2) Nitrogen cair sebagai media untuk uji sensor pada suhu rendah.

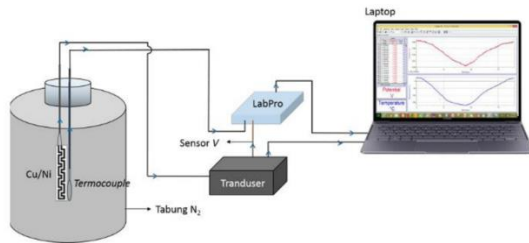
c. Langkah-langkah

- 1) Kabel dihubungkan dengan sensor lapisan tipis Cu/Ni sebagaimana ditunjukkan pada gambar 18.



Gambar 18. Sensor yang dihubungkan dengan kabel

- 2) Merangkai alat dan bahan uji sesuai gambar 19.



Gambar 19. Rangkaian uji sensor lapisan tipis Cu/Ni (Khusnani 2019)

- 3) Menempelkan secara sejajar kabel dan sensor lapisan tipis Cu/Ni dengan termokopel.
- 4) Mengatur waktu pada *data collection* tampilan loggerpro yaitu selama 30 menit dan sampling rate yaitu 90.
- 5) Mengatur kalibrasi dengan memilih input temperatur yaitu *temperatur low*.
- 6) Klik tombol *collect* pada menu *bar loggerpro*.
- 7) Memasukkan sensor lapisan tipis Cu/Ni dan termokopel sampai suhu $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan mengangkat sensor serta termokopel sampai suhu $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

B. Analisis Data

1. Menentukan Tebal Lapisan Cu/Ni

Ketebalan lapisan nikel yang mengendap pada plat tembaga dapat ditentukan dengan menggunakan selisih massa sebelum dan setelah proses *Electroplating*. Data massa sebelum plating dan setelah plating dimasukkan ke dalam tabel 5 dan tabel 6 untuk diperoleh nilai rata-rata dan ralatnya.

Tabel 5. Tabulasi massa plat tembaga (Cu)

i	m_{Cu} (gr)	$m_{Cu_i} - \bar{m}_{Cu}$ (gr)	$(m_{Cu_i} - \bar{m}_{Cu})^2$ (gr)
1			
2			
3			
4			
5			
Σ			
\bar{m}_{Cu}	gr		
$S_{m_{Cu}}$	gr		

Dimana nilai massa rata-rata yaitu

$$\bar{m}_{Cu} = \frac{\sum m_{Cu_i}}{N} \quad (43)$$

Sedangkan untuk ralatnya adalah

$$S_{m_{Cu}}^- = \sqrt{\frac{\sum (m_{Cu_i} - \overline{m_{Cu}})^2}{N(N-1)}} \quad (44)$$

Dengan N adalah banyaknya data.

Tabel 6. Tabulasi massa lapisan tipis Cu/Ni

i	m_{Cu} (gr)	$m_{Cu_i} - \overline{m_{Cu}}$ (gr)	$(m_{Cu_i} - \overline{m_{Cu}})^2$ (gr)
1			
2			
3			
4			
5			
\sum			
$\overline{m_{Cu}}$	gr		
$S_{m_{Cu}}$	gr		

Dimana nilai massa rata-rata yaitu

$$\overline{m_{Cu/Ni}} = \frac{\sum m_{Cu/Ni_i}}{N} \quad (45)$$

Sedangkan untuk ralatnya adalah

$$S_{m_{Cu/Ni}}^- = \sqrt{\frac{\sum (m_{Cu/Ni_i} - \overline{m_{Cu/Ni}})^2}{N(N-1)}} \quad (46)$$

Nilai luas (A) plat yang digunakan yaitu $7,61 \text{ cm}^2$ dan ralatnya (S_A) yaitu $0,005 \text{ cm}^2$. Nilai massa jenis dari nikel sebagai pelapis yaitu $\rho = 8,908 \text{ gr/cm}^3$.

Ketebalan yang terbentuk dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (5). Sedangkan untuk mencari ralatnya dapat ditentukan dengan persamaan (47).

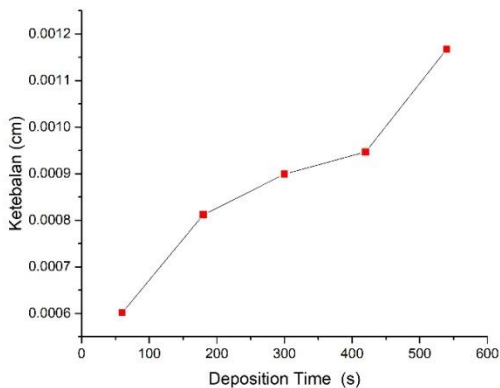
$$S_\delta = \sqrt{\left(\frac{1}{\rho A} s_{m_{Cu/Ni}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\rho A} s_{m_{Cu}}\right)^2 + \left(\frac{m_{Cu/Ni} - m_{Cu}}{\rho A^2} s_A\right)^2} \quad (47)$$

Proses Electroplating yang dilakukan untuk membentuk lapisan tipis Cu/Ni menghasilkan endapan nikel pada plat tembaga yang ketebalannya dapat dihitung dengan persamaan (5). Hasil yang diperoleh dapat ditunjukkan pada tabel 7.

Tabel 7. Data ketebalan lapisan tipis Cu/Ni yang terbentuk dengan variasi waktu deposisi berbantuan medan magnet sejajar

Sampel	m_{Cu} (gr)	$m_{Cu/Ni}$ (gr)	$(\delta \pm S_\delta) (\times 10^{-5})$ (cm)
60	2.497	2.538	6.016 ± 0.629
180	2.485	2.540	8.119 ± 0.730
300	2.465	2.526	8.990 ± 0.768
420	2.478	2.542	9.465 ± 0.789
540	2.458	2.537	11.67 ± 0.876

Hasil massa yang diperoleh pada setiap sampel menunjukkan bahwa massa sebelum dan setelah proses Electroplating mengalami kenaikan yang linier. Adanya kenaikan nilai massa menunjukkan bahwa adanya pengendapan nikel pada plat tembaga sehingga dapat dikatakan telah terbentuk lapisan tipis Cu/Ni.



Gambar 20. Grafik hubungan ketebalan lapisan Ni terhadap waktu deposisi

diketahui bahwa tebal lapisan yang terbentuk sebanding dengan waktu deposisinya. Pada gambar 20 dapat dilihat bahwa ketebalan lapisan yang terbentuk bertambah secara linier sesuai dengan perubahan waktunya.

