



UNIVERSITAS INDONESIA

**PROSES ELEKTRODEPOSISI DAN KARAKTERISASI PADUAN
Ni-Cu DI ATAS ALUMINIUM DENGAN BERBAGAI VARIASI
RAPAT ARUS**

DISERTASI

**CAHAYA ROSYIDAN
2006564975**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM DOKTOR ILMU BAHAN-BAHAN
DEPOK
2024**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PROSES ELEKTRODEPOSISI DAN KARAKTERISASI PADUAN
Ni-Cu DI ATAS ALUMINIUM DENGAN BERBAGAI VARIASI
RAPAT ARUS**

DISERTASI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Doktor

**CAHAYA ROSYIDAN
2006564975**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM DOKTOR ILMU BAHAN-BAHAN
DEPOK
JANUARI 2024**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Disertasi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan benar**

Nama : Cahaya Rosyidan

NPM : 2006564975

Tanda Tangan :

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Cahaya Rosyidan', is written over the 'Tanda Tangan' label.

Tanggal : 9 Januari 2024

HALAMAN PENGESAHAN

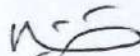
Disertasi ini diajukan oleh:

Nama Mahasiswa : Cahaya Rosyidan
NPM : 2006564975
Program Studi : Ilmu Bahan-Bahan
Judul Penelitian : **PROSES ELEKTRODEPOSISI DAN KARAKTERISASI
PADUAN Ni-Cu DI ATAS ALUMINIUM DENGAN
BERBAGAI VARIASI RAPAT ARUS**

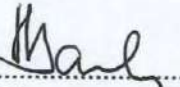
Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Doktor pada Program Studi Ilmu Bahan-Bahan, Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Promotor : Dr. Budhy Kurniawan, M.Si.

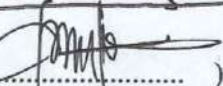
(.....)

Kopromotor : Prof. Dr. Bambang Soegijono, M.Si.

(.....)

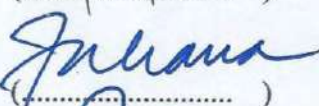
Tim Penguji : Dr. Anawati, M.Sc.

(Ketua)

(.....)

Prof. Dede Djuhana, Ph.D.

(Anggota)

(.....)

Prof. Dr. Setia Budi, M.Sc.

(Anggota)

(.....)

Dr. Ferry Budhi Susetyo, M.T., M.Si.(Anggota)

(.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 9 Januari 2024

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, karena atas berkah dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan disertasi ini. Begitu banyak bantuan dan bimbingan berbagai pihak dari awal perkuliahan sampai dengan penyelesaian disertasi ini. Oleh karena itu saya mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Dr. Budhy Kurniawan, M.Si. selaku Promotor yang telah menyediakan begitu banyak waktu dan tenaganya untuk membimbing saya dalam penyelesaian disertasi ini.
2. Prof. Dr. Bambang Soegijono, M.Si. selaku Kopromotor yang telah menyediakan begitu banyak waktu dan tenaganya untuk membimbing saya dalam penyelesaian disertasi ini.
3. Dr. Anawati, M.Sc., Prof. Dede Djuhana, Ph.D., Prof. Dr. Setia Budi, M.Sc., dan Dr. Ferry Budhi Susetyo, M.T., M.Si. selaku Dewan Penguji yang telah banyak memberikan masukan untuk disertasi saya dari mulai sidang proposal riset sampai dengan ujian hasil riset.
4. Laboratorium ESR, Lab AFR Universitas Trisakti, CMPFA, PT CMM, BRIN yang telah membantu dalam perolehan data.
5. Staf tata usaha Prodi S3 Ilmu Bahan-Bahan dan PAF FMIPA UI yang telah banyak membantu administrasi sidang maupun karakterisasi.
6. Orang tua, mertua, istri dan anak-anak saya yang terus mendorong untuk segera menyelesaikan studi S3 di Ilmu Bahan-Bahan.
7. Mas Dicky, Pak Zulkarnain, Pak Yudha, Bu Iis, Mas Yoan, Mas Juan, Bu Sisca, Mbak Indah, Pak Gede dan penghuni Lab ESR.
8. Rekan-rekan sejawat di Prodi Teknik Perminyakan Trisakti.
9. FTKE Universitas Trisakti yang telah memberikan bantuan beasiswa pembiayaan sampai akhir studi.

Akhir kata Semoga Allah SWT membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga disertasi maupun publikasi yang telah saya buat dapat memberikan manfaat bagi bangsa dan negara.

Depok,

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR
UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Cahaya Rosyidan

NPM : 2006564975

Program Studi: Ilmu Bahan-Bahan

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Jenis karya : Disertasi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**PROSES ELEKTRODEPOSISI DAN KARAKTERISASI PADUAN Ni-Cu DI
ATAS ALUMINIUM DENGAN BERBAGAI VARIASI RAPAT ARUS**

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta. Demikian persyaratan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada Tanggal : 9 Januari 2024

Yang menyatakan,



(Cahaya Rosyidan)

ABSTRAK

Nama Mahasiswa: Cahaya Rosyidan

Program Studi : Ilmu Bahan-Bahan

Judul Penelitian : PROSES ELEKTRODEPOSISI DAN KARAKTERISASI PADUAN Ni-Cu DI ATAS ALUMINIUM DENGAN BERBAGAI VARIASI RAPAT ARUS

Promotor : Dr. Budhy Kurniawan, M.Si.

Kopromotor : Prof. Dr. Bambang Soegijono, M.Si.

Penelitian paduan nikel (Ni) dan tembaga (Cu) sangat luas penerapannya dalam bidang keteknikan karena mempunyai beberapa keunggulan seperti dalam bidang mekanik, magnetik dan elektrokimia. Ni dan Cu keduanya mempunyai struktur kristal *face center cubic* (FCC), mempunyai elektronegatifitas dan jari-jari atom yang hampir sama. Dengan melakukan pelapisan Ni-Cu di atas Al diharapkan akan mendapatkan manfaat sifat Ni-Cu. Hasil dari elektrodeposisi diharapkan dapat digunakan untuk *actuator arm* yang diharapkan memiliki kekerasan yang cukup keras, mempunyai sifat magnet yang cukup dan ketahanan korosi yang baik. Tujuan dari penelitian ini adalah membuat lapisan Ni-Cu dengan metode proses elektrodeposisi bersama di atas substrat Al dengan memvariasi rapat arus kemudian mengetahui karakterisasi kristalografinya, morfologi, kekasaran, kekerasan, sifat kemagnetannya, dan sifat elektrokimia. Berbagai teknik seperti *x-ray diffractometer* (XRD), *scanning electron microscope* (SEM), *energy dispersive x-ray spectroscopy* (EDS), pengukuran ketebalan dengan *cross section*, analisis kekasaran dengan *image-J*, pengukuran kekasaran dengan Surtronic-25, uji kekerasan, pengukuran sifat magnet dengan *vibrating sample measurement* (VSM) dan potensiodinamik polarisasi digunakan untuk menentukan karakteristik lapisan hasil elektrodeposisi. Metode penelitian yang akan dilakukan dengan metode elektrodeposisi Ni-Cu di atas substrat Al dengan variasi rapat arus 15, 20, 30, 40, 50 dan 100 mA/cm². Akibat pengaruh rapat arus kadar Ni semakin besar dalam paduan Ni-Cu. Jari-jari atom Ni lebih kecil daripada atom Cu, akibatnya dengan kenaikan Ni konstanta kisi paduan mengecil dan d_{111} mengecil. Hal ini tampak pada pergeseran puncak bidang (111) ke arah kanan. Semakin tinggi rapat arus menyebabkan laju deposisi semakin meningkat disebabkan oleh pergerakan ion dari anoda menuju katoda lebih cepat sehingga akan menghasilkan lapisan yang lebih tebal (32,73-70,12 μm) dalam jangka waktu yang sama. Semakin tebal lapisan dan semakin kecil ukuran butir (6,026 - 1,728 μm) menyebabkan kekerasan meningkat. Nilai kekerasan berada pada interval 202 sampai dengan 424,6 HV pada interval rapat arus dari 15 mA/cm² sampai dengan 100 mA/cm². Semakin tinggi rapat arus maka akan semakin tinggi komposisi Ni yang mengendap di katoda. Komposisi Ni yang banyak mengendap di katoda akan menghasilkan nilai Mr dan Ms tertinggi diperoleh pada sampel Ni-Cu 100 dengan nilai 0,257 emu/g dan 1,084 emu/g secara berurutan. Paduan Ni-Cu 15 menghasilkan potensial korosi terendah sebesar -0,245 (V vs Ag/AgCl). Dari analisis reaksi evolusi hidrogen sampel Ni-Cu 100 menghasilkan potensial lebih (overpotensial) paling kecil -0,142 V dan *exchange current density* paling besar 1726,40 (A/cm²).

Kata Kunci:

elektrodeposisi, korosi, paduan Ni-Cu, sifat magnet, reaksi evolusi hidrogen

ABSTRACT

Name : Cahaya Rosyidan
Study Program : Ilmu Bahan-Bahan
Title : ELECTRODEPOSITION AND CHARACTERIZATION OF Ni-Cu ALLOYS ONTO ALUMINUM AT VARIOUS CURRENT DENSITY
Promoter : Dr. Budhy Kurniawan, M.Si.
Co-Promoter : Prof. Dr. Bambang Soegijono, M.Si.

Research on nickel (Ni) and copper (Cu) alloys is extensive in its application in engineering because it has several advantages, such as in the mechanical, magnetic and electrochemical fields. Ni and Cu have a Face Centre Cubic (FCC) crystal structure, electronegativity, and almost the same atomic radius. By doing Ni-Cu coating on Al, it is expected to get the benefits of Ni-Cu properties. The electrodeposition results are expected to be used for the actuator arm, which is expected to have a reasonably hard hardness, has enough magnetic properties and good corrosion resistance. This research aims to make a Ni-Cu layer by a joint electrodeposition process method on an Al substrate by varying the current density and then determining its crystallographic characterization, morphology, roughness, hardness, magnetic properties, and electrochemical properties. Various techniques such as x-ray diffractometer (XRD), scanning electron microscope (SEM), energy dispersive x-ray spectroscopy (EDS), thickness measurement with cross-section, roughness analysis with image-J, roughness measurement with Surtronic-25, hardness test, magnetic properties measurement with vibrating sample measurement (VSM) and potentiodynamic polarization are used to determine the characteristics of the electrodeposited layer. The research method will be carried out using the electrodeposition method of Ni-Cu on an Al substrate with a variation of current density of 15, 20, 30, 40, 50, and 100 mA/cm². As a result of the influence of current density, Ni content is getting bigger in Ni-Cu alloys. The radius of Ni atoms is smaller than that of Cu atoms; consequently, with the increase of Ni, the lattice constant of the alloy decreases, and d_{111} decreases. This can be seen in the shift of the peak of the (111) plane to the right. The higher current density causes the deposition rate to increase due to the movement of ions from the anode to the cathode faster so that it will produce a thicker layer (32.73-70.12 μm) in the same period. The thicker the layer and the smaller the grain size (6.026-1.728 μm) causes the hardness to increase. The hardness value is 202 to 424.6 HV at the current density interval from 15 mA/cm² to 100 mA/cm². The higher the current density, the higher the composition of Ni deposited on the cathode. The composition of Ni that decides on the cathode will produce the highest Mr and Ms values obtained in the Ni-Cu 100 sample with values of 0.257 emu/g and 1.084 emu/g, respectively. Ni-Cu 15 alloy produced the lowest corrosion potential of -0.245 (V vs Ag/AgCl). From the hydrogen evolution reaction analysis, the Ni-Cu 100 sample produced the smallest overpotential of -0.142 V and the most significant exchange current density of 1726.40 (A/cm²).

Keywords:

electrodeposition, corrosion, Ni-Cu alloy, magnetic properties, hydrogen evolution reaction

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
1. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Ruang Lingkup Permasalahan	4
1.3. Tujuan Penelitian	5
1.4. Hipotesis	5
1.5. Batasan Penelitian	5
1.6. Manfaat Penelitian	6
1.7. Keterbaruan Penelitian	6
1.8. <i>State of the art</i> penelitian	6
2. TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1 Aluminium (Al)	9
2.2 Tembaga (Cu)	11
2.3 Nikel (Ni)	14
2.4 Elektrodeposisi	16
2.5 Pelapisan Ni-Cu <i>Alloy</i>	17
3. METODE PENELITIAN	27
3.1. Langkah Penelitian	27
3.2. Bahan Penelitian	27
3.3. Preparasi Sampel	28
3.4. Pemberian Nama Sampel	29
3.5. Diagram Alir Penelitian	30
3.6. Proses Elektrodeposisi	31
3.6.1 Menghitung Laju Elektrodeposisi	31
3.6.2 Menghitung Efisiensi Arus Proses Elektrodeposisi	31
3.7. Analisis <i>X-Ray Diffractometer</i> (XRD)	32
3.8. Analisis <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM) dan <i>Energy Dispersive Spectrometry</i> (EDS)	34
3.9. Analisis Kekasaran	35

3.10.	Analisis <i>Vibrating Sample Magnetometer</i> (VSM)	36
3.11.	Analisis Sifat Korosi Menggunakan Metode Polarisasi Potensiodinamik ...	37
3.12.	Analisis <i>Microhardness</i>	38
4.	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	40
4.1.	Analisis XRF	40
4.2.	Pembuatan Lapisan Ni-Cu dengan Variasi Rapat Arus.....	41
4.1.1.	Pengaruh Waktu Terhadap Tegangan.....	41
4.1.2.	Efisiensi Arus dan Laju Deposisi terhadap Pengaruh Variasi Rapat Arus.....	43
4.1.3.	Observasi Visual.....	44
4.1.4.	Hasil Analisis XRD	45
4.1.5.	Hasil Analisis Morfologi, EDS dan <i>Cross Section</i> terhadap Variasi Rapat Arus.....	52
4.1.6.	Hasil Analisis Kekasaran Terhadap Variasi Rapat Arus	63
4.1.7.	Hasil Analisis Kekerasan Terhadap Variasi Rapat Arus	64
4.1.8.	Hasil Analisis Sifat Magnet Terhadap Variasi Rapat Arus	67
4.1.9.	Hasil Analisis Korosi.....	71
5.	KESIMPULAN	77
	DAFTAR REFERENSI.....	79
	LAMPIRAN	85

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Karakteristik Al	10
Gambar 2.2 Diagram Pourbaix Al	10
Gambar 2.3 Kekerasan Vickers (a) Tanpa Perlakuan, (b) 400 °C dan (c) 600 °C	11
Gambar 2.4 Kurva Potensiodinamik Ni/Cu.....	12
Gambar 2.5 Diagram Pourbaix Cu pada larutan SO_4	13
Gambar 2.6 Diagram Pourbaix Cu pada larutan NaCl	13
Gambar 2.7 Kurva LSV dari berbagai logam.....	14
Gambar 2.8 Diagram Pourbaix Ni.....	15
Gambar 2.9 Diagram fasa Ni-Cu.....	18
Gambar 2.10 Atomik persen Ni-Cu dari beberapa larutan dengan variasi perbandingan molar dengan tegangan -0.9 V.....	19
Gambar 2.11 Bentuk morfologi paduan Ni-Cu dari SEM.....	19
Gambar 2.12 Bidang kristal yang terbentuk pada paduan Ni-Cu.....	21
Gambar 2.13 Hubungan antara ketebalan dengan variasi rapat arus.....	21
Gambar 2.14 Kekerasan mikro variasi aditif Al <i>dioxide</i>	22
Gambar 2.15 Profil kekasaran permukaan Cu-Ni-P di atas Al	22
Gambar 2.16 Kekasaran meningkat seiring bertambahnya tegangan.....	23
Gambar 2.17 Variasi efisiensi arus katoda dengan variasi rapat arus dari larutan A, B dan C.....	24
Gambar 2.18 Kurva histerisis	24
Gambar 2.19 Kurva LSV analisis HER.....	26
Gambar 3.1 Timbangan digital.....	28
Gambar 3.2 Proses elektrodposisi Ni-Cu dengan Ni dan Cu sebagai anoda dan Al sebagai katoda.....	29
Gambar 3.3 Alur penelitian elektrodposisi Ni-Cu	30
Gambar 3.4 Skematik XRD	32
Gambar 3.5 Mekanisme difraksi sinar-x	33
Gambar 3.6 Alat SEM PT CMM.....	35
Gambar 3.7 Alat <i>Roughness Tester Surtronic-25</i>	36
Gambar 3.8 VSM.....	37
Gambar 3.9 Macam-macam teknik pengujian kekasaran	39
Gambar 4.1 Proses peralihan pembentukan Ni-Cu diatas Al sebagai fungsi dari tegangan.	42
Gambar 4.2 a) Pengaruh rapat arus terhadap efisiensi arus, dan b) Pengaruh rapat arus terhadap laju deposisi	43
Gambar 4.3 Citra pengamatan visual permukaan sampel Ni-Cu untuk rapat arus a) 15, b) 20, c) 30, d) 40, e) 50 dan f) 100 mA/cm ²	45
Gambar 4.4 Pola difraksi XRD Ni-Cu terhadap variasi rapat arus	46
Gambar 4.5 Pengaruh variasi rapat arus terhadap bidang-bidang XRD.....	47
Gambar 4.6 Hubungan <i>crystalline size</i> dan <i>lattice strain</i> terhadap variasi rapat arus, menunjukkan semakin tinggi <i>crystalline size</i> semakin kecil <i>lattice strain</i> ..	49
Gambar 4.7 Grafik analisis <i>Pole figure</i> rekonstruksi hasil rietveld perangkat lunak MAUD menunjukkan sampel paduan Ni-Cu memiliki orientasi kristal yang dominan pada bidang (111).	51
Gambar 4.8 Citra morfologi SEM sampel paduan Ni-Cu (kiri) dan histogram distribusi ukuran butir (kanan).	54

Gambar 4.9 Citra EDS <i>mapping</i> sampel paduan A. Ni-Cu 15, B. Ni-Cu 20, C. Ni-Cu 30, D. Ni-Cu 40, E. Ni-Cu 50 dan F. Ni-Cu 100.	57
Gambar 4.10 Analisis kekasaran permukaan sampel a) Ni-Cu 15, b) Ni-Cu 20, c) Ni-Cu 30, d) Ni-Cu 40, e) Ni-Cu 50, f) Ni-Cu 100 pada citra SEM 2D, grafik 3D, dan grafik <i>gray value</i> terhadap <i>distance</i> (kiri-kanan).	61
Gambar 4.11 Pengaruh variasi rapat arus menghasilkan lapisan yang semakin tebal dilihat dari tampang lintang tiap sampel A) Ni-Cu 15, B) Ni-Cu 20, C) Ni-Cu 30, D) Ni-Cu 40, E) Ni-Cu 50, dan F) Ni-Cu 100 mA/cm ²	62
Gambar 4.12 Akibat pengaruh rapat arus menghasilkan ketebalan dan kekasaran semakin meningkat.	64
Gambar 4.13 Hasil perhitungan kekerasan Ni-Cu terhadap pengaruh variasi rapat arus.	65
Gambar 4.14 Hubungan antara ukuran grain terhadap kekerasan.	67
Gambar 4.15 Kurva histerisis M vs H pada pengukuran 10 ⁴ – 10 ⁻⁴ (Oe) sampel paduan (a) Ni-Cu 15, (b) Ni-Cu 20, (c) Ni-Cu 30, (d) Ni-Cu 40, (e) Ni-Cu 50, (f) Ni-Cu 100 dan (g) kurva histerisis M vs H variasi N-Cu 15- Ni-Cu 100.	68
Gambar 4.16 Hubungan berat persen Ni terhadap Ms	69
Gambar 4.17 <i>Easy axis</i> pada sampel Ni-Cu 100	70
Gambar 4.18 Pengaruh rapat arus menyebabkan semakin kecil volume maka semakin besar nilai Ms.	70
Gambar 4.19 Pengaruh rapat arus terhadap pengukuran potensiodinamik polarisasi paduan Ni-Cu, dan $A\ell$	72
Gambar 4.20 Kurva polarisasi katodik Ni-Cu 20, Ni-Cu 40 dan Ni-Cu 100	74
Gambar 4.21 <i>Tafel plot</i> Ni-Cu 20, Ni-Cu 40 dan Ni-Cu 100	75
Gambar 4.22 Hubungan antara overpotensial (V) vs kekasaran	76

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 <i>State of the art</i> pelapisan Ni-Cu dengan metode Elektrodeposisi	7
Tabel 2.1 Karakteristik $A\ell$	9
Tabel 2.2 Variasi kekerasan menggunakan variasi temperatur <i>annealing</i>	14
Tabel 2.3 Analisis korosi dengan Tafel	15
Tabel 2.4 Konstanta bahan feromagnetik	16
Tabel 2.5 Komposisi larutan	18
Tabel 2.6 Parameter <i>latice</i> , ukuran kristal dan komposisi lapisan Ni-Cu	20
Tabel 2.7 Parameter magnetik paduan Ni-Cu	25
Tabel 2.8 Analisis magnetik NiCu/Cu.....	25
Tabel 2.9 Analisis polarisasi potensiodinamik paduan Ni-Cu dalam larutan 3,5% NaCl.	26
Tabel 3.1 Penyederhanaan nama sampel	29
Tabel 3.2 Ketebalan lapisan secara teoritis	31
Tabel 4.1 Hasil XRF $A\ell$	40
Tabel 4.2 Hasil XRF Ni	41
Tabel 4.3 Hasil XRF Cu	41
Tabel 4.4 Hasil Refinement XRD Ni-Cu variasi rapat arus	48
Tabel 4.5 Koefisien tekstur Ni-Cu.....	49
Tabel 4.6 Hasil perhitungan ukuran grain rata-rata	55
Tabel 4.7 Komposisi kimia Ni-Cu (%wt).....	56
Tabel 4.8 Nilai kekasaran rata-rata paduan Ni-Cu dari SEM.....	58
Tabel 4.9 Hasil perhitungan kekasaran Ni-Cu sebagai fungsi rapat arus.....	64
Tabel 4.10 Perhitungan nilai kekerasan $A\ell$	65
Tabel 4.11 Hasil perhitungan kurva histerisis Ni-Cu dengan VSM	69
Tabel 4.12 Analisis potensiodinamik polarisasi paduan Ni-Cu, dan $A\ell$	73
Tabel 4.13 Parameter kinetik HER paduan Ni-Cu 20, Ni-Cu 40 dan Ni-Cu 100	75

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Hasil EDS Sampel Ni-Cu 15.....	85
Lampiran 2. Hasil EDS Sampel Ni-Cu 20.....	85
Lampiran 3. Hasil EDS Sampel Ni-Cu 30.....	85
Lampiran 4. Hasil EDS Sampel Ni-Cu 40.....	86
Lampiran 5. Hasil EDS Sampel Ni-Cu 50.....	86
Lampiran 6. Hasil EDS Sampel Ni-Cu 100.....	86

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Penelitian paduan nikel (Ni) dan tembaga (Cu) sangat luas penerapannya dalam bidang keteknikan karena mempunyai beberapa keunggulan seperti dalam bidang mekanik, magnetik dan elektrokimia. Ni dan Cu keduanya mempunyai struktur kristal *face center cubic* (FCC), mempunyai elektronegatifitas dan jari-jari atom yang hampir sama (Guisbiers *et al.* 2014; Mae 2016). Dalam dunia industri paduan Ni-Cu dikenal dengan sebutan monel (70Ni-30Cu) yang sangat cocok di aplikasikan pada bidang kelautan, pelapisan koin logam, konstruksi otomotif, sensor magnetik, dan *actuator* karena sifat feromagnetisnya (Firdouz *et al.* 2022). Namun, karena biaya pembuatan monel cor sangat tinggi sehingga tidak selalu layak untuk digunakan sebagai (*material bulk*). Beberapa sifat Ni-Cu dalam bentuk pejal (*bulk*) dapat berbeda dengan Ni-Cu dalam bentuk lapisan. Lapisan paduan Ni-Cu pada *Aℓ* diketahui memiliki banyak sekali potensi untuk menggantikan monel sebagai *material bulk*. Modifikasi permukaan *Aℓ* dan paduannya dapat menawarkan berbagai sifat mekanik, sifat fisika, sifat listrik dan dekoratif (Ul-Hamid *et al.* 2012). Saat ini, peningkatan sifat permukaan bahan telah memerankan peran yang penting dalam meningkatkan efisiensinya dan menambah nilai lebih (Goyal *et al.* 2018).

Beberapa cara dikembangkan untuk melapisi logam lain dengan Ni-Cu. Diantara teknik pelapisan itu adalah *chemical vapor deposition* (CVD), *physical vapor deposition* (PVD) dan elektrodposisi. Jika dilihat dari beberapa teknik pelapisan logam, teknik pelapisan elektrodposisi yang paling tepat digunakan. Teknik elektrodposisi ini bergantung pada komposisi elektrolit, pH, temperatur, rapat arus dan tegangan sehingga dapat dianalisis struktur, sifat mekanik dan sifat fisis lainnya (Nikhil *et al.* 2021).

Teknik elektrodposisi merupakan proses pelapis paduan Ni-Cu pada *Aℓ* yang hemat biaya, terukur dan mudah untuk dikontrol. Ni dan Cu digunakan sebagai anoda dan *Aℓ* sebagai katoda, pada saat proses elektrodposisi berlangsung terjadi perpindahan ion Ni^{2+} dan Cu^{2+} dari anoda menuju katoda. Ion Ni^{2+} dan Cu^{2+} terlepas dari anoda karena proses oksidasi kemudian larut dalam larutan CuSO_4 dan NiSO_4

dan bergerak dari larutan menuju katoda mengalami proses reduksi. Sesuai dengan hukum faraday maka massa yang mengendap sebanding dengan arus yang digunakan. Untuk mendapatkan karakteristik lapisan tertentu, umumnya peneliti melakukan variasi seperti rapat arus (Pingale, Belgamwar, and Rathore 2020). Melakukan variasi rapat arus sebanding dengan mengatur perpindahan ion Ni^{2+} dan Cu^{2+} dari anoda menuju katoda. Sehingga dapat diperoleh struktur kristalnya, morfologi permukaan, komposisi, kekasaran, kekerasan, sifat magnetik dan elektrokimia dari paduan Ni-Cu.

Namun, dalam pembuatan lapisan Ni-Cu bersama tidak mudah dikarenakan perbedaan potensial reduksi antara Ni dan Cu. Seperti diketahui Ni mempunyai potensial reduksi ($-0,25 \text{ V vs. SHE}$) dan untuk Cu ($+0,34 \text{ V vs. SHE}$) (Bellige, Elias, and C. Hegde 2016). Sehingga pengaturan konsentrasi Cu dan Ni sangat penting (Ganesan *et al.* 2021). Selain itu, sebuah agen pengompleks diperlukan untuk mengurangi celah perbedaan potensial antara Ni dan Cu. Beberapa penelitian melaporkan penggunaan pirofosfat, sitrat, asetat, sulfamat dan glisin (Silaimani, Vivekanandan, and Veeramani 2015). Dari sekian banyak agen pengompleks yang digunakan, sitrat paling sering digunakan karena toksinitas dan biaya yang rendah, dan juga sebagai penyangga (T. Wang and Chen 2015). Agen pengompleks bekerja dengan mengubah ion-ion sederhana dari logam yang lebih mulia menjadi ion kompleks dengan potensial yang lebih rendah sehingga potensial keduanya bergeser ke nilai yang lebih negatif dan dapat berinteraksi dengan larutan elektrolit agar tidak terjadi pengendapan (Mkawi *et al.* 2014).

Ni dan Cu jika dilakukan proses elektrodposisi bersama terhadap variasi rapat arus akan berpengaruh terhadap sifat fisisnya. Pada saat proses elektrodposisi diawali dengan terbentuknya nukleasi pada keadaan metastabil, kemudian rapat arus cenderung konstan yang menandakan perubahan ketebalan lapisan, dan bentuk morfologi (Fadillah et al. 2019). Penelitian yang dilakukan oleh Ganesan *et al.* (2021) dengan menggunakan rapat arus sebesar 20 mA/cm^2 , temperatur 50°C dan putaran 300 rpm menunjukkan bahwa pergerakan ion Ni^{2+} dan Cu^{2+} dari anoda menuju katoda diatur oleh difusi, dimana ion yang mengendap di katoda sebanding dengan arus dan konsentrasi dari larutan yang digunakan melalui proses elektrodposisi (Ganesan *et al.* 2021). Lee dan Chung (2020) melakukan penelitian pelapisan Ni-Cu pada larutan

$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ dengan mengatur variasi perbandingan massa molar Ni:Cu (Lee and Chung 2020). Pada penelitian ini diperoleh gradasi warna yang cukup mencolok dimana semakin banyak atom Cu dilarutan menghasilkan warna yang lebih gelap, sementara itu semakin banyak atom Ni dilarutan menghasilkan warna yang lebih terang. Deo *et.al* (2020) melakukan elektrodposisi Ni-Cu di atas substrat lempeng baja dengan variasi rapat arus 10, 20 dan 30 mA/cm^2 menghasilkan efisiensi arus semakin meningkat (Deo *et al.* 2020). Pingale *et. al* (2020) melakukan penelitian pelapisan Cu-Ni/Gr di atas substrat *stainless steel* pada rapat arus 60 mA/cm^2 selama 60 menit, semakin kecil *full width at half maximum* (FWHM) maka semakin besar ukuran kristal dan berbanding terbalik dengan *lattice strain* yang semakin kecil yang diperoleh dengan cara elektrodposisi (Pingale, Belgamwar, and Rathore 2020).

Wang *et. al* (2020) melakukan penelitian paduan Ni-Cu di atas Cu dengan cara elektrodposisi menghasilkan fasa tunggal, struktur kristal FCC dan bidang kristal yang dominan adalah bidang (111). Sudut yang dibentuk oleh atom Cu adalah $2\theta = 43,3^\circ$ dan atom Ni adalah $2\theta = 44,5^\circ$ pada bidang (111), semakin besar komposisi Ni maka sudut akan bergeser ke sudut yang lebih besar (C. Wang *et al.* 2020). Penelitian yang dilakukan oleh Alizadeh dan Safaei (2018) dengan paduan Ni-Cu/ Al_2O_3 di atas substrat baja pada rapat arus 2 mA/cm^2 selama 60 menit diperoleh morfologi permukaan paduan Ni-Cu memiliki struktur nodular dan lebih kompak daripada lapisan Ni murni melalui proses elektrodposisi (Alizadeh and Safaei 2018). Geramipour *et.al* (2021) melakukan penelitian elektrodposisi Ni-Cu di atas pelat baja dengan arus 20 mA/cm^2 , hasil EDS menunjukkan komposisi Ni (wt%) sebesar 71,57 dan Cu (wt%) sebesar 28,43, selain itu distribusi Ni dan Cu terdistribusi secara merata di permukaan yang diamati pada EDS *mapping* (Geramipour, Mousavi Khoei, and Shooshtari Gughtapeh 2021). Semakin banyak komposisi Ni (wt%) di larutan maka akan berbanding lurus dengan magnetik saturasi (Ms) (Pellicer et al. 2010). Mahallawy *et.al* (2011) melakukan elektrodposisi dengan variasi rapat arus dari 16 sampai 31 mA/cm^2 , semakin tinggi rapat arus menunjukkan permukaan semakin kasar yang berbanding lurus dengan ketebalan (Mahallawy, Shoeib, and Abouelenain 2011). Pingale *et. al* (2020) melakukan elektrodposisi Cu-Ni/Gr di atas pelat *stainless steel* dengan variasi rapat arus 20, 40, 60 dan 80 mA/cm^2 menghasilkan

ukuran grain semakin kecil, ukuran grain semakin kecil menghasilkan kekerasan yang semakin keras (Pingale, Belgamwar, and Rathore 2020). Karunakaran dan Vadivu (2019) melakukan penelitian elektrodeposisi Ni-Cu-P-W pada substrat Al dengan rapat arus 40 mA/cm^2 selama 30 menit pada tegangan 3,5 V memperoleh nilai saturasi magnet (Ms) sebesar 0,0004 emu/g (Karunakaran and Pugazh Vadivu 2019). Albasre dan Hussin (2021) menguji korosi paduan Ni-Cu-P di atas substrat Al dengan larutan 3,5% NaCl diperoleh tegangan korosi -690,0 mV (vs SCE) dan arus korosi sebesar $0,50 \mu\text{A/cm}^2$ (Albasre and Hussin 2021).

Pada penelitian ini akan dibuat lapisan Ni-Cu di atas substrat Al menggunakan cara elektrodeposisi dengan melakukan variasi rapat arus, lapisan Ni-Cu di atas substrat Al diharapkan dapat memperbaiki sifat keras, magnet dan korosinya dari lapisan Ni-Cu (Albasre and Hussin 2021; Karunakaran et al. 2018a; Karunakaran and Pugazh Vadivu 2019). Karena substrat yang digunakan adalah Al, maka Al perlu dilakukan proses pengamplasan supaya lapisan pelindungnya hilang dan endapan Ni-Cu mudah menempel pada permukaan substrat. Al yang sudah diampelas kemudian dicuci menggunakan *ultrasonic cleaner* dengan larutan aseton untuk menghilangkan zat organik. Pada proses elektrodeposisi perlu dilakukan pengamatan hubungan antara rapat arus dengan waktu, laju deposisi dan efisiensi arus (Budi et al. 2020). Penelitian ini menggunakan variasi rapat arus dan konsentrasi larutan yang mana akibat pengaruh rapat arus dapat meningkatkan komposisi fraksi berat Ni di substrat. Hasil dari elektrodeposisi diharapkan dapat digunakan untuk *actuator arm* yang diharapkan memiliki kekerasan yang cukup keras, mempunyai sifat magnet yang cukup dan ketahanan korosi yang baik.

1.2. Ruang Lingkup Permasalahan

Ruang lingkup permasalahan dalam penelitian yang dilakukan, disusun di bawah ini:

1. Apakah lapisan Ni dan Cu yang di deposisi bersama dengan menggunakan larutan CuSO_4 dan NiSO_4 dapat menghasilkan lapisan Ni-Cu yang menutupi substrat Al.
2. Bagaimana komposisi lapisan Ni-Cu yang terbentuk dapat dikontrol dengan melakukan variasi rapat arus.

3. Bagaimana sifat lapisan Ni-Cu tersebut apakah berupa paduan atau campuran antara keduanya.
4. Bagaimana sifat kekerasan, morfologi, sifat elektrokimia dan sifat kemagnetan dari lapisan Ni-Cu yang terbentuk.

1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian pelapisan Ni-Cu ini bertujuan untuk:

1. Membuat lapisan Ni-Cu dengan metode proses elektrodposisi bersama di atas substrat Al dengan melakukan variasi rapat arus.
2. Mengetahui karakterisasi kristalografinya, morfologi, kekasaran, kekerasan, sifat kemagnetannya, dan sifat elektrokimia.

1.4. Hipotesis

Hipotesis yang dapat disajikan pada usulan penelitian ini:

1. Elektrodposisi Ni dan Cu bersama pada substrat Al dapat menghasilkan paduan Ni-Cu.
2. Variasi rapat arus dan konsentrasi larutan dapat mempengaruhi efisiensi arus deposisi, laju deposisi dan tebal lapisan.
3. Sifat kekerasan, magnet dan korosinya dapat dikontrol atau diatur dengan variasi rapat arus.

1.5. Batasan Penelitian

Penelitian ini mempunyai batasan dalam hal sebagai berikut:

1. Material yang digunakan adalah Ni, Cu dan Al.
2. Variasi rapat arus : 15, 20, 30, 40, 50 dan 100 mA/cm².
3. Suhu 25 °C dan pH 4,2
4. Konsentrasi larutan 0,04 M CuSO₄.5H₂O : 0,5 M NiSO₄.6H₂O : 0,2 M Na₃C₆H₅O₇. Pengujian karakterisasi menggunakan *x-ray fluorescence* (XRF), *x-ray diffractometer* (XRD), *scanning electron microscope* (SEM-EDS-Mapping), analisis kekasaran (*image-J*), *Roughness tester Surtronic-25*, Vickers, *vibrating sample magnetometer* (VSM), dan *linear sweep voltammetry* (LSV).

1.6. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah menghasilkan material yang memiliki banyak fungsi yaitu mempunyai sifat kekerasan, sifat magnet dan tahan korosi. Terutama untuk meningkatkan kemampuan dari bahan *Al* yang dilapisi Ni-Cu yang akan dimanfaatkan pada pembuatan *actuator arm*.