2. Menentukan Resistivitas Keping

Menentukan nilai resistivitas keping sampel yang dilakukan dengan 2 kali pengukuran yaitu sebelum proses *Electroplating* dan setelah proses *Electroplating* dengan menggunakan persamaan (9). Setiap sampel dilakukan pengukuran menggunakan *probe* empat titik dengan titik posisi yang berbeda-beda. Sehingga di dapatkan data sebagaimana yang ditunjukkan pada tabel 8.

Tabel 8. Tabulasi pengukuran *probe* empat titik untuk tegangan listrik

i	V_{BCi} (mV)	$V_{BCi} - \bar{V}$ (mV)	$(V_{BCi} - \bar{V})^2$ (mV)
1			
2			
3			
4			
5			
Σ			
\bar{V}	mV		
$S_{\bar{V}}$	mV		

Dengan nilai ralat $S_{\bar{V}}$ yaitu

$$S_{\bar{V}} = \sqrt{\frac{\sum (V_{BCi} - \bar{V})^2}{N(N-1)}} \quad (48)$$

Tabel 9. Tabulasi pengukuran probe empat titik untuk kuat arus listrik

i	I_{ADi} (mA)	$I_{ADi} - \bar{I}$ (mA)	$(I_{ADi} - \bar{I})^2$ (mA)
1			
2			
3			
4			
5			
\sum			
\bar{I}	mA		
$S_{\bar{I}}$	mA		

Dengan nilai ralat $S_{\bar{V}}$ yaitu

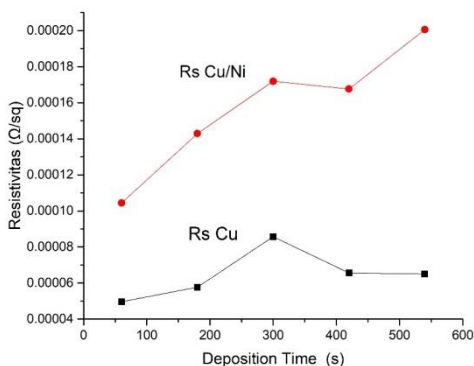
$$S_{\bar{I}} = \sqrt{\frac{\sum (I_{ADi} - \bar{I})^2}{N(N-1)}} \quad (49)$$

Nilai resistivitas keping pada sampel dapat ditentukan dengan memasukkan hasil \bar{V} dan \bar{I} ke dalam persamaan (9). sedangkan untuk besar ralatnya dapat dicari menggunakan persamaan (50).

$$S_{R_s} = \sqrt{\left(\frac{\pi}{\ln 2I} S_V\right)^2 + \left(\frac{\pi}{\ln 2I^2} S_I\right)^2} \quad (50)$$


Uji resistivitas keping dilakukan sebanyak 2 kali, tujuannya untuk mengetahui perubahan nilai

resistivitas keping Cu sebelum dan sesudah deposisi Ni. Nilai keduanya yaitu 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 yang dilakukan pada lima posisi yang berbeda untuk memperoleh nilai tegangan listrik (V) dan nilai kuat arus listrik (I) sehingga dapat ditentukan nilai resistivitas keping tiap sampel dengan persamaan (3.6).



Gambar 21. Grafik hubungan waktu deposisi dengan resistivitas

Berdasarkan gambar 21 yang menunjukkan adanya perubahan nilai resistivitas keping bahan yang berbeda pada setiap sampel. Pada gambar 21 dapat diketahui telah terjadi kenaikan nilai resistivitas keping setelah



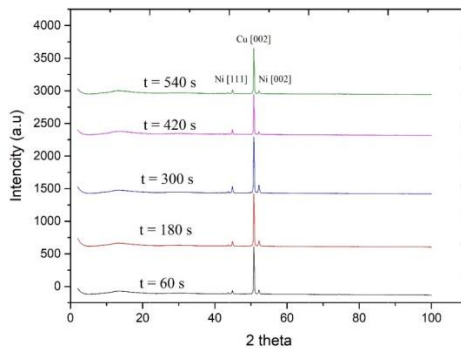
proses *Electroplating* yang dilakukan pada plat tembaga. Adanya peningkatan nilai resistivitas keping menunjukkan bahwa adanya endapan nikel terbentuk pada plat tembaga dari proses *Electroplating* yang salah satu tujuannya yaitu meningkatkan nilai resistivitas keping tembaga.

3. Uji Struktur Mikro

Uji struktur mikro yang akan dilakukan menggunakan XRD yaitu dengan cara melihat data puncak (*peak list*) yang dihasilkan. Data puncak dapat dianalisis dengan bantuan *software origin*. Dari analisis yang dilakukan terhadap tampilan puncak *difraktograf* dapat diketahui munculnya bentuk lapisan Cu dan Ni. Semakin tinggi intensitas, maka struktur mikronya semakin teratur. Untuk mengetahui jenis bahan dapat dianalisis menggunakan tabel hkl yang akan dicocokkan dengan data dari *crystallography* yang bisa diakses melalui *software diamond crystal impact*.

Analisis lainnya untuk mengetahui struktur mikro yaitu jarak bidang kristal (d_{hkl}) yang dapat dihitung dengan persamaan (19) dan mencari *grain size* dengan menggunakan persamaan (20).

Perubahan struktur lapisan pada lapisan tipis Cu/Ni dengan menggunakan variasi waktu deposisi berbantuan medan magnet sejajar dapat diketahui dari uji struktur mikro dengan menggunakan XRD (X-Ray Diffraction), sehingga akan dihasilkan data berupa difraktogram dari lapisan tipis Cu/Ni. Hasil karakterisasi data difraktogram lapisan tipis Cu/Ni dengan variasi waktu deposisi telah dianalisis dapat dilihat pada gambar 22.