1.7. Keterbaruan Penelitian

Modifikasi material pada penelitian ini dilakukan dengan cara modifikasi sintesis menggunakan teknik elektrodposisi menggunakan variasi arus dan konsentrasi larutan tanpa aditif. Pada penelitian ini menggunakan variasi konsentrasi larutan 0,04 M $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$: 0,5 M $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$: 0,2 M $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ pada substrat *Al* yang belum dikerjakan oleh peneliti lainnya. Selain itu juga dapat memperbaharui sifat keras yang diteliti oleh Karunakaran *et. al* (2018) sebesar 153 HV, memperbaharui saturasi magnet 0,0004 emu/g yang diperoleh oleh Karunakaran and Pugazh Vadivu (2019) dan memperbaiki tegangan korosi yang diperoleh oleh Albasre dan Hussin (2021) sebesar -690,0 mV (vs SCE) dan arus korosi sebesar 0,50 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Proses sintesis paduan Ni-Cu pada penelitian sekarang dengan elektrodposisi yang berbeda dengan konvensional dengan cara cor dalam dunia industri disebut sebagai monel (70Ni-30Cu).

1.8. State of the art penelitian

Penelitian pelapisan Ni-Cu dimulai dengan tinjauan terhadap penelitian dari orang lain yang sudah terpublikasi dalam suatu jurnal ilmiah. Tabel 1.1 merupakan kumpulan dari penelitian sejenis yaitu pembuatan lapisan Ni-Cu dengan menggunakan variasi rapat arus. Penelitian saat ini difokuskan dalam hal pembuatan lapisan Ni-Cu di atas substrat *Al* dengan melakukan variasi rapat arus dan konsentrasi larutan.

Tabel 1.1 *State of the art* pelapisan Ni-Cu dengan metode Elektrodeposisi

Peneliti	Elektrolit	Substrat	Pelapis	Rapat arus	Kekerasan	Magnetik	Korosi
M.Karunakaran,et.all (2018)	NiSO ₄ .6H ₂ O 250 g/l; NiCl ₂ .6H ₂ O 15 g/l; NaCl 15 g/l; H ₃ BO ₃ 30 g/l; H ₃ PO ₄ 6 g/l; Na ₂ WO ₄ .2H ₂ O 80 g/l	Al	Ni-Cu-P-W	40 mA/cm ²	153 Hv		
M.Karunakaran,et.all (2019)	NiSO ₄ .6H ₂ O 250 g/l; NiCl ₂ .6H ₂ O 15 g/l; NaCl 15 g/l; H ₃ BO ₃ 30 g/l; H ₃ PO ₄ 6 g/l; Na ₂ WO ₄ .2H ₂ O 80 g/l	Al	Ni-Cu-P-W-TiO ₂	40 mA/cm ²		Ms= 0,0004 emu/g	
Yashwardhan Deo, Et. Al (2020)	0,05 M CuSO ₄ .6H ₂ O; 1 M NiSO ₄ .5H ₂ O; 0,2 M Tri Sodium Citrate	Baja	Ni-Cu	10 mA/cm ²			Ecorr = -543 mV dan Icorr = 11,5 μ A
Ajay D Pingale, et all (2020)	21 g/l CuSO ₄ .6H ₂ O; 105 g/l	stainless stell	Ni-Cu/gr		360 Hv		Ecorr = -411 mV dan Icorr = 31 μ A/cm ²

	NiSO ₄ ·5H ₂ O; 59 Tri Sodium Citrate	(SS)			
Nur Mashitah Mustaffa Albasre, et. al (2021)	NaCl 3,5%	Al	Ni-Cu-P	60 mA/cm ²	E _{corr} = -690 mV dan I _{corr} = 1,45 μA/cm ²
Linping Yu, et. al (2021)	0,418 M NiSO ₄ , 0,063 M NiCl ₂ , 0,194 M H ₃ BO ₃	Cu	Ni-Cu		E _{corr} = -0,7 V dan J _{corr} = 2,297 x 10 ⁻² (μA/cm ²)

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Aluminium (Al)

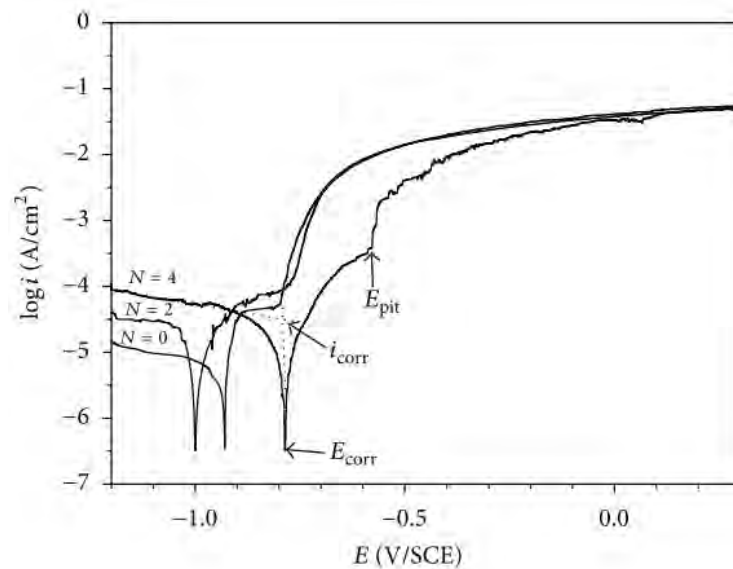
Al merupakan logam yang memiliki sifat listrik yang baik, lunak dan kekuatannya relatif rendah seperti disebutkan pada Tabel 2.1. Sehingga apabila dicampur dengan logam lainnya akan membentuk Al padatan. Al banyak dijumpai pada industri otomotif, peralatan rumah tangga dan lain-lain. Al murni hanya memiliki kekuatan *tensile* 90 MPa. Al memiliki lambang Al dan nomor atom 13 (Groover 2012).

Tabel 2.1 Karakteristik Al (Groover 2012)

Karakteristik	Nilai
Nomor Atom	13
Wujud	Padat
Masa Jenis	2,70 g/cm ³
Masa Jenis pada Wujud Cair	2,375 g/cm ³
Titik Lebur	933,47 K ; 660,32 °C ; 1220,58 °F
Titik Didih	2792 K ; 2519 °C; 4566 °F
Kalor Jenis	24,2 J/mol.K
Resistansi Listrik	8,2n.Ω·m
Konduktivitas Termal	237 W/m.K
Pemuaian Termal	23,1 μm/m.K
Modulus Young	70 GPa
Kekerasan Skala Mohs	2,75
Vickers (Kekerasan)	167 MPa

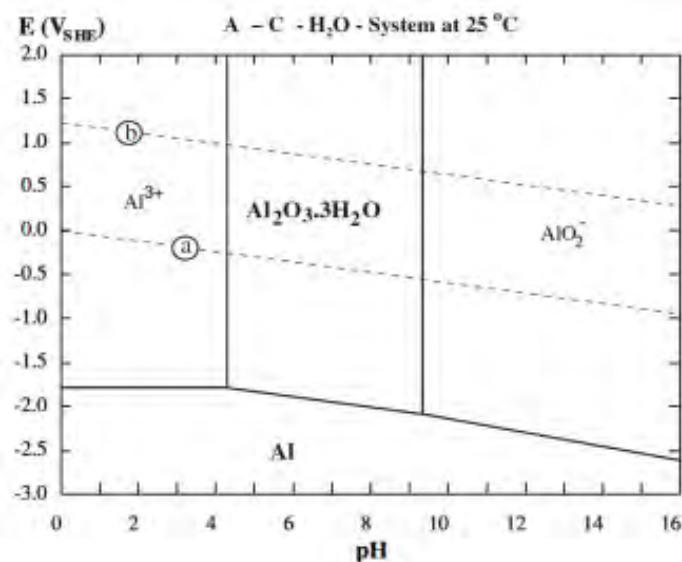
Al paduan mempunyai sifa-sifat logam yang terdiri dari dua atau lebih unsur-unsur dan campuran dari logam lainnya untuk meningkatkan kekuatan mekaniknya. Beberapa logam yang biasa digunakan untuk paduan Al adalah Cu, Mg, Si, Zn, Mn dan Ni. Paduan Al dan Mg dapat menaikkan kekuatan Al dan menurunkan nilai *ductility* dan sebagai ketahanan korosi. Dalam dunia industri paduan Al -Mg masuk dalam seri 5050.

Lapisan Al oksida membuat Al tahan korosi karena Al mudah teroksidasi dengan oksigen. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Korchef dan Kahoul (2013) potensial untuk paduan Al mempunyai rentang antara -0,5 sampai dengan -1,0 V (vs SCE) yang ditunjukkan pada Gambar 2.1 (Korchef and Kahoul 2013).



Gambar 2.1 Karakteristik Al (Korchef and Kahoul 2013).

Gambar 2.2 merupakan diagram pourbaix Al. Diagram pourbaix menjelaskan hubungan antara pH dan potensial elektroda. Garis (a) menunjukkan peristiwa reduksi dimana kawat membebaskan gas hidrogen dan garis (b) merupakan peristiwa oksidasi dimana anoda melepaskan gas O_2 . Garis kesetimbangan yang memisahkan daerah imun, pasif dan korosi terjadi reaksi elektrokimia. Wilayah terkorosi terjadi pada proses oksidasi dimana anoda melepaskan ion Al^{3+} pada pH dibawah 4 dengan potensial -1,55 sd 2 V (Skilbred 2016).



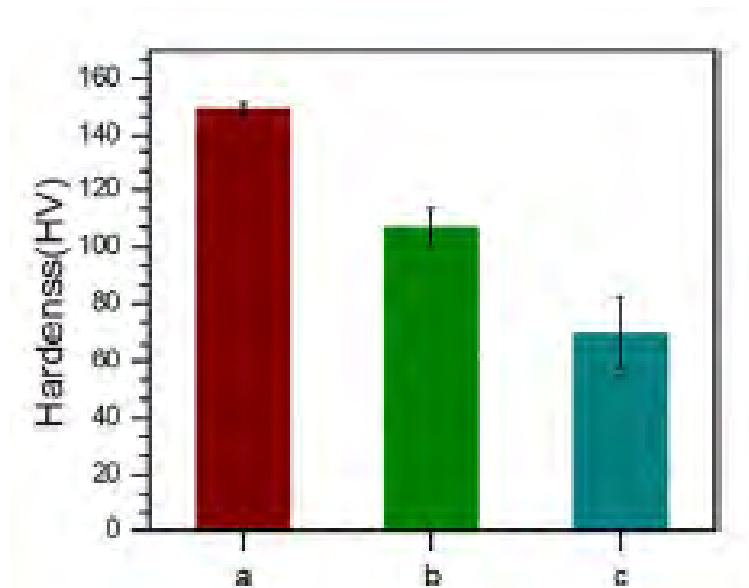
Gambar 2.2 Diagram Pourbaix Al (Skilbred 2016).

2.2 Tembaga (Cu)

Karakteristik dari tembaga (Cu) adalah daya listriknya yang bagus selain itu juga merupakan logam yang tidak mudah teroksidasi oleh udara. Cu sendiri mempunyai potensial reduksi yang positif sehingga sangat mudah untuk melapisi logam lainnya. Biasanya Cu digunakan sebagai lapisan dasar (Niam, Purwanto, and Respati 2017).

Proses pelapisan Cu pada substrat menggunakan larutan elektrolit (CuSO_4). Penggunaan arus DC menyebabkan terjadinya perubahan potensial pada proses pelapisan. Kation dari anoda akan bergerak menuju katoda melalui larutan elektrolit (Mustopo 2011).

Penelitian yang dilakukan oleh Nikhil *et. al* (2021) memperoleh kekerasan Cu murni sebesar 140 HV (Nikhil et al. 2021). Jika diperlakukan panas pada suhu 400 dan 600 °C, kemudian di dinginkan maka tingkat kekerasannya berubah menjadi 100 dan 60 HV. Hasil tersebut dapat dibuat diagram batang supaya dapat dilihat perbedaannya dengan baik pada Gambar 2.3.



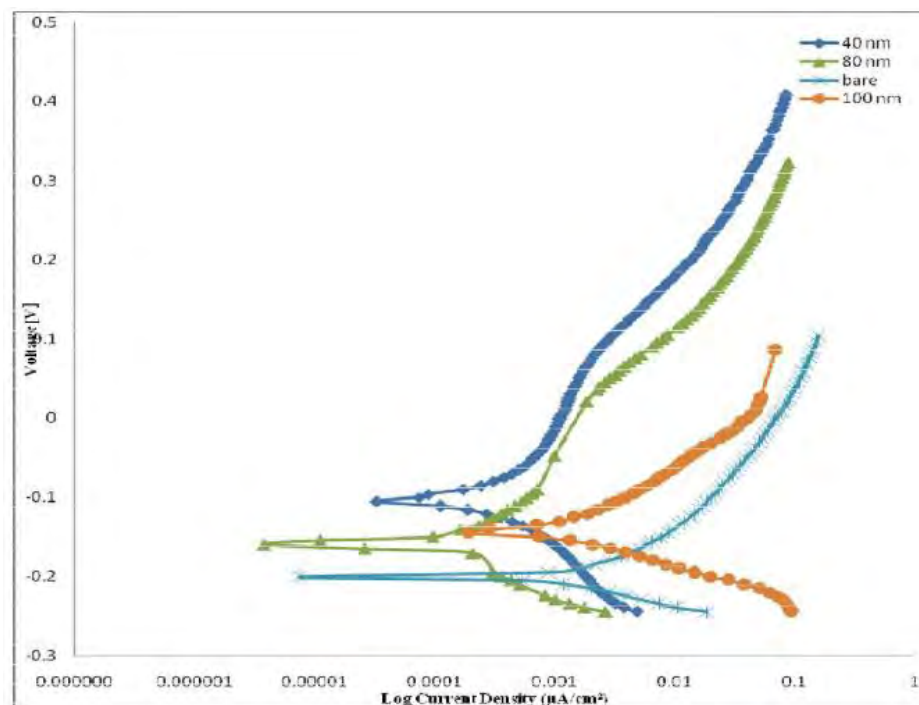
Gambar 2.3 Kekerasan Vickers (a) Tanpa Perlakuan, (b) 400 °C dan (c) 600 °C (Nikhil et al. 2021).

Berdasarkan penelitian dari Alphanoda (2017) ion Cu^{2+} dari anoda bergerak menuju ke katoda menjadi Cu (Alphanoda 2017). Akibat perpindahan ion Cu^{2+} dari anoda, maka anoda akan berkurang beratnya dan pada katoda akan bertambah berat akibat Cu yang mengendap. Melihat dari peristiwa ini dapat ditarik hipotesis

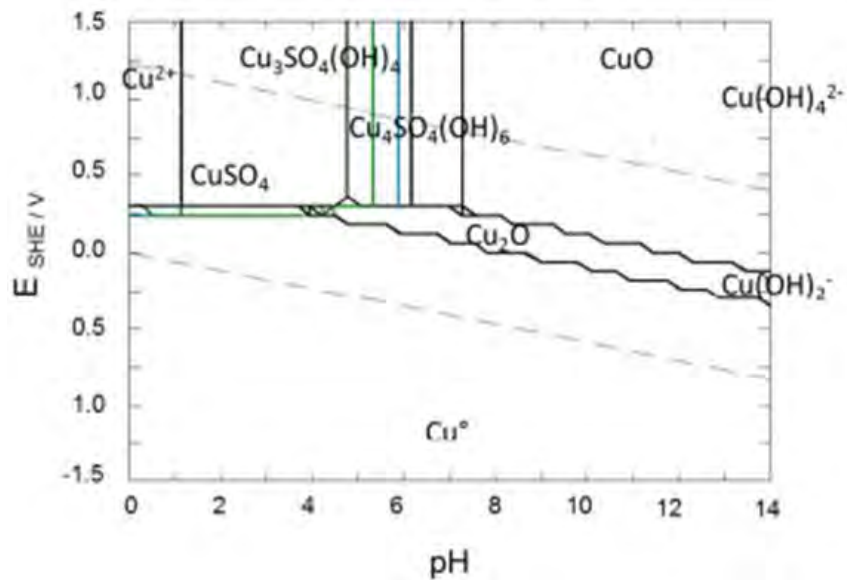
bahwa konsentrasi C_u^{2+} dan SO_4^{2-} dalam larutan elektrolit akan tetap selama masih ada anoda.

Pengaruh rapat arus terhadap potensial diteliti oleh Jikan *et. al* (2015) pada penelitian ini diperoleh laju korosi susbtrat Cu adalah sebesar 0,8615 mmpy dan potensial korosinya adalah -0,172 V (vs Ag/AgCl) (Jikan et al. 2015). Grafik hubungan antara Log (i) vs Potensial (V vs Ag/AgCl) disajikan di Gambar 2.4.

Gambar 2.5 merupakan diagram Pourbaix yang menunjukkan kestabilan logam tergantung dari lingkungan, hubungan antara potensial dan pH, pada diagram ini terdapat batas-batas yang memisahkan dari logam, ion dan *oxide* logam Cu. Daerah imunitas terjadi hampir pada seluruh pH dimana daerah ini adalah logam aslinya (Cu). Wilayah pasivasi terjadi ketika logam terlapis atau tertutup dengan oksida atau hidroksida terlihat dari Cu_2O dan $Cu_2(OH)_2^-$ yang terbentuk. Daerah korosi terjadi pada pH dibawah 2 dengan potensialnya antara 0,25-1,25 V (Montiel Hernández et al. 2014).

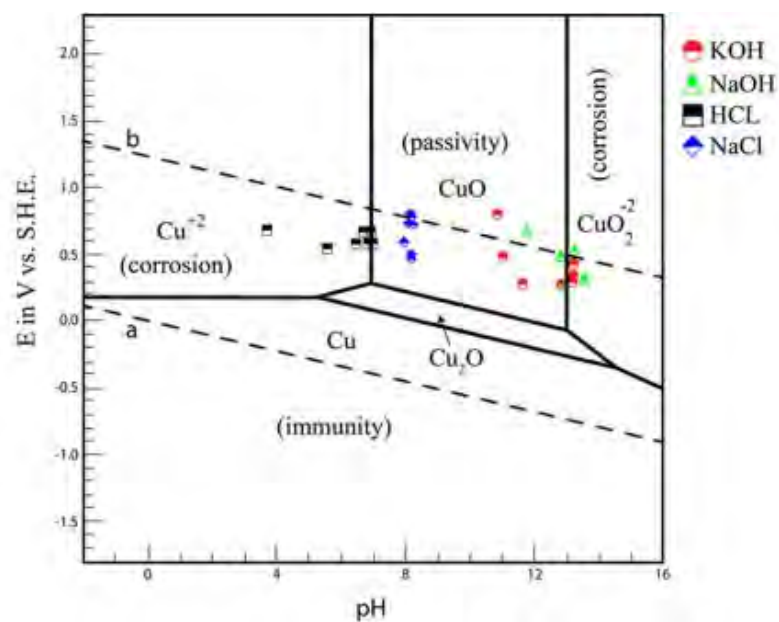


Gambar 2.4 Kurva Potensi-dinamik Ni/Cu (Jikan et al. 2015).



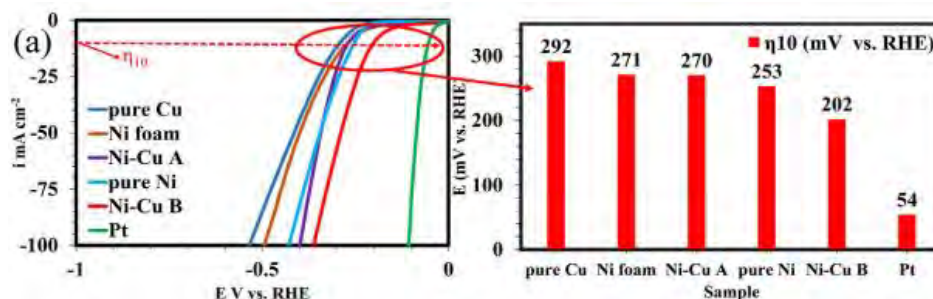
Gambar 2.5 Diagram Pourbaix Cu pada larutan SO_4 (Montiel Hernández et al. 2014).

Cu memiliki lapisan pasif dalam larutan KOH, NaOH dan NaCl, namun sebagian besar Cu mengalami korosi dalam larutan HCl. Jika dilihat dari Gambar 2.6 terlihat Cu menunjukkan perilaku pasif dalam kisaran pH (7 hingga 13).



Gambar 2.6 Diagram Pourbaix Cu pada larutan NaCl (Hamidah et al. 2021).

Lotfi *et. al* (2019) melakukan pengujian elektrokimia Cu murni, Ni-Cu dan Pt. Pada pengujian elektrokimia dengan larutan 1 M KOH dan *scan rate* 1 mV/s diperoleh nilai overpotensial tertinggi adalah Cu 292 mV (Lotfi et al. 2019). Sehingga Cu ini termasuk logam sangat rendah aktifitas katalitiknya dibandingkan dengan logam Pt yang ditampilkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Kurva LSV dari berbagai logam (Lotfi et al. 2019).

2.3 Nikel (Ni)

Jika dilihat dari diagram fasa nikel (Ni) mempunyai titik lebur 1.455 °C, artinya Ni merupakan konduktor panas dan listrik. Sehingga sangat sangat bagus digunakan sebagai elektroda anoda karena dapat menghantar daya listrik. Menurut Thurber *et al.* (2016) nilai kekerasan pada Ni murni tanpa perlakuan panas mempunyai nilai yang bervariasi dari 118 sampai 125 HV (Thurber et al. 2016). Namun jika mendapat perlakuan panas akan mengurangi nilai kekerasan tersebut pada temperatur 500 °C nilai kekerasannya menjadi 118,7 HV. Nilai dari hasil perhitungan kekerasan disajikan dalam bentuk Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Variasi kekerasan menggunakan variasi temperatur *annealing* (Thurber et al. 2016)

Ni Murni	Hardness Values (HV)					Rata-rata
	1	2	3	4	5	
Tanpa perlakuan panas	120,9	127,7	139,3	118,8	118,4	123,6
300 °C – anil	116,6	118,3	125,3	125,0	120,8	120,8
500 °C – anil	120,8	127,5	109,5	122,3	118,7	118,7
700 °C – anil	117,3	124,5	115	128,2	120,5	120,5

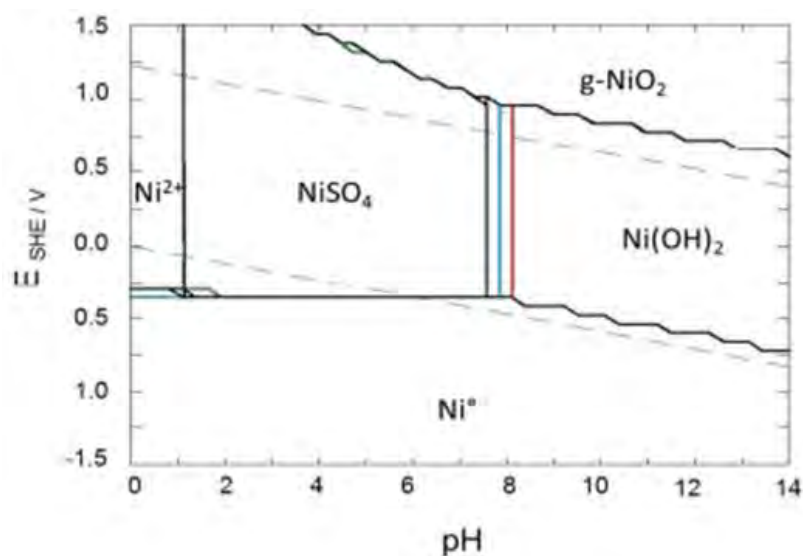
Laju korosi Ni murni dengan menggunakan Tafel tanpa *annealing* maupun dengan *annealing* tidak memberikan perbedaan yang signifikan yang ditunjukkan

pada Tabel 2.3. Perlakuan dengan annealing pada temperatur 700 °C memberikan laju korosi paling tinggi diantara lainnya (0,048 mm/years) (Bloom and Reenen 2013).

Tabel 2.3 Analisis korosi dengan Tafel (Bloom and Reenen 2013)

Ni Murni	Luas Area (cm ²)	Massa Jenis (g/cm ³)	Total arus anodik (μA)	Arus Korosi, Icorr (A/cm ²)	Laju korosi pada 3.5% NaCl (mm/year)
Tanpa perlakuan panas	1,83	8,32	7,0	3,823	0,044
300 °C – anil	1,83	8,54	4,0	3,421	0,038
500 °C – anil	1,83	8,89	6,0	3,925	0,046
700 °C – anil	1,83	9,37	8,0	4,685	0,048

Diagram Pourbaix menjelaskan adanya kondisi termodinamika dari sebuah sistem, sistem Ni mengalami reaksi anodik dan katodik yang jelaskan pada Gambar 2.8. Garis kesetimbangan yang memisahkan daerah imun dan korosi terjadi reaksi elektrokimia. Wilayah terkorosi terjadi pada pH dibawah 2 dengan potensial -0,25 sd -1,5V. Daerah pasivasi terjadi pada wilayah Ni hidroksida dan daerah imun terjadi pada seluruh pH dengan nilai tegangan dibawah -0,25 V (Montiel Hernández et al. 2014).



Gambar 2.8 Diagram Pourbaix Ni (Montiel Hernández et al. 2014).

Ni termasuk kedalam kategori ferromagnetisme, ferromagnetisme sendiri merupakan gejala terjadinya penyejajaran momen magnet suatu material ketika diberikan medan magnet luar. Material ferromagnetisme memiliki susceptibilitas positif dan bernilai besar.

Tabel 2.4 Konstanta bahan ferromagnetik (Evans et al. 2014)

	Fe	Co	Ni	Gd	Unit
Struktur kristal	BCC	HCP	FCC	HCP	-
Sel unit	2,866	2,507	3,524	3,636	Å
Nomer kordinat z	8	12	12	12	-
Temperatur <i>Curie</i> T_c	1043	1388	631	293	K
Momen putaran atom μ_s	2,22	1,72	0,060	7,63	μ_b
Pertukaran energi J_{ij}	$1,05 \times 10^{-21}$	$6,60 \times 10^{-21}$	$2,75 \times 10^{-21}$	$1,28 \times 10^{-21}$	J/link
Energi anisotropi k	$5,65 \times 10^{-25}$	$6,69 \times 10^{-24}$	$5,47 \times 10^{-26}$	$5,93 \times 10^{-24}$	J/atom

Pada Tabel 2.4 Ni mempunyai Temperatur *Curie* sebesar 631 °K, menurut Evans *et al.* (2014) temperatur *Curie* ialah temperatur dimana magnetisasi spontan lenyap dan memisahkan fase paramagnetik sehingga magnetisasi spontan bahan ferromagnetik akan hilang jika dipanaskan di atas suhu temperatur *Curie* (Evans et al. 2014).

2.4 Elektrodeposisi

Beberapa metode pelapisan yang dikenal adalah *physical vapor deposition* (PVD), *chemical vapor deposition* (CVD) dan *direct current* (DC) elektrodeposisi. Kelebihan metode PVD merupakan teknik pelapisan dengan cara mengembunkan ke substrat dalam kondisi vakum. Kelemahan metode ini adalah menggunakan teknologi tinggi (vakum) dan laju deposisinya relatif rendah. Pelapisan dengan teknik CVD menggunakan reaksi kimia yang diatas permukaan substrat. Kekurangan dari metode ini adalah membutuhkan piranti yang canggih dengan kondisi vakum, menggunakan gas hidrogen, dan biayanya sangat mahal (Ningsih 2016).

Proses elektrodeposisi dengan DC *power supply* merupakan proses pelapisan logam dengan menggunakan bantuan dari elektrolit dan arus listrik/ tegangan DC untuk menghantarkan ion-ion dari anoda (kutub positif) menuju katoda (kutub negatif) (Setiyawan 2016). Sedangkan dengan menggunakan potensiotat/

galvanostat (alat uji korosi) dikenal sebagai proses elektrodposisi dengan anoda tak larut (*unsoluble anode*) (D. Goranova et al. 2016).

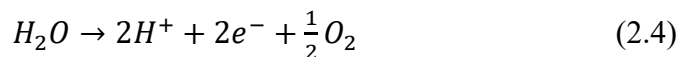
2.5 Pelapisan Ni-Cu Alloy

Pelapisan dengan media larutan asam sudah banyak dilakukan oleh beberapa peneliti, menurut penelitian yang dilakukan oleh (Grimshaw, Calo, and Hradil 2011) memodelkan perilaku reaksi elektrokimia untuk menghubungkan perilaku Ni dan Cu dalam larutan logam. Potensial reduksi untuk Ni ($E_{Ni^{2+}}^0 = -0,25 V$) dan potensial reduksi Cu ($E_{Cu^{2+}}^0 = +0,34 V$) (C. Wang et al. 2020). Persamaan reaksi Redoks untuk pelapisan campuran Ni-Cu (Pingale et al. 2021):

Reaksi Katodik:



Reaksi Anodik:



Reaksi perpindahan:

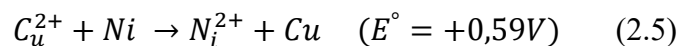
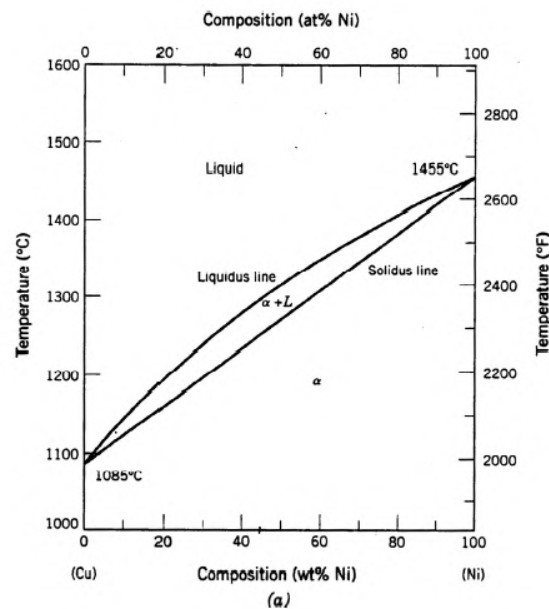


Diagram fasa memberikan informasi tentang proses peralihan dari suatu keadaan ke keadaan lainnya. Sistem Ni-Cu terdiri dari dua elemen murni penyusun *alloy* yaitu elemen Ni dan elemen Cu seperti ditunjukkan pada Gambar 2.9. Terdapat dua fasa pada larutan solid Cu dan Ni, Fasa L (*liquid*) dan α (*solid*) dengan struktur kristalnya FCC. Fasa tunggal atau *single phase* komposisi fasa ini sama untuk keseluruhan komposisi *alloy*. Sementara itu untuk daerah dua fasa (*two-phase region*) bisa menggunakan garis bantu (*tie line*) atau garis isothermal (Zhang et al. 2014).



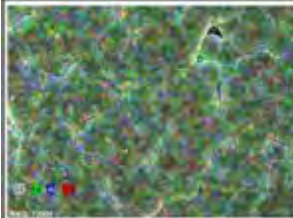
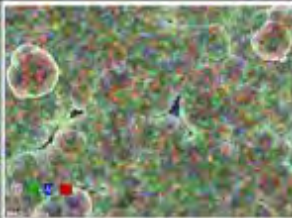
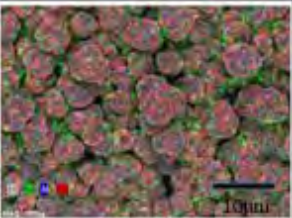
Gambar 2.9 Diagram fasa Ni-Cu (Zhang et al. 2014).

Salah satu faktor yang mempengaruhi kesuksesan dalam elektrodeposisi adalah penggunaan larutan perantara distribusi ion dari anoda ke katoda. Penelitian yang dilakukan oleh Nady dan Negem (2016) dengan memvariasikan konsentrasi Cu dalam larutan *gluconat* (Nady and Negem 2016). Pengaruh konsentrasi larutan seiring dengan peningkatan rapat arus akan mempengaruhi morfologi struktur permukaan. Semakin tinggi rapat arus, maka lapisan yang dihasilkan berbentuk kasar pada pelapisan campuran Ni-Cu dengan konsentrasi larutan yang dilakukan adalah pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Komposisi larutan (Nady and Negem 2016)

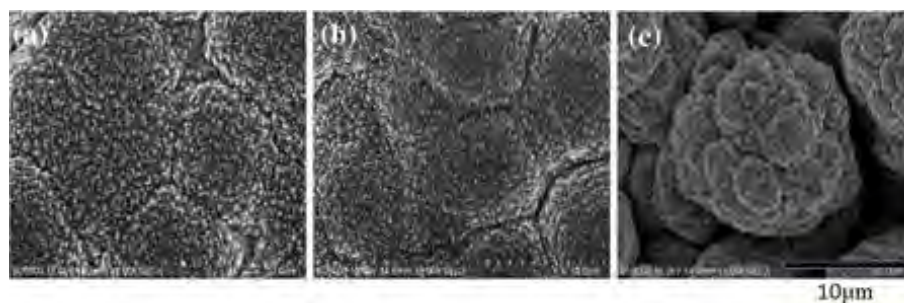
Bath	Composition					Operating Conditions		
	NiSO ₄	CuSO ₄	Sodium Gluconat	H ₃ BO ₃	Cysteine	pH	Current density	Conductivity
	M	M	M	g/l	nM		A/cm ²	mS/cm ²
1	0,1000	-	0,1	10	0,18	4,1	0,025	11,40
2	0,0995	0,0005	0,1	10	0,18	4,0	0,025	11,31
3	0,0980	0,0020	0,1	10	0,18	4,1	0,025	11,40
4	0,0950	0,0050	0,1	10	0,18	4,1	0,025	11,80
5	0,0935	0,0065	0,1	10	0,18	4,1	0,025	11,10
6	0,0925	0,0075	0,1	10	0,18	4,1	0,025	11,17
7	0,0900	0,0100	0,1	10	0,18	4,0	0,025	11,50
8	0,0500	0,0500	0,1	10	0,18	3,8	0,025	11,75
9	-	0,1000	0,1	10	0,18	3,5	0,025	11,10

Penelitian Lee dan Chung (2020) melakukan variasi perbandingan molar larutan elektrolit Ni:Cu yaitu 90:1; 97:3; dan 90:10 (Lee and Chung 2020). Hasil karakterisasi EDS menunjukkan atomik persen dari masing-masing larutan. Perbandingan atom persen Cu ke Ni mendekati 1:1 terjadi pada larutan elektrolit dengan perbandingan molar Ni:Cu 97:3 yang ditunjukkan pada Gambar 2.10.

Solution (Molar ratio) = Ni:Cu		
99:1	97:3	90:10
		
Atomic Percent (%) = Ni:Cu		
88.11:11.89	59.14:40.86	8.66:91.34

Gambar 2.10 Atomik persen Ni-Cu dari beberapa larutan dengan variasi perbandingan molar dengan tegangan -0.9 V (Lee and Chung 2020).

Bentuk morfologi berdasarkan tegangan yang digunakan pada saat elektrodposisi disajikan pada Gambar 2.11. Pada gambar tersebut terlihat pengaruh tegangan terhadap morfologi yang terbentuk. Bentuk morfologi berdasarkan tegangan yang digunakan saat proses elektrodposisi dibagi menjadi tiga kelompok yaitu: *faceted structure* (I), *columnar dendrit* atau *spheroidal* (II) dan *spongi dendrite* (III) (Fukunaka, Doi, and Kondo 1990).



Gambar 2.11 Bentuk morfologi paduan Ni-Cu dari SEM (Lee and Chung 2020).

Variasi rapat arus juga akan mempengaruhi ukuran kristal seperti yang telah dilakukan oleh (Li, Mei, Li, and Du 2019). Rapat arus yang digunakan dalam

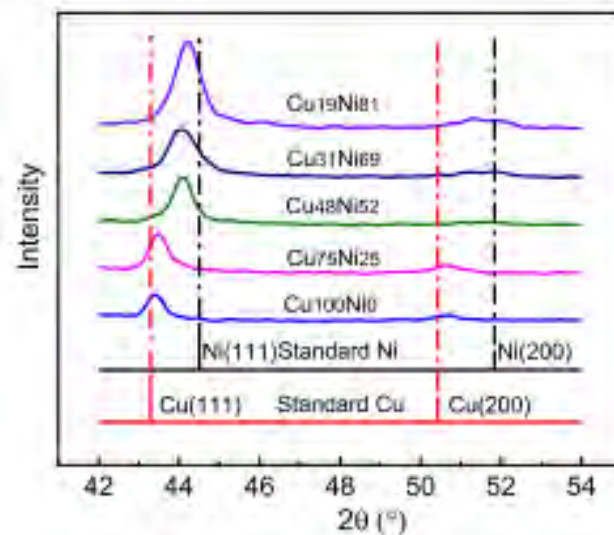
penelitian ini adalah 2, 3, 4, 5 dan 6 A/cm². Ukuran kristal yang di hasilkan menunjukan ukuran kristal mengecil namun tidak signifikan. Perhitungan ukuran kristal menggunakan persamaan *Debye-Scherrer*.

Pengamatan morfologi dan sifat mikrostruktur dilakukan oleh Sarac dan Baykul (2014) dengan melakukan pelapisan Ni-Cu diatas substrat *indium tin oxide* (ITO) (Sarac and Baykul 2014). Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan arus konstan -9 mA/cm² dan suhunya divariasi 25, 40 dan 55 °C. Hasil XRD memperlihatkan struktur yang terbentuk berupa FCC dengan bidang kristal yang diamati (111) dan (002). Larutan yang kaya dengan Ni sudut yang terbentuk $2\theta = 44^\circ$ dan $2\theta = 51^\circ$. Tabel 2.6 menunjukan *lattice* parameter, ukuran kristal dan komposisi Ni dan Cu terhadap temperatur.