Gambar 22. Spektrum XRD lapisan tipis Cu/Ni dengan variasi waktu deposisi

Data difraktogram lapisan tipis Cu/Ni yang didapatkan dari hasil XRD akan disesuaikan dengan data acuan dari sampel crystallography yang ditunjukkan pada Tabel 10.

a. Intensitas

Tabel 10. Sudut difraksi dan intensitas lapisan tipis Cu/Ni

No	Waktu Deposi (s)	Cu		Ni		Hkl	
		2θ (deg)	I (cps)	2θ (deg)	I (cps)	Cu	Ni
1	60	43,665	35,488	44,862	70,228	111	111
		50,813	739,741	52,21	77,103	002	002
		74,428	15,152	-	-	022	-
2	180	43,639	35,960	44,893	89,115	111	111
		50,803	823,415	52,233	100,355	002	002
		74,415	13,872	-	-	022	-
3	300	43,63	38,384	44,86	155,305	111	111
		50,808	879,192	52,217	138,414	002	002
		74,425	15,991	-	-	022	-
4	420	43,684	33,612	44,86	87,607	111	111
		50,79	630,091	52,205	55,671	002	002
		-	-	-	-	-	-
5	540	43,679	29,482	44,899	73,201	111	111
		50,795	716,158	52,239	60,015	002	002
		74,422	17,728	-	-	022	-

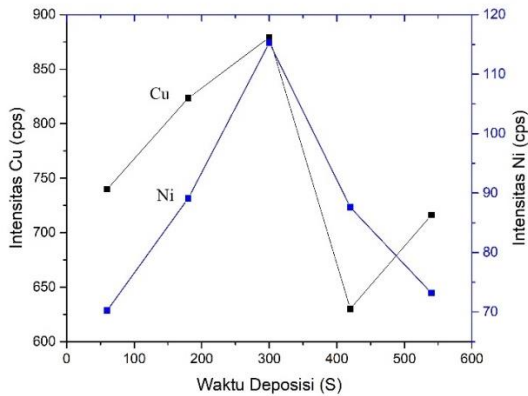


Berdasarkan data tabel 10 bahwa nilai 2θ pada material tembaga dan nikel lapisan tipis Cu/Ni memiliki kemiripan berdasarkan pencocokkan data crystallography sehingga bidang refleksinya sesuai kategori struktur FCC (face center cubic). Nilai intensitasnya yang terbentuk akan menunjukkan keteraturan atom-atom pada kristal lapisan tipis. Nilai intensitas yang semakin tinggi maka semakin baik keteraturan atom-atom yang telah terbentuk pada lapisan.

Berdasarkan gambar 23 dapat diambil satu puncak difraksi dengan sudut 2θ sebesar $\pm 43^\circ$ yang dikarenakan pada sudut tersebut nikel memiliki intensitas puncak difraksi yang paling tinggi dibandingkan dengan sudut-sudut lainnya. Informasi lebih jelas untuk material Cu dan Ni ditampilkan pada tabel 11.


Tabel 11. Data intensitas (I) dan 2θ untuk tembaga dan nikel dari lapisan tipis Cu/Ni

No	Waktu Deposisi (s)	Material Cu		Material Ni	
		2θ (deg)	I (cps)	2θ (deg)	I (cps)
1	60	50,813	739,741	44,862	70,228
2	180	50,803	823,414	44,893	89,115
3	300	50,808	879,192	44,86	115,304
4	420	50,79	630,091	44,86	87,606
5	540	50,795	716,158	44,899	73,201



Gambar 23. Hubungan waktu deposisi terhadap intensitas difraksi Cu dan Ni

Pada gambar 23 ditampilkan grafik pengaruh waktu deposisi pada intensitas difraksi Cu dan Ni. Bentuk kurva intensitas difraksi pada bahan Cu dan



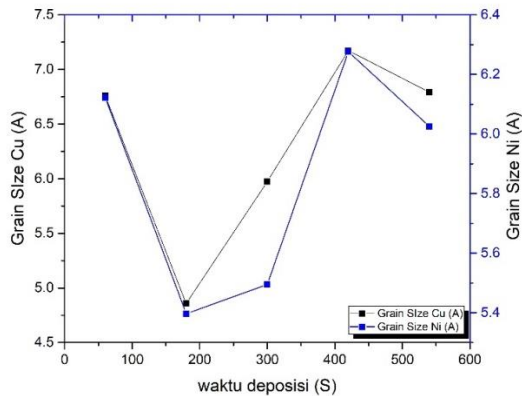
Ni cenderung mirip sehingga menunjukkan struktur kristal Cu mempengaruhi struktur kristal Ni yang dilapiskan di atas permukaan Cu. Puncak intensitas difraksi Ni tertinggi kedua fasa terjadi pada waktu 300 s sebesar 115.30 cps, sedangkan intensitas terkecil bersesuaian dengan waktu deposisi 60s sebesar 70.22 cps. Dari sini tampak bahwa pada dari waktu deposisi 60s sampai 300s tingkat keteraturan struktur kristal semakin naik. Namun penambahan waktu deposisi hingga 540s membuat tingkat keteraturan struktur kristal lapisan mengalami penurunan. Hal ini disebabkan pengaruh dari gas hidrogen sebagaimana disebutkan diatas, sehingga menghambat proses pelapisan. Dalam kondisi demikian adanya medan magnet luar tidak membantu penataan atom-atom Ni pada permukaan Cu.

b. Grain Size

Menentukan besarnya grain size atau ukuran butir nikel yang terdapat pada lapisan tipis Cu/Ni adalah dengan menggunakan persamaan (20) dimana nilai λ yang digunakan yaitu 1,5406 Å dan hasilnya dapat dilihat pada tabel 12.


Tabel 12. Grain size dari nikel pada lapisan tipis Cu/Ni pada variasi waktu deposisi

No	Waktu Deposisi (s)	θ (deg)	FWHM (deg)	Grain Size (\AA)
1	60	22,431	0,245	6,123
2	180	22,447	0,278	5,396
3	300	22,430	0,273	5,495
4	420	22,430	0,239	6,276
5	540	22,450	0,249	6,025



Gambar 24. Hubungan waktu deposisi terhadap grain size

Pada deposisi Ni berbantuan medan magnet, waktu deposisi mempengaruhi ukuran butir kristal Ni yang terbentuk pada arah [111] (gambar 24).