Tabel 2.6 Parameter *latice*, ukuran kristal dan komposisi lapisan Ni-Cu (Sarac and Baykul 2013)

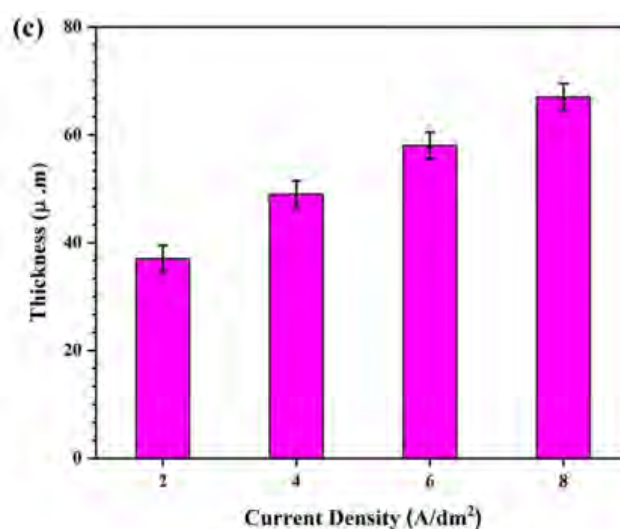
<i>Electrolyte temperature</i> (°C)	<i>Lattice parameter</i> (nm)	<i>Crystalite size</i> (nm)	<i>Film composition (EDX)</i>	
			<i>at.% Ni</i>	<i>at.% Cu</i>
25	0,35241	34	96,15	3,85
40	0,35282	23	92,05	7,95
55	0,35300	20	85,25	14,75

Pola difraksi Ni-Cu *alloy* untuk rapat arus yang berbeda juga dilakukan oleh Wang *et. al* (2020) yang ditunjukkan pada Gambar 2.12 (C. Wang et al. 2020). Hasil analisis XRD mengungkapkan bahwa lapisan tipis yang dibentuk dari larutan padat dengan struktur FCC. Puncak (111), (200) dan (220) yang dihasilkan tergantung dari konsentrasi larutan.



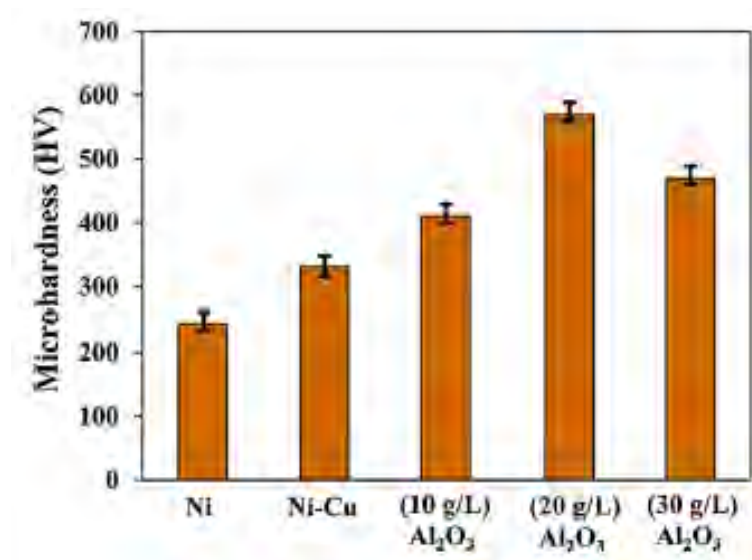
Gambar 2.12 Bidang kristal yang terbentuk pada paduan Ni-Cu (C. Wang et al. 2020).

Pingale *et. al* (2020) melakukan penelitian paduan Cu-Ni/Gr di atas pelat *stainless steel* dengan variasi rapat arus 20, 40, 60 dan 80 mA/cm² dengan larutan nikel sulfat (105 g/l), tembaga sulfat (21 g/l) dan trisodium sitrat (59 g/l) selama 90 menit (Pingale, Belgamwar, and Rathore 2020). Pada penelitian ini diperoleh semakin tinggi rapat arus yang digunakan ketebalan juga semakin meningkat seperti pada Gambar 2.13.



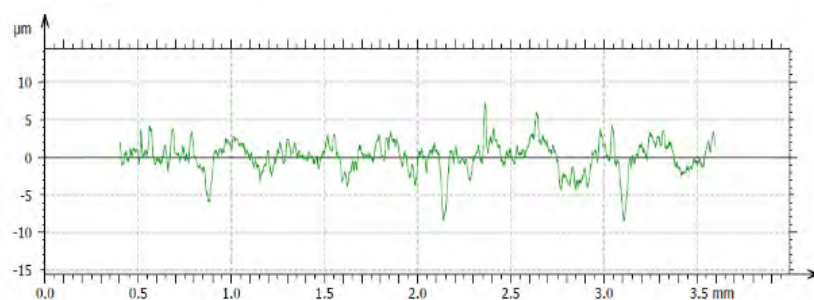
Gambar 2.13 Hubungan antara ketebalan dengan variasi rapat arus (Pingale, Belgamwar, and Rathore 2020).

Hubungan ukuran kristal terhadap kekerasan Ni-Cu *alloy* di paparkan oleh Alizade dan Safaei (2018) dengan melakukan elektrodposisi pada rapat arus 2 mA/cm², lama elektrodposisi selama 60 menit dengan variasi konsentrasi larutan (Alizadeh and Safaei 2018). Ukuran kristal Ni-Cu *alloy* lebih kecil dari pada pelapisan Ni murni. Pada penelitian ini nilai kekerasan naik dari 245 menjadi 331 HV yang ditunjukkan pada Gambar 2.14.



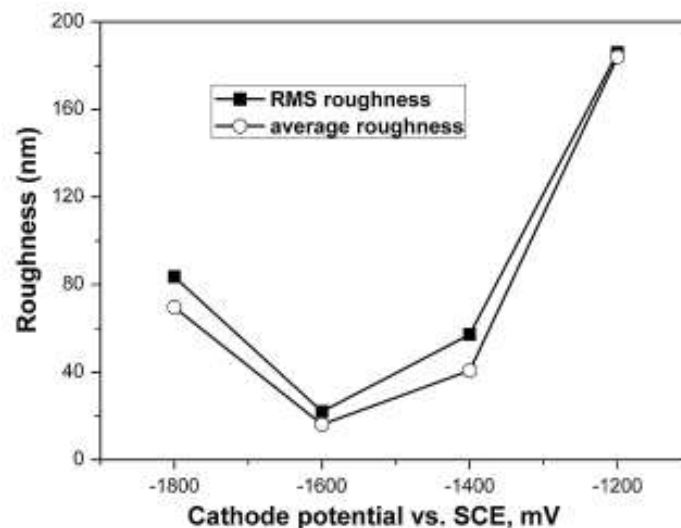
Gambar 2.14 Kekerasan mikro variasi aditif *Al₂O₃* (Alizadeh and Safaei 2018).

Gambar 2.15 Karunakaran *et. al* (2018) melakukan analisa kekasaran pada paduan Cu-Ni-P dan Cu-Ni-P-W di atas substrat *Al* mendapatkan paduan Cu-Ni-P lebih halus dari pada paduan Cu-Ni-P-W yakni sebesar Ra= 1,37 μ m (Karunakaran et al. 2018).



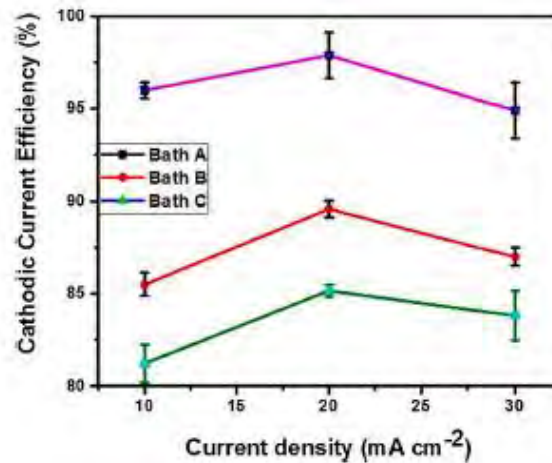
Gambar 2.15 Profil kekasaran permukaan Cu-Ni-P di atas *Al* (Karunakaran et al. 2018).

Sarac *et. al* (2012) melakukan pengujian kekasaran pada paduan Ni-Cu pada substrat ITO (Sarac, Öksüzoğlu, and Baykul 2012). Sampel paduan Ni-Cu diperoleh dengan cara elektrodposisi dengan variasi tegangan pada temperatur ruangan 25 °C. terlihat dari Gambar 2.16 semakin tinggi tegangan, maka kekasaran juga semakin naik.



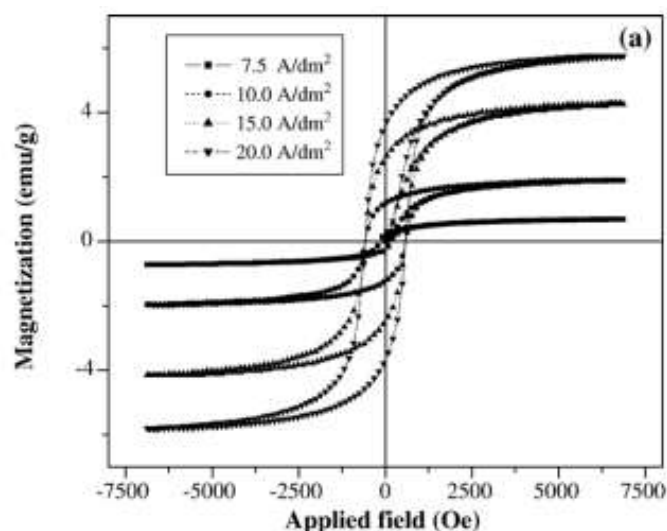
Gambar 2.16 Kekasaran meningkat seiring bertambahnya tegangan (Sarac, Öksüzoğlu, and Baykul 2012).

Pengaruh rapat arus dan komposisi larutan elektrolit memberikan pengaruh kepada efisiensi arus katoda. Penelitian yang dilakukan Deo *et. al* (2020) dengan memvariasikan konsentrasi larutan elektrolit A, B dan C (Deo et al. 2020). Larutan A mengandung 0,05 M $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ dan 1 M $\text{NiSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Larutan B mengandung 0,1 M $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ dan 1 M $\text{NiSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ dan Larutan C mengandung 0,15 M $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ dan 1 M $\text{NiSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ dengan variasi rapat arus 10, 20 dan 30 mA/cm^2 . Pada rapat arus 20 menuju 30 mA/cm^2 evolusi hidrogen semakin meningkat sehingga mengalahkan deposisi logam ke substrat seperti pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17 Variasi efisiensi arus katoda dengan variasi rapat arus dari larutan A, B dan C (Deo et al. 2020).

Pengujian sifat magnetik dengan menggunakan VSM oleh Baskaran *et. al* (2006) memperlihatkan magnetisasi *multilayer* meningkat seiring dengan bertambahnya konsentrasi Ni sebagai lapisan feromagnetik yang ditunjukkan pada Gambar 2.18 (Baskaran, Sankara Narayanan, and Stephen 2006). Saturasi magnet meningkat dari 0,08942 ke 5,868 emu/g akibat dari meningkatnya komponen Ni pada paduan Ni-Cu, begitu juga nilai magnetik remanen naik dari 0,253 ke 1,609 emu/g yang ditampilkan pada Tabel 2.7.



Gambar 2.18 Kurva histerisis (Baskaran, Sankara Narayanan, and Stephen 2006).

Tabel 2.7 Parameter magnetik paduan Ni-Cu (Baskaran, Sankara Narayanan, and Stephen 2006)

Rapat arus (A/dm ²)	Komposisi Cu-Ni	Ms (emu/g)	Mr (emu/g)
<i>As-plated condition</i>			
7,5	$Cu_{0,89}Ni_{0,11}$	0,253	0,8942
10,0	$Cu_{0,77}Ni_{0,23}$	0,5432	2,009
15,0	$Cu_{0,56}Ni_{0,44}$	1,044	4,346
20,0	$Cu_{0,38}Ni_{0,62}$	1,609	5,868
<i>Vacuum annealed at 400 °C for 1 h</i>			
7,5	$Cu_{0,89}Ni_{0,11}$	1,071	4,231
10,0	$Cu_{0,77}Ni_{0,23}$	1,462	5,43
15,0	$Cu_{0,56}Ni_{0,44}$	2,875	13,09
20,0	$Cu_{0,38}Ni_{0,62}$	4,208	18,35

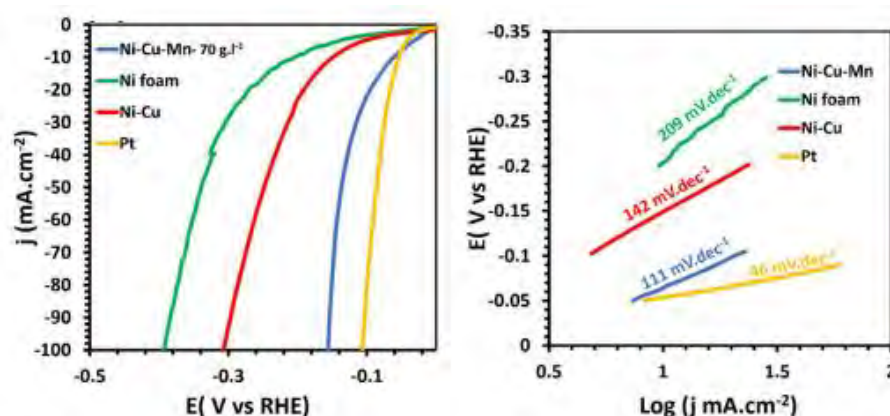
Penelitian yang dilakukan oleh Kuru *et. al* (2013) dengan melakukan pelapisan paduan Ni-Cu/Cu dimana pada sampel dengan komposisi Ni 74,3 at% dan Cu 25,7 at% menghasilkan saturasi magnet sebesar 101 (emu/cm³). Hasil ini dipengaruhi oleh unsur Ni yang mengendap pada substrat seperti ditunjukkan pada Tabel 2.8 (Kuru, Kockar, and Alper 2013).

Tabel 2.8 Analisis magnetik NiCu/Cu (Kuru, Kockar, and Alper 2013)

Sampel	Komposisi lapisan (EDX)		Magnetik
	Ni (at%)	Cu (at%)	Ms (emu/cm ³)
151[NiCu (3 nm)/Cu (0,3 nm)]	74,3	25,7	101
125[NiCu (3 nm)/Cu (1 nm)]	43,5	56,5	68
100[NiCu (3 nm)/Cu (2 nm)]	29,1	70,9	79
91[NiCu (3 nm)/Cu (2,5 nm)]	23,8	76,2	39

Pada proses elektrodposisi perlu diwaspadai terbentuknya gas hidrogen di katoda. Karena gas hidrogen akan menimbulkan lubang-lubang kecil berupa titik-titik hitam yang disebut dengan *pitting*. *Pitting* yang berupa lubang-lubang kecil tersebut akan menjadi jalan bagi berlangsungnya reaksi korosi secara mikro. Reaksi evolusi hidrogen digunakan untuk melihat produksi hidrogen melalui elektrolisis air. Gambar 2.19 menunjukkan penelitian Lotfi dan Darband (2022) diperoleh potensial

berlebih (overpotensial) Ni-Cu sebesar 152 mV dan *slope* sebesar 142 mV/dec (Lotfi and Barati Darband 2022).



Gambar 2.19 Kurva LSV analisis HER (Lotfi and Barati Darband 2022).

Analisis tegangan korosi dan arus korosi paduan Ni-Cu dengan larutan 3,5% NaCl telah dilakukan oleh Saranya, Velayutham dan Suryanarayanan (2014). Tabel 2.9 menunjukkan kecenderungan seiring bertambahnya kadar Ni maka tegangan korosi juga akan naik (Saranya, Velayutham, and Suryanarayanan 2014).

Tabel 2.9 Analisis polarisasi potensiodinamik paduan Ni-Cu dalam larutan 3,5% NaCl (Saranya, Velayutham, and Suryanarayanan 2014).

Komposisi paduan (wt%)	E_{corr} vs. SCE (mV)	i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
0% (<i>mild steel</i>)	-603,620	5,478
27,5% Cu–72,5% Ni	-724,359	12,286
35,1% Cu–64,9% Ni	-669,238	48,803
47,9% Cu–52,1% Ni	-611,294	62,053
77,6% Cu–22,4% Ni	-593,214	68,868
84,9%Cu–15,1% Ni	-544,117	71,692

BAB 3

METODE PENELITIAN

Pada bab ini akan diuraikan langkah-langkah penelitian yang terbagi menjadi tiga bagian: (1) sintesis paduan Ni-Cu di atas substrat Al dengan metode elektrodeposisi, (2) karakterisasi paduan Ni-Cu, dan (3) simulasi kekasaran permukaan Ni-Cu dengan perangkat lunak *image-J*. Langkah-langkah sintesis paduan Ni-Cu meliputi pengaturan pH, temperatur, konsentrasi larutan dan variasi rapat arus. Karakterisasi paduan Ni-Cu meliputi XRD, SEM-EDS, kekasaran (*Surtronic-25*), vicker microhardness, VSM dan polarisasi potensiodinamik. Simulasi kekasaran permukaan dengan perangkat lunak *image-J* meliputi perhitungan *roughness average (Ra)*.

3.1. Langkah Penelitian

Penelitian yang akan dilakukan merupakan studi elektrodeposisi Ni-Cu di atas substrat Al. Lokasi sintesis sampel dilaksanakan di laboratorium Analisis Fluida Reservoir, Universitas Trisakti. Sampel yang telah berhasil di sintesis, kemudian dilakukan karakterisasi sampel tersebut di PT. Cipta Mikro Material (CMM), Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) dan CMPFA Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia (FTUI) Depok.

3.2. Bahan Penelitian

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah logam Ni, Al dan Cu. Pada penelitian ini dilakukan pengujian *x-ray fluorescence (XRF)* untuk mengetahui kemurnian dari logam yang digunakan. Teknik sistesis yang dilakukan adalah dengan elektrodeposisi yakni pembuatan lapisan Ni-Cu diatas substrat Al. Ukuran substrat yang digunakan berukuran $1 \times 1 \times 0,25$ cm.