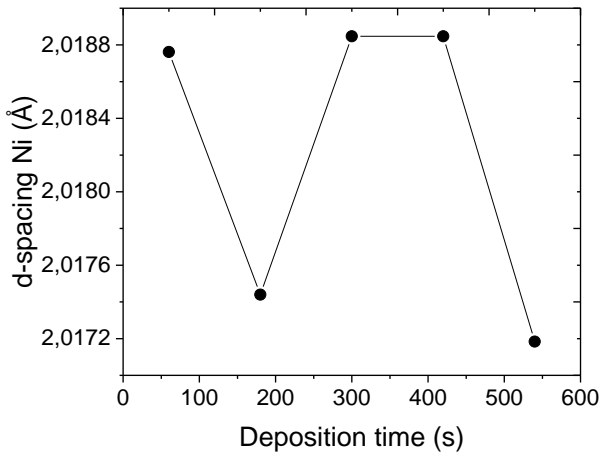
Semula ukuran butir dari waktu deposisi 60s sampai 180s menurun kemudian dari 180s sampai 420s mengalami kenaikan dan seterusnya turun lagi. Grain size berkisar diantara 5.40A sampai 6.30A. Ukuran butir Ni terkecil diperoleh pada sampel hasil deposisi dalam waktu 180s sedangkan ukuran terbesar bersesuaian dengan sampel hasil deposisi dalam waktu 420s. Fluktuasi ukuran butir ini diperkirakan medan magnet berperan memandu terbentuknya pertumbuhan feromagnetik Ni searah medan magnet (Yu et al. 2015). Ini sesuai dengan hasil penelitian Zhou et al (Zhou, Zhong, Wang, Fan, et al. 2013; Zhou, Zhong, Wang, Long, et al. 2013) yang telah melakukan plating Fe/Nano-Si berbantuan medan magnet paralel. Permukaan lapisan Fe-nano Si menjadi bergelombang dan bergaris-garis jelas.

c. Jarak Bidang kristal (dhkl)


Jarak bidang kristal pada lapisan tipis Cu/Ni untuk material nikel dapat diperoleh dari data XRD dengan menggunakan persamaan (19), sehingga dapat ditampilkan pada tabel 13.

Tabel 13. Jarak bidang kristal nikel pada lapisan tipis Cu/Ni pada variasi waktu deposisi

No	Suhu <i>Annealing</i> (°C)	2θ (deg)	θ (deg)	d_{hkl} (Å)
1	60	44,862	22,431	2,0188
2	180	44,893	22,447	2,0174
3	300	44,86	22,430	2,0188
4	420	44,86	22,430	2,0188
5	540	44,899	22,450	2,0172



Gambar 25. Grafik hubungan waktu deposisi terhadap d-spacing pada material nikel (Ni)




Waktu deposisi bersama-sama dengan medan magnet eksternal berpengaruh secara tidak langsung terhadap jarak bidang kristal. Pertama jarak bidang kristal turun kemudian naik dan kemudian turun kembali. Disini medan magnet berperan untuk membangun pembentukan kristal Ni dengan ukuran tertentu. Kombinasi dari medan gaya medan magnet pada Ni dengan gaya listrik serta gaya hambat (*magnetic driving force*) di dekat permukaan katoda telah membuat jarak antar bidang Ni menjadi berubah-ubah terhadap lamanya deposisi.

4. Kinerja sensor

Menentukan hubungan tegangan *output* terhadap suhu dari uap LN₂ maka digunakan metode *fitting data* polinomial orde 2, menurut persamaan (Bevington and Robinson 2003):

$$y = a^2x + bx + c \quad (51)$$

Penerapan *fitting* data polinomial orde 2 disebabkan oleh sebaran data yang tidak membentuk kurva linier, sehingga *fitting* yang paling cocok untuk menganalisa kurva yang dihasilkan adalah menggunakan polinomial orde 2. Bentuk keluaran data yaitu perubahan tegangan listrik terhadap suhu.

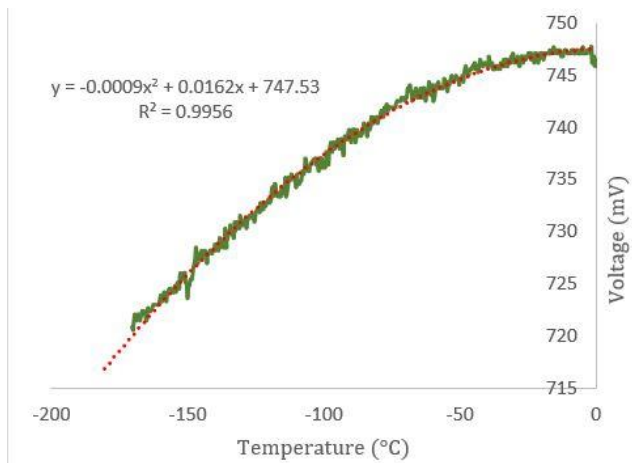


Analisis terhadap data keluaran tegangan listrik dengan suhu dilakukan dengan aplikasi *microsoft excel* dan pada grafik menggunakan aplikasi *origin*. Kinerja sensor RTD dapat dianalisis dengan melihat kepekaan sensor dengan menurunkan persamaan (30) terhadap suhu, sehingga persamaan akan menjadi

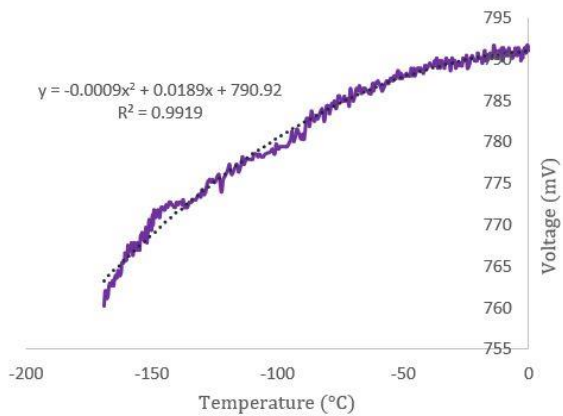
$$\frac{dy}{dx} = 2ax + b \quad (52)$$

Variabel kepekaan dalam hal ini adalah kepekaan temperatur. Apabila nilai koefisien (a) semakin besar, maka kepekaan akan semakin baik, sehingga kinerja sensor dari lapisan tipis sebagai elemen RTD akan semakin baik.

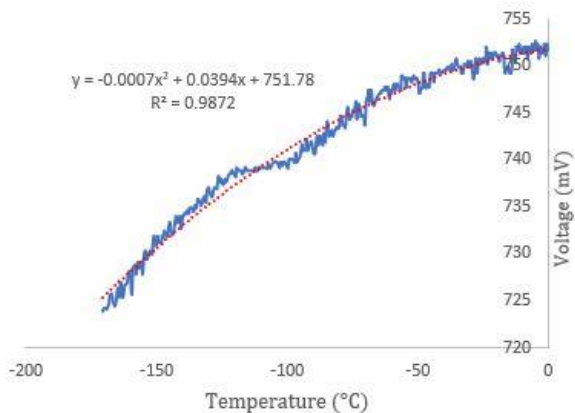
Uji kinerja dari lapisan tipis Cu/Ni hasil proses *Electroplating* dengan variasi waktu deposisi sebagai sensor suhu rendah yang dilakukan dengan mengukur perubahan nilai tegangan listrik (V) terhadap nilai perubahan suhu (T) yang dilakukan pada media nitrogen cair (LN₂). Hasil keluaran akan berbentuk grafik dan *fitting* data yang digunakan untuk analisis grafik tersebut menggunakan polinomial orde dua. Hasil kinerja sensor RTD sebagai sensor suhu rendah pada variabel waktu deposisi berbantuan medan magnet sejajar ditampilkan pada gambar 27- 31.