Proses elektrodeposisi ini dengan cara penentuan komposisi larutan terlebih dahulu. Komposisi larutan ini divariasi 0,04 M $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$: 0,5 M $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$: 0,2 M $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$. Setelah ditentukan komposisi larutan, kemudian ditimbang dengan timbangan digital seperti Gambar 3.1 dan dilarutkan dengan aquades dan

diaduk hingga homogen dengan suhu ruang menggunakan *magnetic stirrer* kurang lebih selama 1 jam.



Gambar 3.1 Timbangan digital.

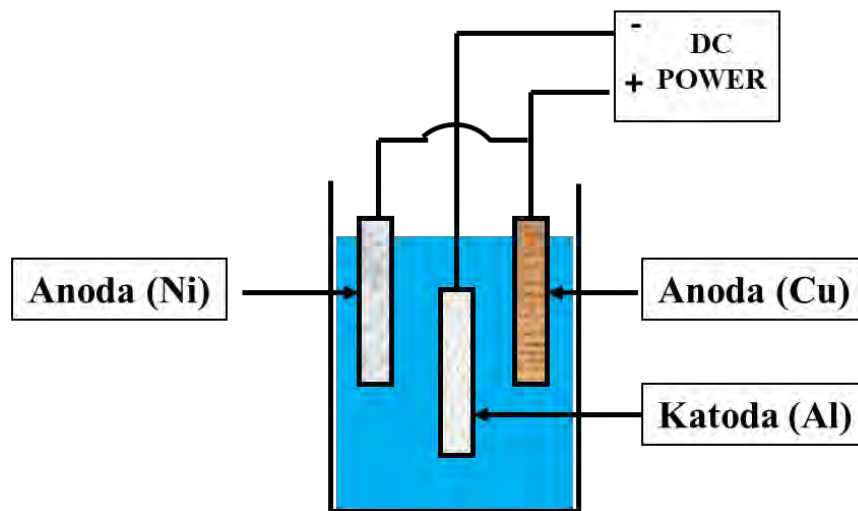
Proses elektrodposisi terhadap *Al* yang akan dilapisi oleh Cu dan Ni, maka elektrolit yang digunakan adalah elektrolit tembaga sulfat (CuSO_4) dan elektrolit nikel sulfat (NiSO_4). Adapun bahan elektrolit yang akan digunakan adalah pro analis (PA) yang di beli dari Merck, begitu juga dengan logam yang digunakan dibeli dari Merck. Proses elektrodposisi dilakukan dengan DC *power supply* dengan komposisi larutan 0,04 M $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ sebanyak (10 g/L), 0,5 M $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ sebanyak (131,4 g/L) dan 0,2 M $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ sebanyak (58,82 g/L). Pelapisan Ni-Cu dengan konsentrasi larutan yang lain sudah dilakukan di awal sebelum penelitian sekarang.

3.3. Preparasi Sampel

Gambar 3.2 merupakan proses elektrodposisi Ni dan Cu secara bersama dengan substrat *Al*. Substrat *Al* yang akan digunakan sebagai substrat perlu dilakukan proses pengamplasan ukuran 3000 supaya diperoleh permukaan yang bersih dari kotoran. Setelah dilakukan proses pengamplasan kemudian di cuci dengan ultrasonik DELTA D68H selama 5 menit dalam larutan aseton untuk menghilangkan kotoran yang masih melekat.

Proses elektrodposisi dilakukan dengan variasi arus 15, 20, 30, 40 ,50 dan 100 mA/cm^2 . Proses elektrodposisi dengan menggunakan DC *power supply* SANFIX 305 E. Jarak antara anoda dan katoda diatur 2 cm serta suhu larutan dijaga 25°C .

Sebelum dilakukan proses sintesis sampel perlu ditimbang terlebih dahulu untuk mendapatkan massa substrat sebelum terlapis oleh paduan Ni-Cu.



Gambar 3.2 Proses elektrodposisi Ni-Cu dengan Ni dan Cu sebagai anoda dan Al sebagai katoda.

Setelah proses elektrodposisi selesai kemudian sampel di bersihkan dengan air mengalir dan dibilas dengan *aquades* kemudian dikeringkan. Setelah kering sampel kemudian ditimbang untuk mendapatkan massa substrat setelah terlapis oleh paduan Ni-Cu.

3.4. Pemberian Nama Sampel

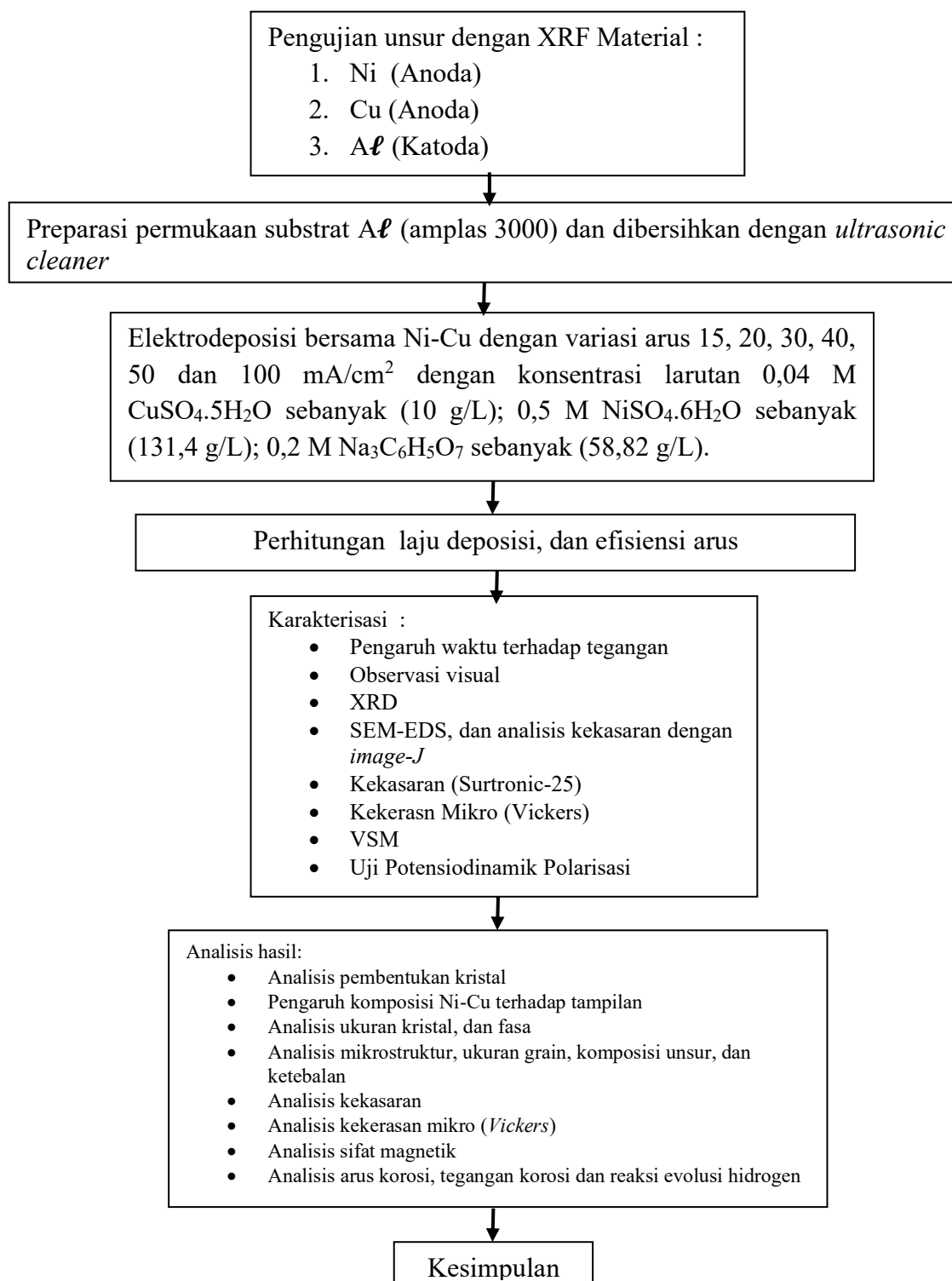
Penelitian pelapisan Ni-Cu di atas Al menggunakan variasi rapat arus dan konsenterasi larutan. Terdapat enam variasi percobaan variasi rapat arus. Untuk mempermudah penamaan sampel maka akan disederhanakan seperti pada Tabel 3.1 berikut ini:

Tabel 3.1 Penyederhanaan nama sampel

No	Rapat Arus (mA/cm ²)	Nama Sampel
1	15	Ni-Cu 15
2	20	Ni-Cu 20
3	30	Ni-Cu 30
4	40	Ni-Cu 40
5	50	Ni-Cu 50
6	100	Ni-Cu 100

3.5. Diagram Alir Penelitian

Gambar 3.3 merupakan alur penelitian proses elektrodposisi Ni-Cu dengan variasi arus dan konsentrasi larutan dengan suhu 25 °C dan jarak katoda ke anoda 2 cm.



Gambar 3.3 Alur penelitian elektrodposisi Ni-Cu.

3.6. Proses Elektrodeposisi

Sebelum proses elektrodeposisi perlu ditetapkan ketebalan guna mendapatkan waktu pelapisan secara teori sebesar 1 jam yang ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Ketebalan lapisan secara teoritis

No	Rapat Arus (mA/cm ²)	Ketebalan (μm)
1	15	20
2	20	27
3	30	40
4	40	53
5	50	66
6	100	130

Waktu dari lapisan Ni-Cu aktual secara eksperimen yang terbentuk dapat dihitung dengan formulasi sebagai berikut (Schlesinger and Paunovic 2010):

$$t = Hap/ZI \quad (3.1)$$

Dengan H= Tebal lapisan (cm), Z= Ekvaleen elektrokimia ion (g/C), I= Arus (A), ρ= Massa Jenis (g/cm³), t= Waktu (sekon), dan a= Luas permukaan (cm²).

3.6.1 Menghitung Laju Elektrodeposisi

Perubahan massa sebelum dan sesudah sampel di elektrodeposisi digunakan untuk menghitung laju deposisi dan efisiensi arus. Massa pengendapan diukur dengan metode berat sebagai persamaan berikut (Mahallawy, Shoeib, and Abouelenain 2011):

$$v = \frac{10000\Delta m}{\rho \cdot S \cdot t} \quad (3.2)$$

Dengan v= Laju deposisi (μm/jam), Δm= Perubahan massa (g), t= Waktu (jam), s= Luas substrat (cm²), dan ρ= Massa jenis (g/cm³).

3.6.2 Menghitung Efisiensi Arus Proses Elektrodeposisi

Menurut Budi *et al.* (2020) perhitungan rapat efisien arus adalah sebagai berikut (Budi et al. 2020):

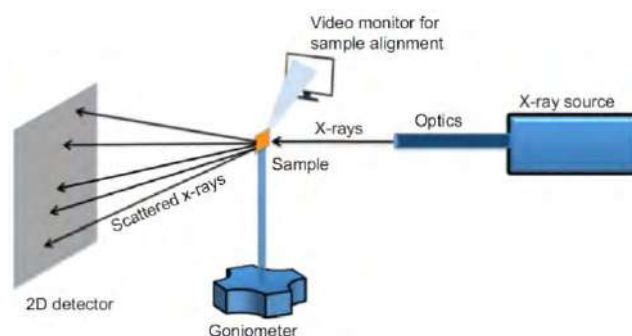
$$EA = \frac{\frac{w}{EW} \times I \times t}{F} \times 100 = \frac{wF}{I \times t} \sum \frac{c_a n_a}{Ma} \times 100 \quad (3.3)$$

Dengan E_w = Berat ekivalen (g equiv^{-1}), I = Arus yang digunakan (A), t = Waktu elektrodeposisi (s), c_a = Fraksi massa logam yang terdepositasi, n_a = Bilangan elektron, M_a = Massa atomik logam, dan F = Konstanta Faraday (96.487 C/mol).

3.7. Analisis X-Ray Diffractometer (XRD)

Pengujian *X-ray diffractometer* (XRD) dilakukan di PT CMM dengan menggunakan alat XRD yang memanfaatkan radiasi dari $\text{Cu K}\alpha$ ($\lambda = 0,154056 \text{ nm}$) dengan perangkat Panalytical Xpert Pro. Sudut 2θ yang diaplikasikan yaitu di sweep dari mulai sudut 10° hingga 90° . XRD merupakan teknik tanpa merusak (*nondestructive*) untuk melakukan karakterisasi material kristalin. Secara skematik alat XRD diilustrasikan pada Gambar 3.4. XRD dapat pula memberikan informasi mengenai struktur, kecenderungan arah kristal, dan juga parameter stuktur, seperti ukuran rata-rata butir (*grain*) dan distribusi regangan pada kisi (Di Gianfrancesco 2017).

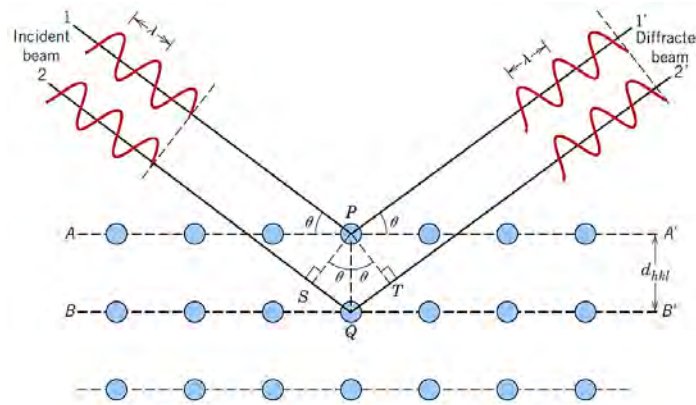
Mekanisme kerja dari XRD yaitu dapat digambarkan sebagai dua bidang sejajar yang terdiri dari atom-atom, yaitu A-A' dan B-B' seperti diberikan pada Gambar 3.5, yang memiliki indeks Miller h , k , dan l yang sama dan dipisahkan oleh jarak antarbidang yaitu d_{hkl} . Kemudian, diasumsikan sebuah sumber sinar-x yang sejajar, monokromatis, dan koheren dengan panjang gelombang λ menumbuk kedua bidang sejajar tersebut pada sudut θ . Dua buah berkas sinar yang dilabeli 1 dan 2, dipantulkan oleh atom P dan Q. Selanjutnya, interferensi konstruktif dari pemantulan berkas 1 dan 2 juga terjadi pada sudut θ terhadap bidang jika perbedaan jarak lintasan antara 1-P-1' dan 2-Q-2' sama dengan kelipatan panjang gelombang λ .



Gambar 3.4 Skematik XRD (Di Gianfrancesco 2017).

Berdasarkan hukum Bragg, dapat diketahui jarak antar bidang kristal (d) dipengaruhi sudut difraksi yang terbentuk oleh hamburan sinar-x yang mengenai bidang kristal, diberikan sebagai berikut (Callister and Rethwisch 2014):

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta \quad (3.4)$$



Gambar 3.5 Mekanisme difraksi sinar-x (Di Gianfrancesco 2017).

Struktur kristal yang mempunyai struktur kubik simetri, memiliki hubungan antara jarak antarbidang dengan indeks Miller (h , k , dan l) dan parameter kisi, sebagai berikut (Callister and Rethwisch 2014):

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (3.5)$$

Dengan a merupakan parameter kisi (Å).

Berdasarkan persamaan *Debye-Scherrer*, dapat diketahui bahwa ukuran kristal (D) dipengaruhi oleh ukuran lebar puncak difraksi (β), yaitu (Callister and Rethwisch 2014):

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (3.6)$$

Dengan D = Ukuran kristal (nm), k = Konstanta *Debye-Scherrer* sebesar 0,9, β = Ukuran lebar puncak difraksi FWHM dalam radian, λ = Panjang gelombang sinar-X menggunakan radiasi Cu K α sebesar 0,154056 nm, dan θ = Sudut Bragg.

Fasa yang terbentuk pada pelapisan Ni-Cu merupakan fasa tunggal dengan bidang kristal yang terbentuk (111), (002) dan (022). Struktur kristal yang terbentuk adalah FCC dan berada dalam *space grup* Fm-3m. Sudut yang terbentuk oleh bidang

(111) untuk Cu murni $2\theta = 43,3^\circ$ dan untuk Ni murni adalah $2\theta = 44,5^\circ$. Cu mempunyai parameter *lattice* ($a_{Cu} = 3,6148 \text{ \AA}$) dan parameter *lattice* Ni adalah $a_{Ni} = 3,5232 \text{ \AA}$ (C. Wang et al. 2020).

Analisis koefisien tekstur digunakan untuk melihat orientasi kristal dari lapisan Ni-Cu yang terbentuk dengan persamaan (SEAKR 2017):

$$M(hkl) = \frac{I(hkl)/I_0(hkl)}{\frac{1}{n} \sum I(hkl)/I_0(hkl)} \quad (3.7)$$

Dengan M = Koefisien tekstur, $I(hkl)$ = Puncak bidang hasil XRD sampel Ni-Cu, $I_0(hkl)$ = Puncak relatif dari database (ICSD), dan N = Jumlah punyak XRD.

Perhitungan *lattice strain* Ni-Cu dengan variasi rapar arus dapat menggunakan persamaan (Pingale, Belgamwar, and Rathore 2020):

$$\varepsilon = \left(\frac{\beta}{4 \times \tan \theta} \right) \quad (3.8)$$

Dengan β = FWHM pada bidang (111) dalam radian.

3.8. Analisis *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan *Energy Dispersive Spectrometry* (EDS)

Gambar 3.6 merupakan *scanning electron microscopy* (SEM) Thermofisher Quanta 650 milik PT CMM. Karakterisasi dari SEM ini untuk melihat morfologi permukaan dari sampel yang akan diuji. Secara garis besar komponen utama SEM ini pertama adalah tiga pasang lensa-lensa elektromagnetik yang berfungsi memfokuskan berkas elektron menjadi sebuah titik kecil, lalu oleh dua pasang *scan coil* discan-kan dengan frekuensi variabel pada permukaan sampel.

Energy dispersive spectrometry (EDS) digunakan untuk menentukan komposisi fraksi berat dari komponen Cu dan Ni yang akan diteliti. Secara Prinsip kerja EDS apabila terdapat elektron yang menubruk sampel, elektron tersebut akan dihamburkan lagi oleh elektron lainnya (Newbury and Ritchie 2019).



Gambar 3.6 Alat SEM PT CMM.

Proses elektrodeposisi dikatakan berhasil apabila substrat tertutup dengan lapisan dari anoda. Penentuan tebal lapisan juga dapat dilakukan dengan menggunakan SEM melalui tampang lintang (*cross section*) (Merino et al. 2019).