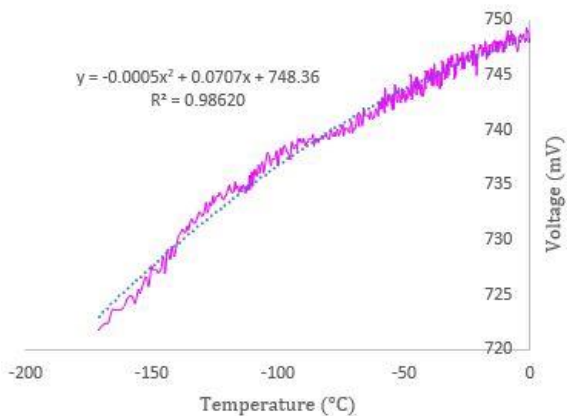
Gambar 26. Grafik hubungan Temperatur terhadap tegangan output suhu sensor Cu/Ni pada waktu deposisi 60 detik.



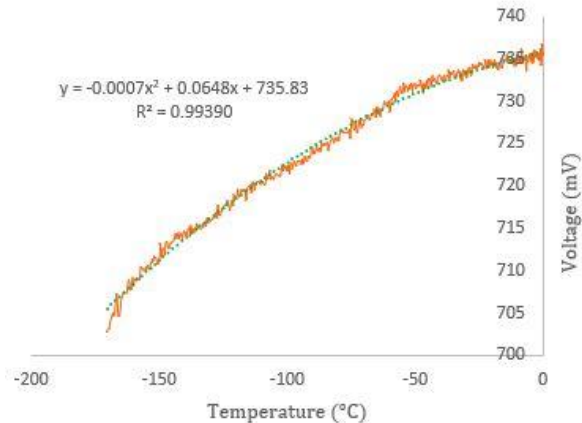
Gambar 27. Grafik hubungan Temperatur terhadap tegangan output suhu sensor Cu/Ni pada waktu deposisi 180 detik.



Gambar 28. Grafik hubungan Temperatur terhadap tegangan output suhu sensor Cu/Ni pada waktu deposisi 300 detik.



Gambar 29. Grafik hubungan Temperatur terhadap tegangan output suhu sensor Cu/Ni pada waktu deposisi 420 sekon.



Gambar 30. Grafik hubungan Temperatur terhadap tegangan output suhu sensor Cu/Ni pada waktu deposisi 540 sekon.

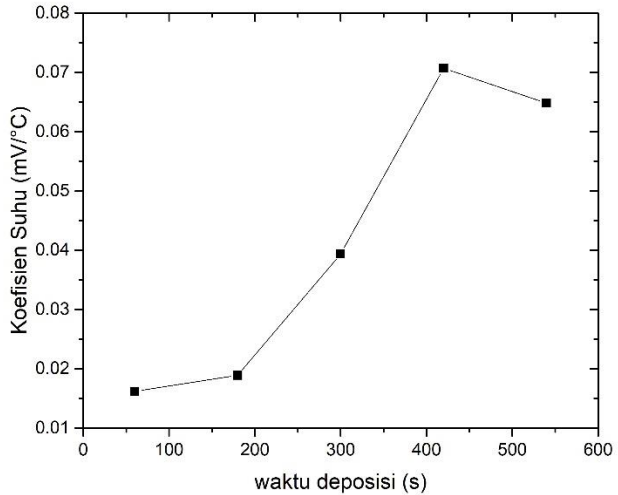
Secara umum, karakteristik dari kinerja beberapa sampel RTD dapat dilihat pada gambar 27 - 31. Kinerja sensor suhu rendah diperoleh dari nilai koefisien T pada persamaan polinomial orde dua pada grafik. Nilai koefisien T menunjukkan kepekaan sensor suhu rendah. Jika nilai koefisien T semakin besar, maka dapat dikatakan bahwa lapisan tipis Cu/Ni memiliki kepekaan yang lebih baik, sehingga kinerja sensor suhu rendah

akan lebih baik. Persamaan yang dihasilkan dari grafik masing-masing sampel dapat dilihat pada tabel 14.

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

Waktu Deposisi (s)	Persamaan $y = aT^2 + bT + c$	Koefisien Suhu (mV/ °C)
60	$-0.0009T^2 + 0.0162T + 747.53$	0.0162
180	$-0.0009 T^2 + 0.0189T + 790.92$	0.0189
300	$-0.0007 T^2 + 0.0394 T + 751.78$	0.0394
420	$-0.0005 T^2 + 0.0707 T + 748.36$	0.0707
540	$-0.0007 T^2 + 0.0648 T + 735.83$	0.0648

Dari Tabel 14 terlihat bahwa dari waktu deposisi 60 s sampai 540 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 28.



Gambar 31. Pengaruh waktu deposisi terhadap koefisien suhu


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 yang dideposisi pada waktu 420 s dengan nilai koefisien suhu sebesar 0,0707 mV/°C.



KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian terkait pengaruh waktu deposisi pada hasil *Electroplating* lapisan tipis Cu/Ni diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Telah dihasilkan lapisan tipis Cu/Ni yang diperoleh dari metode *Electroplating* dengan variasi waktu deposisi berbantuan medan magnet sejajar.
2. Waktu deposisi berpengaruh secara linear terhadap ketebalan lapisan yang terbentuk. Semakin lama waktu deposisi maka akan semakin tebal lapisan yang terbentuk.
3. Variasi waktu deposisi mampu meningkatkan resistivitas keping lapisan Cu/Ni. Dengan waktu deposisi 60s - 540s maka resistivitas kepingnya mampu meningkat dari sebelum dilakukan proses *Electroplating*.
4. Dalam *Electroplating* berbantuan medan magnet sejajar ini, waktu deposisi mampu memberikan parameter struktur




mikro seperti intensitas puncak difraksi, jarak bidang kristal, dan ukuran butir.

5. Kinerja lapisan sebagai elemen RTD yang paling baik ditunjukkan pada sampel pada waktu deposisi 420 s yang mempunyai nilai koefisien suhu sebesar $0,0707 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ dengan persamaan $V = -0.0005 T^2 + 0.0707 T + 748.36$.

DAFTAR PUSTAKA

- Afriany, Reny, Kusmono, and R. Soekrisno. 2012. "Pengaruh Konsentrasi Larutan Dan Waktu Pelapisan Nikel Pada Aluminium Terhadap Kekerasan." (November):374–78.
- Aguilera, L., Y. Leyet, Y. Romaguera-Barcelay, E. H. N. S. Thaines, A. J. Terezo, G. L. C. Souza, R. G. Freitas, R. R. Passos, and L. A. Pocrifka. 2019. "Influence of Electrodeposition Temperature in the Electrochemical Properties of Ni(OH)₂: An Experimental and Theoretical Study." *Thin Solid Films* 670:24–33.
- Agung, Rizki. 2019. "SINTESIS LAPISAN TIPIS Cu/Ni SEBAGAI Sensor Suhu Rendah Dengan Metode *Electroplating* Berbantuan Medan Magnet Sejajar Medan Listrik Pada Variasi Suhu Annealing." Universitas Ahmad Dahlan.
- An, Zhonglie, Liang He, Masaya Toda, and Go Yamamoto. 2015. "Microstructuring of Carbon Nanotubes-Nickel Nanocomposite." *Nanotechnology* 26(19):195601.
- Angel, R. J., U. Bismayer, and W. G. Marshall. 2004. "Local and Long-Range Order in Ferroelastic Lead Phosphate at High Pressure." *Acta Crystallographica Section B: Structural Science* 60(1):1–9.
- Aryanto, Didik, Naimatul Husniya, Toto Sudiro, and Erna Hastuti. 2017. "Perlakuan Panas Ganda Pada Fabrikasi Film Tipis AZO Nanokristal Dengan Teknik Spray: Studi XRD." *Metalurgi* 2:45–52.
- Athanassiou, E. K., R. N. Grass, and W. J. Stark. 2006. "Large-Scale Production of Carbon-Coated Copper Nanoparticles for Sensor Applications." *Nanotechnology* 17(6):1668–73.



Awangku Metosen, Awangku Nabil Syafiq Bin, Suh Cem Pang, and Suk Fun Chin. 2015. "Nanostructured Multilayer Composite Films of Manganese Dioxide/Nickel/Copper Sulfide Deposited on Polyethylene Terephthalate Supporting Substrate." *Journal of Nanomaterials* 2015.

Beiser, Arthur. 2003. *Concepts of Modern Physics*. Sixth.

Bevington, Philip R. and D. Keith Robinson. 2003. *Data Reduction and Error Analysis For The Physical Sciences*. New York: McGraw-Hill.

Blasdel, Nathaniel J., Evan K. Wujcik, Joan E. Carletta, Kye Shin Lee, and Chelsea N. Monty. 2015. "Fabric Nanocomposite Resistance Temperature Detector." *IEEE Sensors Journal* 15(1):300-306.


Bo, P. S. Baruselli, and R. J. Mapletoft. 2013. "Synchronization Techniques to Increase the Utilization Ofartificial Insemination in Beef and Dairy Cattle." *Animal Reproduction* 10(3):137-42.

Boylestad, Robert L. 2014. *Introductory Circuit Analysis*. Tenth Edit.

Callister, William D. and David G. Rethwisch. 2015. *Fundamentals of Materials Science and Engineering an Integrated Approach*. Fifth. United States America.

Chowdhury, Tasnuva. 2010. "Design of a Temperature Sensitive Voltage Regulator for AC Load Using RTD." 2(12):7896-7903.

Chuang, Ho-chiao, Hao-chih Su, and Jorge Sanchez. 2019. "Ultrasonics - Sonochemistry The Characteristics of Nickel Fi Lm Produced by Supercritical Carbon Dioxide *Electroplating* with Ultrasonic Agitation." *Ultrasonics -*



Sonochemistry 57(May):48–56.

Davidson, P. A. 2001. *An Introduction to Magnetohydrodynamics*. New York: Cambridge University Press.

Eckertova, Ludmila. 1977. *PHYSICS OF THIN FILMS*. 1st ed. New York and London: Plenum Press.

Fattahi, A. and M. E. Bahrololoom. 2014. “Investigating the Effect of Magnetic Field on Pulse Electrodeposition of Magnetic and Non-Magnetic Nanostructured Metals.” *Surface & Coatings Technology*.

Fraden, Jacob. 2003. *Handbook of Modern Sensors*. Third Edit. USA: Springer.

Fraden, Jacob. 2016. *Handbook of Modern Sensors*. Fifth Edit.


Fu, Teng, Meng Wang, Weimeng Cai, Yuming Cui, Fei Gao, Luming Peng, Wei Chen, and Weiping Ding. 2014. “Acid-Resistant Catalysis without Use of Noble Metals : Carbon Nitride with Underlying Nickel.”


Furqon, Gati Naufal and Sulistijono. 2015. “Pengaruh Densitas Arus Dan Waktu Kontak Efektif Elektrolit Gel Terhadap Ketebalan Dan Kekuatan Lekat Lapisan Krom Pada Baja Dengan Metode Elektroplating.” 4(1):134–39.


Garraud, Alexandra, Philippe Combette, and Alain Giani. 2013. “Thermal Stability of Pt/Cr and Pt/Cr₂O₃ Thin-Film Layers on a SiNx/Si Substrate for Thermal Sensor Applications.” *Thin Solid Films* 540:256–60.

Goswami, Tridib Kumar. 2010. “Role of Cryogenics in Food Processing and Preservation.” *International Journal of Food Engineering* 6(1).