Citra adalah suatu representasi (gambaran), kemiripan, atau imitasi dari suatu obyek. Citra yang dihasilkan oleh SEM dapat dianalisis lebih lanjut kekasaran permukaan menggunakan perangkat lunak *image-J*. Analisis gambar dapat dilakukan sebagai berikut: 1. Membuka perangkat lunak *image-J*, 2. Membuka gambar SEM yang akan dianalisis, 3. Mengatur skala, 4. Menganalisis *plot profile* untuk mendapatkan hubungan antara *gray value* dengan *distance*, 5. Mendapatkan hasil analisis kekasaran melalui SurfCharJ dan 6. Mendapatkan gambar 3D dari *surface plot*. *Gray value* merupakan intensitas piksel pada citra digital. Sementara itu, *distance* merujuk pada ukuran geometris antar piksel dalam citra.

3.9. Analisis Kekasaran

Bentuk dari sebuah permukaan pada dasarnya dapat dibagi menjadi dua kategori, yakni permukaan yang memiliki karakter kasar (*roughness*) dan permukaan yang menunjukkan gelombang-gelombang (*waviness*). Permukaan yang memiliki kasaritas umumnya memiliki pola gelombang pendek yang tidak teratur. Hal ini biasanya terjadi akibat dari vibrasi yang berasal dari pisau potong atau akibat dari kurangnya kesesuaian proporsi pemakanan (*feed*) pisau potong saat dalam tahap pembuatannya. Faktor-faktor seperti aktivitas mesin, getaran, serta berbagai gaya tarik pada bahan dapat menyebabkan pembentukan kekasaran ini. Sementara itu, penggelombangan atau *waviness* merupakan komponen dari tekstur permukaan di mana kasaritas-kasaritas ini saling tumpang tindih. Gejala ini muncul akibat berbagai

alasan, seperti ketidaksempurnaan mesin, efek dari getaran, dan berbagai gaya tarik yang dikenakan pada bahan. Besaran dari kekasaran diukur dengan menggunakan nilai rata-rata kekasaran (R_a). R_a diartikan sebagai nilai rata-rata aritmatika dari penyimpangan profil kekasaran terhadap garis tengah rata-rata (Geramipour, Mousavi Khoei, and Shooshtari Gugtapeh 2021).

Sistem pengukuran permukaan alat *Roughness Tester Type Surtronic-25* adalah sebuah sistem modular yang dirancang untuk mengukur kekasaran permukaan secara *portable* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.7. Sistem ini terdiri dari beberapa komponen, termasuk *traverse unit*, *pick up* yang dilengkapi dengan transduser, dan juga dilengkapi dengan pencetak termal. *Traverse unit* berperan sebagai inti dari alat *Roughness Tester* dan bertugas sebagai pemroses data utama. *Pick up* adalah sebuah komponen penjelajah yang memiliki transduser dengan jenis induktansi variabel. Komponen ini akan dihubungkan dengan *traverse unit*. Hasil pengukuran diolah menggunakan mikroprosesor dan hasilnya ditampilkan pada sebuah layar dalam bentuk angka yang mewakili nilai kekasaran.



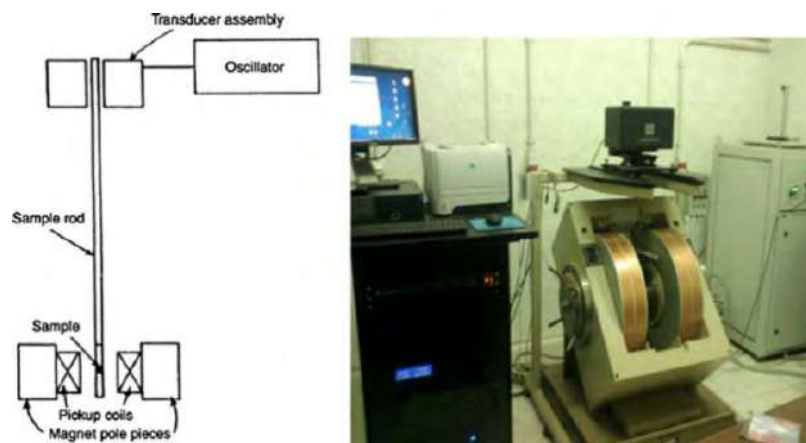
Gambar 3.7 Alat *Roughness Tester Surtronic-25* (Pranjono et al. 2015).

3.10. Analisis *Vibrating Sample Magnetometer (VSM)*

Pelapisan Ni-Cu akan diuji sifat magnetnya dengan *Vibrating Sample Magnetometer (VSM)* dengan alat uji seperti pada Gambar 3.8. Secara prinsip kerja VSM adalah sampel diukur magnetisasinya dipasang pada posisi vertikal dalam lingkungan medan magnet luar H . Apabila sampel termagnetisasi, baik secara

spontan maupun permanen, maka akan menghasilkan getaran yang akan mengakibatkan perubahan garis gaya magnetik (Handayani et al. 2020).

Pengujian sifat magnet ini akan dilakukan di BRIN. Kurva histeris yang diperoleh dari hasil pengujian dengan VSM akan diketahui besar sifat magnetnya. Sehingga dapat diketahui magnetisasi remanansi (M_r) dan medan koersivitas (H_c). Magnetisasi sebesar 1 gauss saturasi (M_s) digunakan pada pengujian ini (Mujamilah et al. 2000).



Gambar 3.8 VSM (Mujamilah et al. 2000).

3.11. Analisis Sifat Korosi Menggunakan Metode Polarisasi Potensiostatik

Uji korosi dilakukan dengan menggunakan pengukuran data polarisasi potensiostatik. Metode yang digunakan sebagai fenomena elektrokimia adalah *linear sweep voltammetry* (LSV) (Aziz et al. 2021). Metode LSV menggunakan sel elektrokimia berupa Ag/AgCl sebagai elektroda referensi dengan besar potensial sebesar +0,2 Volt terhadap *Standard Hydrogen Electrode* (SHE), elektroda *counter* berupa platina dan elektroda kerja berupa sampel paduan Ni-Cu berbagai variasi rapat arus. Metode LSV dilakukan dengan menyearahkan potensial terhadap elektroda kerja kemudian dibandingkan dengan potensial elektroda referensi berupa Ag/AgCl, dan pada saat yang sama dipindai pula arus responsnya. Pada penelitian ini potensiostat Digi-Ivy seri DY2311, buatan Digi-Ivy, Inc., Austin, Texas, USA digunakan untuk melakukan sweep tegangan dari -1,4 hingga 0,4 Volt, dengan *scan rate* sebesar 0,001 V/s dan sensitivitas 0,001 (A/V) dan pada saat yang sama dipindai

pula arus responsnya. Metode LSV dapat digunakan untuk menentukan potensial reaksi reduksi atau oksidasi (Nath, Sahu, and Mallik 2016).

Gas hidrogen merupakan unsur kimia yang memiliki simbol H dan nomor atom satu. Pada suhu dan tekanan standar, hidrogen tidak berwarna, tidak berbau, bersifat nonlogam, bervalensi tunggal dan merupakan gas diatomik yang sangat mudah terbakar pada udara bebas. Analisis *hydrogen evolution reaction* (HER) dilakukan pada kurva katodik pada rentang (0 sampai -1,4 V vs Ag/AgCl). Reaksi evolusi hidrogen adalah reduksi proton atau air menjadi molekul hidrogen (H₂). Plot Tafel untuk berbagai sampel paduan Ni-Cu menggunakan persamaan garis linier dengan menggunakan persamaan dibawah ini (Huang et al. 2016):

$$\eta = a + b \log J_0 \quad (3.9)$$

Dengan η = Onset overpotensial (V), a = Intersep (V), dan b = Kemiringan Tafel (V/dec).

Perhitungan *exchange current density* menggunakan persamaan (Huang et al. 2016):

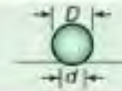
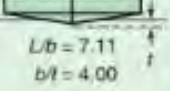
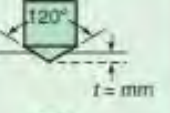
$$\log(J_0) = -\frac{a}{b} \quad (3.10)$$

Dengan $\log(J_0)$ = *Exchange current density* (A/cm²).

3.12. Analisis *Microhardness*

Uji kekerasan indentasi berupa penjejakan oleh sebuah indentor yang keras ditekan ke permukaan logam yang diuji (Danhardjo 2020). Pada Gambar 3.9 di bawah ini diperlihatkan berbagai macam pengujian kekerasan.

Uji kekerasan indentasi menggunakan alat MicroMet@5100 Series dilakukan di CMPFA Teknik Metalurgi dan Material FTUI. Cara kerja alat ini adalah dengan menggunakan indentor berbentuk piramid yang membuat jejak pada material dengan pembebanan tertentu. Pengujian ini berlangsung selama kurang lebih 30 detik dan bisa menghasilkan ketelitian antara 2–3 μm .

Test	Indenter	Shape of indentation		Load, P	Hardness number
		Side view	Top view		
Brinell	10-mm steel or tungsten-carbide ball			500 kg 1500 kg 3000 kg	$HB = \frac{2P}{(\pi D)(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers	Diamond pyramid			1–120 kg	$HV = \frac{1.854P}{L^2}$
Knoop	Diamond pyramid			25 g–5 kg	$HK = \frac{14.2P}{L^2}$
Rockwell					
A } C } D }	Diamond cone			60 kg 150 kg 100 kg	$\left. \begin{array}{l} HRA \\ HRC \\ HRD \end{array} \right\} = 100 - 500t$
B } F } G }	$\frac{1}{16}$ -in. diameter steel ball			100 kg 60 kg 150 kg	$\left. \begin{array}{l} HRB \\ HRF \\ HRG \end{array} \right\} = 130 - 500t$
E	$\frac{1}{8}$ -in. diameter steel ball			100 kg	HRE

Gambar 3.9 Macam-macam teknik pengujian kekerasan (Callister and Rethwisch 2014).

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas mengenai hasil karakterisasi kemudian dilakukan interpretasi data dan pembahasan. Diskusi akan diawali dengan analisis pengujian logam Ni, Cu dan Al dengan XRF. Selanjutnya proses sintesis paduan Ni-Cu meliputi variasi rapat arus dengan menganalisis hubungan tegangan terhadap waktu, analisis efisiensi arus terhadap pengaruh rapat arus, analisis laju deposisi terhadap pengaruh rapat arus dan pengamatan visual. Kemudian semua sampel di karakterisasi dengan XRD, SEM-EDS, kekasaran, *vicker microhardness*, VSM dan *linear sweep voltammetry*. Hasil yang diperoleh dari karakterisasi kemudian dianalisis.

4.1. Analisis XRF

Analisis XRF ini ditujukan untuk mengetahui komposisi dari elektroda anoda dan substrat (katoda) yang digunakan. Tabel 4.1 menyajikan informasi hasil karakterisasi Al dengan XRF.

Tabel 4.1 Hasil XRF Al

Unsur	Konsentrasi (%wt)
Mg	1,49
Fe	1,63
Al	96,88
Total	100

Berdasarkan Tabel 4.1 terlihat bahwa substrat yang digunakan berupa paduan Al dengan Fe dan Mg. Komposisi unsur Al mempunyai konsentrasi terbesar yakni 96,88% disusul kemudian oleh Fe sebesar 1,63% dan Mg sebesar 1,49%. Penambahan pengotor Fe dalam paduan Al dimaksudkan agar tidak terjadi penyusutan (Tata Surdia & Shinroku Saito 1999). Sementara itu paduan Al dan Mg pada umumnya mempunyai sifat korosi yang baik dan paduan Al-Mg termasuk kedalam Al Association (AA) yaitu seri 5050 (Rees 1995).

Karakterisasi XRF juga dilakukan untuk elektroda Ni. Hasil karakterisasi XRF Ni diperoleh hasil seperti disajikan dalam Tabel 4.2

Tabel 4.2 Hasil XRF Ni

Unsur	Konsentrasi (%wt)
Al	0,02
Zr	0,04
Nb	0,05
Fe	0,23
Ni	99,66
Total	100

Karakterisasi XRF juga dilakukan untuk elektroda Cu. Hasil karakterisasi XRF Cu diperoleh hasil seperti disajikan dalam Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil XRF Cu

Unsur	Konsentrasi (%wt)
P	0,122
Cd	0,684
Cu	99,194
Total	100

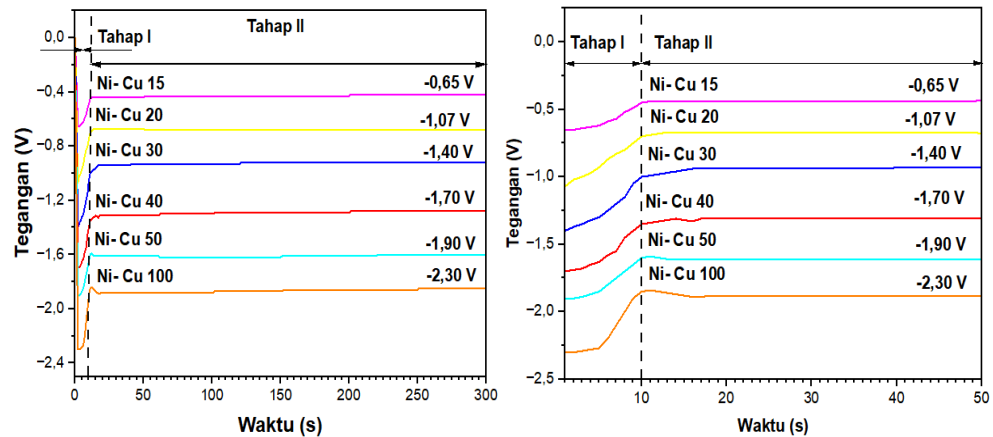
4.2. Pembuatan Lapisan Ni-Cu dengan Variasi Rapat Arus

Pembuatan lapisan Ni-Cu dilakukan dengan pengaruh variasi rapat arus 15, 20, 30, 40, 50 dan 100 mA/cm². Lapisan Ni-Cu yang terbentuk kemudian dianalisis sesuai dengan karakterisasi yang digunakan.

4.1.1. Pengaruh Waktu Terhadap Tegangan

Proses pembentukan lapisan lapisan Ni-Cu di atas substrat Al dimulai dengan proses nukleasi. Proses nukleasi ini merupakan proses awal sebelum terbentuknya kristalisasi (Ningsih 2016). Nukleasi sendiri dalam keadaan metastabil menuju stabil ke bentuk akhir. Proses transient arus juga digunakan sebagai fungsi waktu untuk mengontrol stabilitas deposisi Ni-Cu selama proses pengendapan. Perpindahan deposisi Ni-Cu ke substrat Al dilakukan dengan cara perekaman. Perekaman kurva deposisi merupakan hubungan tegangan vs waktu (detik). Selama 300 detik

perekaman dilakukan untuk melihat peroses peralihan dari nukleasi menuju kristalisasi.



Gambar 4.1 Proses peralihan pembentukan Ni-Cu diatas Al sebagai fungsi dari tegangan.

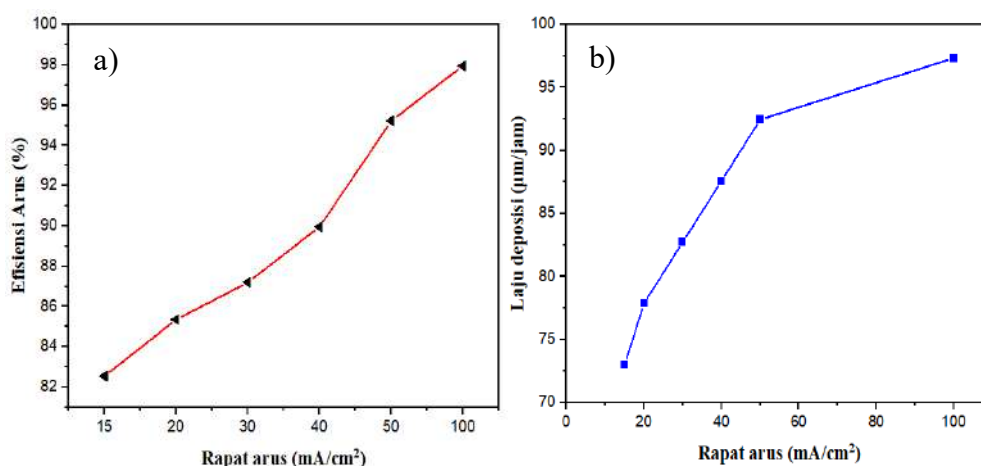
Gambar 4.1 terlihat bahwa tegangan akan menurun seiring dengan elektrodposisi rapat arus menurun. Ion Ni-Cu yang diendapan di atas substrat Al terbentuk secara seragam pada saat tegangan konstan. Pada tahap I tegangan drop, pada tahap ini terjadi pembentukan nukleasi dalam keadaan metastabil. Tahap II pembentukan kristalisasi dimana tegangan cenderung dalam keadaan konstan. Akibat dari tegangan yang semakin meningkat, maka medan listrik selama percobaan juga lebih tinggi. Selaras dengan medan listrik yang semakin tinggi akan menghasilkan ketebalan lapisan yang bervariasi sesuai dengan rapat arus yang diterapkan dan berkorelasi terhadap ukuran kristal semakin besar. Pengamatan hubungan pengaruh rapat arus terhadap proses elektrodposisi juga dilakukan oleh Fadillah *et. al* (2019) dimana bentuk kurva j-t sangat bergantung pada tegangan yang diberikan dan dicirikan oleh arus pada keadaan *steady state* (Fadillah et al. 2019). Kurva transien rapat arus menurun seiring dengan deposisi tegangan turun. Setelah 50 detik kurva cenderung konstan yang menandakan perubahan ketebalan lapisan, dan bentuk morfologi.

Proses pelapisan Ni-Cu dengan cara elektrodposisi menggunakan rapat arus konstan 15, 20, 30, 40, 50 dan 100 mA/cm² pada larutan 0,04 M CuSO₄.5H₂O sebanyak (10 g/L), 0,5 M NiSO₄.6H₂O sebanyak (131,4 g/L) dan 0,2 M Na₃C₆H₅O₇

sebanyak (58,82 g/L). Semakin tinggi rapat arus yang digunakan maka tegangan juga akan semakin tinggi. Hal ini juga diamati oleh Sarac *et. al* (2012) dengan melakukan pelapisan Ni-Cu di atas substrat gelas ITO dengan variasi tegangan (Sarac, Öksüzöğlü, and Baykul 2012). Pengamatan dari Sarac ini juga sama dengan pengamatan penelitian ini dimana semakin tinggi rapat arus akan membuat tegangan semakin negatif.