Gu, Yuekun, Jie Liu, Shengxiang Qu, Yida Deng, Xiaopeng Han,

- 
- Wenbin Hu, and Cheng Zhong. 2017. "Electrodeposition of Alloys and Compounds from High-Temperature Molten Salts." *Journal of Alloys and Compounds* 690:228–38.
- Halliday, David, Robert Resnick, and Jearl Walker. 2010. *Fundamental of Physics*.
- Hirose, Eiichi, Yusuke Sakakibara, Yukihiro Igarashi, and Takashi Ishii. 2014. "Sapphire Screws and Strength Test on Them at Liquid Nitrogen Temperature." *Review of Scientific Instruments* 85(10):1–6.
- Khadatkar, R. M., S. Kumar, and S. C. Pattanayak. 2004. "Cryofreezing and Cryofreezer." *Cryogenics* 44(9):661–78.
- Khusnani, Azmi. 2019. "Sintesis Lapisan Tipis Cu/Ni Dengan Metode Elektroplating Berbantuan Medan Magnet Pada Variasi Kuat Medan Magnet." Ahmad Dahlan University.
- Kittel, Charles. 2005. *Introduction to Solid State Physics*. Vol. 8. Eighth Edi. United States America: John Wiley & Sons, Inc.
- Koza, Jakub Adam, Franziska Karnbach, Margitta Uhlemann, Jeffrey McCord, Christine Mickel, Annett Gebert, Stefan Baunack, and Ludwig Schultz. 2010. "Electrocrystallisation of CoFe Alloys under the Influence of External Homogeneous Magnetic Fields-Properties of Deposited Thin Films." *Electrochimica Acta* 55(3):819–31.
- Le, Nguyen Ngan, Thi Cam, Hue Phan, Anh Duy Le, Thi My, Dung Dang, and Mau Chien Dang. 2015. "Optimization of Copper *Electroplating* Process Applied for Microfabrication on Fl Exible Polyethylene Terephthalate Substrate."
- Leventis, N. and X. Gao. 2001. "Magnetohydrodynamic Electrochemistry in the Field of Nd-Fe-B Magnets. Theory, Experiment, and Application in Self-Powered Flow

- 
- Delivery Systems.” *Analytical Chemistry* 73(16):3981-92.
- Li, Qiao, Li Na Zhang, Xiao Ming Tao, and Xin Ding. 2017. “Review of Flexible Temperature Sensing Networks for Wearable Physiological Monitoring.” *Advanced Healthcare Materials* 6(12):1-23.
- Long, Qiong, Yun bo Zhong, Huai Wang, Tian xiang Zheng, Jun feng Zhou, and Zhong ming Ren. 2014. “Effects of Magnetic Fields on Fe-Si Composite Electrodeposition.” *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials* 21(12):1175-86.
- Maher, Anthony, Vijayalakshmi Velusamy, Daniel Riordan, and Joseph Walsh. 2014. “Modelling of Temperature Coefficient of Resistance of a Thin Film RTD Towards Exhaust Gas Measurement Applications.” 2-4.
- de Miguel-Soto, Veronica, Daniel Leandro, Aitor Lopez-Aldaba, Juan Jesus Beato-López, José Ignacio Pérez-Landazábal, Jean Louis Auguste, Raphael Jamier, Philippe Roy, and Manuel Lopez-Amo. 2017. “Study of Optical Fiber Sensors for Cryogenic Temperature Measurements.” *Sensors (Switzerland)* 17(12):1-12.
- Moh, Toifur, Julius Saputra, Azmi Khusnani, and Okimustava. 2020. “The Effect of Magnetic Field on the Performance of Cu/Ni As Low-Temperature Sensor.” *INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC & TECHNOLOGY RESEARCH* 9(01).
- Mordechay, Schlesinger and Paunovis Milan. 2006. *FUNDAMENTALS OF DEPOSITION SECOND EDITION*. 2nd end. United States America: John Wiley & Sons, Inc.
- Okamoto, Naoki, Feng Wang, and Tohru Watanabe. 2004. “Adhesion of Electrodeposited Copper , Nickel and Silver



Films on Copper ,.” 45(12):3330–33.

Poroch-seritan, Maria, Igor Cretescu, Corneliu Cojocaru, Sonia Amariei, and Cornel Suci. 2015. “Chemical Engineering Research and Design Experimental Design for Modelling and Multi-Response Optimization of Fe – Ni *Electroplating* Process.” *Chemical Engineering Research and Design* 96:138–49.

Prasetyo, Riyan Dwi, Moh Toifur, and Azmi Khusnani. 2018. “Hubungan Suhu Anil Dengan Perubahan Nilai Resistivitas Lapisan Tipis Cu / Ni Hasil Deposisi Menggunakan Teknik Elektroplating.” 25:597–604.

Raharjo, Pamuji Waskito and Moh Toifur. n.d. “Kawat Solenoida Sebagai Sensor Suhu Berbasis Resistor Temperature Detector Coils (RTD-C).” 166–69.

Saleh, A. Azhar. 2014. *Electroplating Teknik Pelapisan Logam Dengan Cara Listrik*. Bandung: Yrama Widya.

Santosa, Bambang and Syamsa Martijanti. 2007. “Pengaruh Parameter Proses Pelapisan Nikel Terhadap Ketebalan Lapisan.” 9:25–30.

Schmitz, Edinéia P. S., Sueli P. Quinaia, Jarem R. Garcia, and Camila K. De Andrade. 2016. “Influence of Commercial Organic Additives on the Nickel *Electroplating*.” 11:983–97.

Sen, S. K., T. K. Pan, and P. Ghosal. 2011. “An Improved Lead Wire Compensation Technique for Conventional Four Wire Resistance Temperature Detectors (RTDs).” *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* 44(5):842–46.

Seshan, Krishna. 2002. *Handbook of Thin Film Deposition*

Techniques Principles, Methods, Equipment and Applications, Second Editon.

- Smura, Catherine F., Dlnah R. Parker, Mohamed Zbiri, Mark R. Johnson, Zoltan A. Gal, and Simon J. Clarke. 2011. "High Spim Cobalt (II) Ions in Square Planar Coordination: Structure and Magnetism of the Oxysulfides Sr₂CoO₂Cu₂S₂, Ba₂CoO₂Cu₂S₂ and Their Solid Solution."
- Sutanto, Heri and Iis Nurhasanah. 2012. *Teknologi Lapisan Tipis & Aplikasinya*. Semarang: UPT UNDIP Press Semarang.
- Toifur, M., Y. Yuningsih, and A. Khusnani. 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, Moh., Nurmalia A, Okimustava, and Irma Sukarelawan. 2017. "PENGARUH WAKTU DEPOSISI PADA TEBAL LAPISAN , STRUKTUR MIKRO , Kajian Mengenai Material Tembaga (Cu) Dan Nikel (Ni) Menjadi Penting Karena Potensinya Yang Besar Untuk Digunakan Sebagai Bahan Sensor Suhu Jenis Suhu Rendah [1 , 2 , 3]. Aplikasi Materia." 07(02):33-43.
- Tschulik, Kristina, Jakub Adam Koza, Margitta Uhlemann, Annett Gebert, and Ludwig Schultz. 2009. "Effects of Well-Defined Magnetic Field Gradients on the Electrodeposition of Copper and Bismuth." *Electrochemistry Communications* 11(11):2241-44.
- Tuaweri, T. J., * E. M. Adigio, and P. P. Jombo. 2013. "A Study of Process Parameters for Zinc Electrodeposition from a Sulphate Bath." *International Journal of Engineering Science Invention ISSN (Online* 2(8):2319-6734.

- Vassimon, C. S. and A. M. Rothschild. 1990. "Compound 48/80-Induced Secretion of Histamine from Rat Peritoneal Mast Cells Depends on a Tryptase Controlled Step Also Leading to Chymase Activity." *Agents and Actions* 30(1-2):150-52.
- Wang, Yin Mei, Dan Dan Zhao, Yong Qing Zhao, Cai Ling Xu, and Hu Lin Li. 2012. "Effect of Electrodeposition Temperature on the Electrochemical Performance of a Ni(OH)₂ Electrode." *RSC Advances* 2(3):1074-82.
- Waskaas, Magne and Yuriy I. Kharkats. 1999. "Magnetoconvection Phenomena: A Mechanism for Influence of Magnetic Fields on Electrochemical Processes." *Journal of Physical Chemistry B* 103(23):4876-83.
- William D. Callister, Jr. 2001. *Fundamentals of Materials Science and Engineering*. Fifth. edited by W. Anderson. New York.
- Wu, Wangping, Noam Eliaz, and Eliezer Gileadi. 2015. "The Effects of PH and Temperature on Electrodeposition of Re-Ir-Ni Coatings from Aqueous Solutions." 162(1):20-26.
- Yu, Yundan, Zhenlun Song, Hongliang Ge, Guoying Wei, and Li Jiang. 2015. "The Effect of Magnetic Fields on the Electrodeposition of Cobalt." *Electrochimica Acta* 10:4812-19.
- Zhang, Ning, Weiping Ding, Wei Zhong, Dingyu Xing, and Youwei Du. 1997. "Tunnel-Type Giant Magnetoresistance in the Granular Perovskite." *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics* 56(13):8138-42.
- Zhou, Pengwei, Yunbo Zhong, Huai Wang, Lijun Fan, Licheng Dong, Fu Li, Qiong Long, and Tianxiang Zheng. 2013. "Electrochimica Acta Behavior of Fe / Nano-Si Particles Composite Electrodeposition with a Vertical Electrode



System in a Static Parallel Magnetic Field." 111:126–35.

Zhou, Pengwei, Yunbo Zhong, Huai Wang, Qiong Long, Fu Li, Zongqian Sun, Licheng Dong, and Lijun Fan. 2013. "Applied Surface Science Effects of Parallel Magnetic Field on Electrocodeposition Behavior of Fe / Nano-Si Particles Composite *Electroplating*." 282:624–31.

Zhou, Yuqin, Ichiro Matsubara, Woosuck Shin, Noriya Izu, and Norimitsu Murayama. 2004. "Effect of Grain Size on Electric Resistivity and Thermopower of (Ca_{2.6}Bi_{0.4})Co₄O₉ Thin Films." *Journal of Applied Physics* 95(2):625–28.


DAFTAR SIMBOL

T	Suhu	°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	°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 <i>probe</i>	M
T	Waktu	S
V	Tegangan	volt
I	Arus listrik	Ampere
ρ	Resistivitas	Ωcm
R_s	Resistivitas keping	Ω/Sq
d	Jarak antar bidang	Å
d_{hkl}	<i>Indeks</i> bidang <i>hkl</i>	Å
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	<i>Indeks</i> miller	




GLOSARIUM

RTD (resistance temperature detector)	=	jenis sensor suhu yang memanfaatkan sifat tahanan dari suatu bahan.
Magnetohydrodynamics	=	interaksi antara aliran fluida (yang bersifat elektrolit) dengan medan magnet.
Cu/Ni	=	logam Cu yang dilapisi oleh ni.
XRD (X-Ray Diffraction)	=	alat yang digunakan untuk melihat struktur kristal, dan fasa dengan cara mendifrasikan seberkas sinar-X
Logam transisi	=	unsur yang memiliki subkulit d yang tidak terisi penuh
Alloy	=	bahan campuran



		menjadi suatu senyawa
Deep etching	=	proses pengikisan logam dengan larutan kimia
Plating Bath	=	disebut sebagai bak plating atau tempat meletakkan larutan elektrolit
Elektroplating	=	metode pelapisan logam dengan sumber daya DC
Resistivitas	=	kemampuan suatu bahan untuk menghantarkan arus listrik, dan menggolongkan untuk bahan yang bersifat konduktor, semikonduktor dan isolator
Nitrogen cair (LN2)	=	nitrogen dalam bentuk keadaan cair dan memiliki suhu rendah -198 C.

- 
- Kristal = bahan zat padat yang memiliki keteraturan dalam penyusunannya.
- Preparasi = tahapan penyiapan dari bahan material.

BIOGRAFI



Julius Saputra lahir di Lahat, Sumatera Selatan pada 22 Juli 1995, menempuh pendidikan S1 di program studi pendidikan fisika Universitas Ahmad Dahlan Yogyakarta dan saat ini sedang menempuh pendidikan di program studi pascasarjana pendidikan fisika universitas ahmad dahlan yogyakarta. Memiliki keyakinan dengn bertakwa kepada Allah dan berakhlak mulia akan mendapatkan kesuksesan di dunia dam di akhirat, dengan ketekunan, motovasi tinggi untuk terus belajar dan berusaha mengasah kemampuan. Diharapkan menjadi seseorang yang cerdas dan berwawasan luas serta memberikan manfaat untuk orang banyak.



Moh. Toifur lahir di Blitar, 18 Juli 1964, menempuh pendidikan S1, S2, S3 di Universitas Gadjah Mada pada Jurusan Fisika, saat ini bekerja sebagai Dosen PNS di Universitas Ahmad Dahlan dengan bidang keahlian Fisika Material (Lapisan Tipis)



Drs. Ishafit, M.Si., lahir di Situbondo Jawa Timur, dosen di Program Studi Pendidikan Fisika Universitas Ahmad Dahlan Perguruan Tinggi Muhammadiyah Yogyakarta. Alumni SMAN 1 Situbondo. Pendidikan Sarjana (S1) bidang Pendidikan Fisika diselesaikan di Universitas Ahmad Dahlan (dahulu IKIP Muhammadiyah Yogyakarta) tahun 1990. Pendidikan Pascasarjana (S2) bidang Fisika ditempuh di Universitas Gadjah Mada Yogyakarta tahun 2000



Okimustava lahir di Banyumas, 27 Oktober 1985, menempuh pendidikan S1, S2, di universitas Ahmad Dahlan pada Jurusan Fisika. Saat ini bekerja sebagai dosen di Universitas Ahmad Dahlan.