4.1.2. Efisiensi Arus dan Laju Deposisi terhadap Pengaruh Variasi Rapat Arus

Hasil efisiensi arus untuk pembuatan lapisan Ni-Cu dengan metode elektrodposisi menggunakan variasi rapat arus 15, 20, 30, 40, 50, dan 100 mA/cm² dapat diamati. Banyaknya endapan Ni-Cu pada substrat sangat dipengaruhi oleh arus listrik yang digunakan. Menurut faraday unsur yang mengendap di katoda sebanding dengan arus listrik yang digunakan. Efisiensi arus sendiri memiliki definisi perbandingan massa logam yang diendapkan di katoda terhadap massa yang terendapkan secara teoritis selama proses elektrodposisi.



Gambar 4.2 a) Pengaruh rapat arus terhadap efisiensi arus, dan b) Pengaruh rapat arus terhadap laju deposisi.

Gambar 4.2 a) menunjukkan variasi efisiensi arus rata-rata dengan pengaruh variasi rapat arus. Pada percobaan yang dilakukan mendapatkan efisiensi arus (82,55-97,95%) pada penggunaan rapat arus 15-100 mA/cm². Hasil ini dipengaruhi oleh rasio antara ion Ni²⁺ dan Cu²⁺ pada larutan elektrolit. Semakin tinggi arus yang digunakan maka akan semakin banyak Ni pada larutan. Hasil ini sama dengan yang

dilakukan oleh Goranova *et. al* (2014) semakin sedikit Cu di larutan maka akan meningkatkan efisiensi arus (Desislava Goranova, Avdeev, and Rashkov 2014).

Reaksi evolusi hidrogen merupakan penghambat Ni-Cu ke substrat. Efisiensi arus tertinggi 97% juga diperoleh oleh Deo *et. al* (2020) dalam penelitiannya dengan menggunakan rapat arus 20 mA/cm² (Deo et al. 2020). Hasil ini diperoleh dari perubahan rapat arus dari 10 ke 20 mA/cm² akibat dari laju deposisi Ni-Cu melebihi perubahan laju evolusi hidrogen sehingga efisiensi arus meningkat.

Proses elektrodposisi membutuhkan sumber arus DC untuk mengalirkan elektron dari anoda menuju ke katoda. Semakin besar kuat arus yang diberikan maka semakin banyak ion dari anoda yang akan diendapkan pada katoda. Gambar 4.2 b) merupakan hasil dari perhitungan pengaruh rapat arus terhadap laju deposisi lapisan Ni-Cu di atas substrat Al dengan cara elektrodposisi. Terlihat bahwa semakin tinggi rapat arus yang digunakan, maka semakin tinggi pula laju deposisinya. Karena dengan meningkatnya rapat arus yang dialirkan akan menyebabkan terlepasnya ion pada anoda menuju dan mengendap di katoda (Ni et al. 2019).

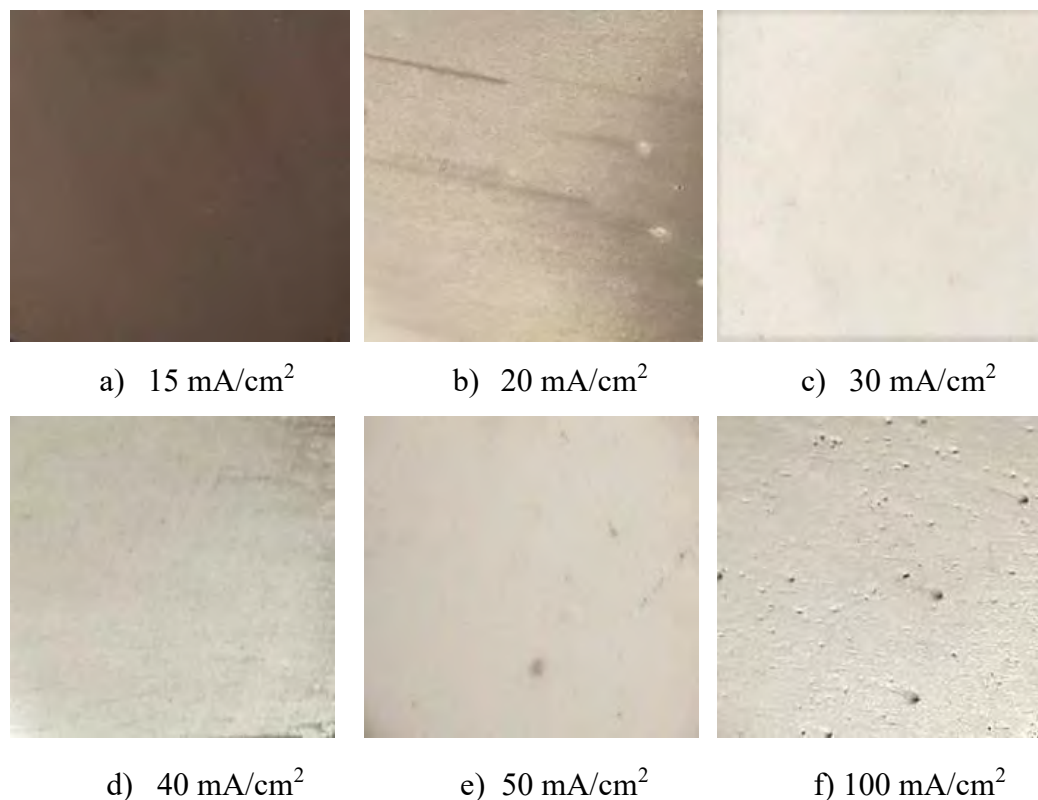
Pengamatan oleh Budi *et. al* (2020) memperlihatkan laju deposisi tertinggi diperoleh dari konsentrasi sakarin sebesar 2 g/L yaitu sebesar 8.6×10^{-2} (mg/cm².min) (Budi et al. 2020). Hasil yang diperoleh oleh Susetyo *et. al* (2021) menunjukan fenomena yang sama dengan hasil penelitian sekarang bahwa penurunan evolusi hidrogen akan memberikan efek menaiknya laju deposisi (Susetyo, Soegijono, and Yusmaniar 2021).

Soegijono *et. al* (2020) menemukan laju deposisi akan meningkat seiring dengan meningkatnya rapat arus. Pada penelitian Soegijono *et. al* (2020) ini diperoleh laju deposisi terbesar pada rapat arus 30 mA/cm² daripada 10 mA/cm² yaitu sebesar 25 µm/h. Sehingga dapat disimpulkan bahwa rapat arus sangat berpengaruh terhadap efisiensi arus dan laju deposisi (Soegijono et al. 2020).

4.1.3. Observasi Visual

Berdasarkan Gambar 4.3 terjadi gradasi warna akibat pengaruh variasi rapat arus. Pada rapat arus 15 mA/cm² menghasilkan warna gelap dan warna paling terang dihasilkan oleh rapat arus 100 mA/cm². Hasil ini sama dengan yang

diperoleh Lee and Chung (2020) dimana massa atom Cu lebih kecil akan menghasilkan warna gelap (Lee and Chung 2020). Masih menurut Lee dan Chung (2020) elektrodeposisi Ni dan Cu bersamaan tidak berdiri sendiri, namun terjadi reaksi perpindahan antara logam Ni yang diendapkan dan ion Cu yang diendapkan. Sehingga memberikan hasil visual yang berbeda tergantung dari kandungan Cu. Pelapisan Ni-Cu mempunyai beberapa tantangan dalam pembuatannya. Karena seperti diketahui Cu mempunyai potensial standar (+0,34 V) dan Ni (-0,25 V) (Li, Mei, Li, Du, et al. 2019). Diperlukan suatu agen kompleks untuk menjembatani jarak atau *gap* antara potensial Cu dengan Ni. Penggunaan trisodium sitrat bertujuan untuk mengatasi hal ini, meskipun tetap perlu dikontrol konsentrasi dari Cu.



Gambar 4.3 Citra pengamatan visual permukaan sampel Ni-Cu untuk rapat arus a) 15, b) 20, c) 30, d) 40, e) 50 dan f) 100 mA/cm².

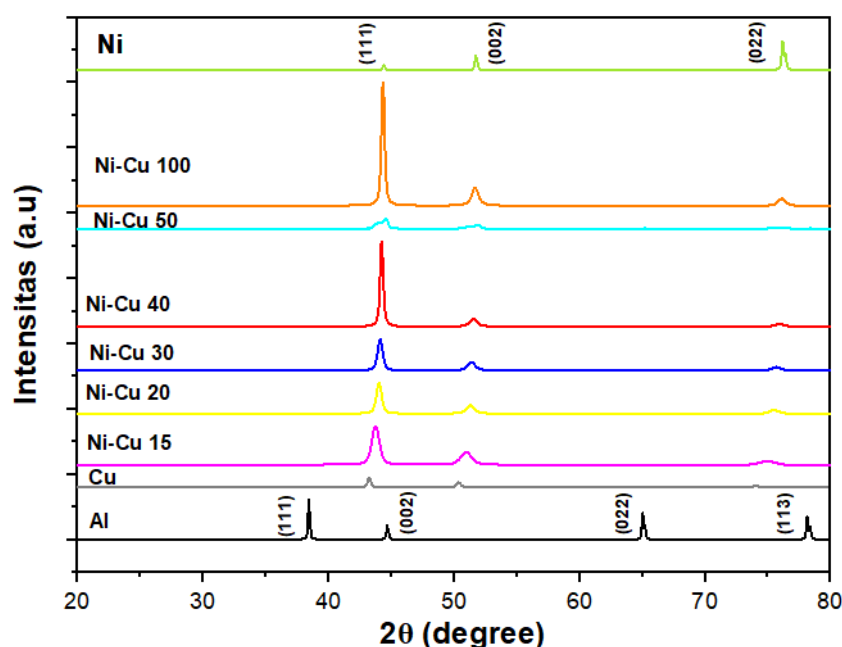
4.1.4. Hasil Analisis XRD

Gambar 4.4 memperlihatkan pola XRD untuk substrat Al, Cu, Ni, Ni-Cu 15, Ni-Cu 20, Ni-Cu 30, Ni-Cu 40, Ni-Cu 50, dan Ni-Cu 100. Puncak Cu murni pada

sudut 2θ ($43,23^\circ$) dan Ni murni 2θ ($44,39^\circ$). Berdasarkan hasil dari penelitian Pingale *et. al* (2020), penelitian ini juga menunjukkan bidang yang terbentuk pada lapisan Ni-Cu sama yaitu pada bidang (111), (002) dan (022), selain itu mempunyai struktur kristal FCC (Pingale, Belgamwar, and Rathore 2020).

Seiring dengan bertambahnya rapat arus intensitas puncak (111) mengalami peningkatan hal ini senada dengan yang ditemukan oleh (Deo *et al.* 2020). Terlihat bahwa Ni dan Cu menunjukkan kelarutan total pada temperatur ruang, semua menunjukkan fasa tunggal Ni-Cu.

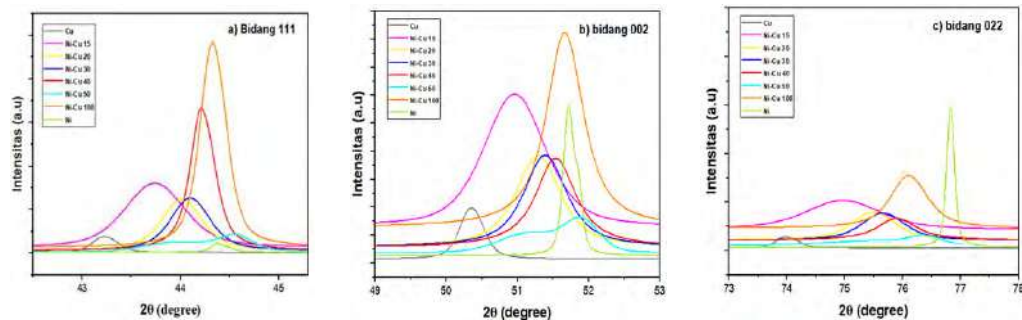
Bidang yang dibentuk berdasarkan hasil XRD pada Gambar 4.4 terdapat bidang (111), (022) dan (002). Fasa yang dibentuk merupakan fasa tunggal Ni-Cu, menurut Deo *et. al* (2020) fasa tunggal ini memperbaiki sifat korosi karena tidak ada pemisahan fasa.



Gambar 4.4 Pola difraksi XRD Ni-Cu terhadap variasi rapat arus.

Pergeseran puncak difraksi teramati pada Gambar 4.4 menuju ke arah sudut Ni karena semakin tinggi arus yang digunakan komposisi Ni semakin banyak dibandingkan dengan Cu. Pengamatan oleh Wang *et. al* (2020) yaitu dengan mengamati penurunan komposisi Cu dengan seiring menurunnya *lattice* parameter ke arah Ni (C. Wang *et al.* 2020). Hasil ini sama dengan yang diperoleh pada

penelitian ini untuk Cu murni *lattice* parameternya 3,622Å, kemudian pada sampel Ni-Cu 15 3,582 Å, Ni-Cu 20 3,560 Å, Ni-Cu 30 3,554 Å, Ni-Cu 40 3,545 Å, Ni-Cu 50 3,543 Å, Ni-Cu 100 3,536 Å dan Ni 3,531 Å.



Gambar 4.5 Pengaruh variasi rapat arus terhadap bidang-bidang XRD.

Gambar 4.5 merupakan pemisahan hasil XRD per bidang, yakni bidang (111), (002) dan (022). Jika dilihat dari Gambar 4.5 sampel Ni-Cu 100 mempunyai puncak bidang tertinggi baik bidang (111), bidang (002) dan bidang (022) dibandingkan dengan sampel lainnya. Jari-jari atom Ni lebih kecil daripada atom Cu, akibatnya dengan kenaikan Ni konstanta kisi paduan mengecil dan d_{111} mengecil. Hal ini tampak pada pergeseran puncak bidang (111) ke arah kanan.

Pengolahan *refinement* data XRD disajikan pada Tabel 4.4 dengan menggunakan *software* MAUD. Menurut Marrone *et. al* (2013) *refinement* rietveld dapat diterima dengan syarat $GoF < 4\%$ dan $Rwp < 20\%$ (Marrone 2013). Pada penelitian ini nilai Rwp diperoleh dibawah 10% dan GoF dibawah 4%. Jika dilihat dari Gambar 4.4 maka hampir semua sampel menunjukkan *prefer orientation* bidang (111). Selain itu juga pada pelapisan Ni-Cu ini memiliki struktur kristal FCC dan *space grup* Fm-3m.

Perhitungan ukuran kristal dengan menggunakan persamaan 3.6 diperoleh semakin tinggi arus yang digunakan maka ukuran kristal juga semakin tinggi. Pada Tabel 4.4 ukuran kristal Ni sebesar 40,91 nm, menurut (Alizadeh and Safaei 2018) ukuran Ni lebih besar dari pada paduan Ni-Cu. Perhitungan *lattice strain* menggunakan persamaan 3.8. Terlihat pada Gambar 4.6 semakin tinggi ukuran kristal, semakin kecil nilai *lattice strain*-nya. Menurut Pingale *et. al* (2020) *lattice strain* adalah cacat seperti rongga, kekosongan dan dislokasi. (Pingale, 2020).

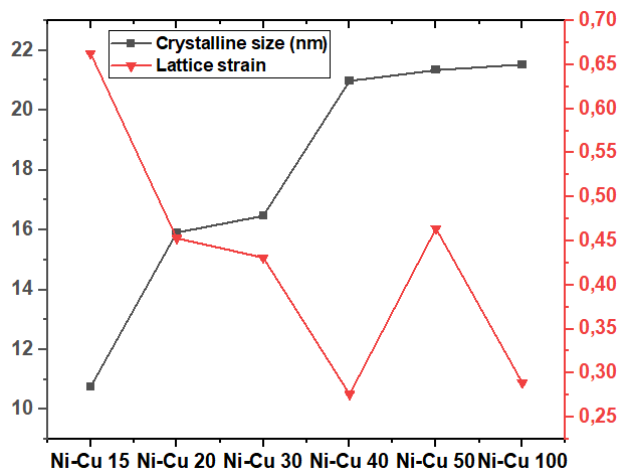
Tabel 4.4 Hasil Refinement XRD Ni-Cu variasi rapat arus

Sampel	Struktur	Space	Lattice konstan	Parameter			Rwp	GOF	Lattice
				Volum	d ₍₁₁₁₎	Crystal lite			
	Kristal	Group	(Å) a = b = c	(Å ₃)	(Å)	Size	(100%)		Strain
Al	Cubic FCC	Fm-3m	4,052	66,548	2,339	43,79	21,146	5,08	0,166
Cu	Cubic FCC	Fm-3m	3,622	47,524	2,091	27,93	7,088	1,36	0,288
Ni-Cu 15	Cubic FCC	Fm-3m	3,582	45,975	2,068	10,81	3,640	1,94	0,663
Ni-Cu 20	Cubic FCC	Fm-3m	3,560	45,152	2,055	15,91	4,484	1,72	0,453
Ni-Cu 30	Cubic FCC	Fm-3m	3,554	44,909	2,052	16,47	5,394	2,06	0,431
Ni-Cu 40	Cubic FCC	Fm-3m	3,545	44,557	2,046	20,98	5,139	2,03	0,276
Ni-Cu 50	Cubic FCC	Fm-3m	3,543	44,482	2,045	21,29	2,619	0,58	0,464
Ni-Cu 100	Cubic FCC	Fm-3m	3,536	44,237	2,042	21,53	4,490	2,53	0,289
Ni	Cubic FCC	Fm-3m	3,531	44,039	2,038	40,91	6,986	1,82	0,193

Jika dilihat dari tren, ukuran kristal yang tinggi semakin kecil nilai *lattice strain*-nya. Namun, pada sampel Ni-Cu 50 ukuran kristal sedikit naik karena pada sampel tersebut terdapat dua puncak sehingga mempengaruhi dalam perhitungan *lattice strain*.

Hubungan antara variasi rapat arus dengan ukuran kristal diamati juga oleh Goranova *et. al* (2016), perubahan rapat arus dari 1 menuju 20 mA/cm² dapat menurunkan ukuran kristal dari ukuran 24 nm menjadi 12 nm (D. Goranova et al. 2016). Hasil penelitian yang dilakukan oleh Sarac, Öksüzöğlü, dan Baykul (2012) menunjukkan semakin kecil ukuran kristal maka akan memberikan kontribusi pada morfologi permukaan yang halus dan juga memberikan kontribusi dalam pengembangan *microhardness* (Sarac, Öksüzöğlü, and Baykul 2012). Fenomena lainnya yang diperoleh oleh Wang *et. al* (2020) dimana seiring bertambahnya komposisi Ni akan menurunkan ukuran kristal, namun pada sampel Cu₁₉Ni₈₁ ukuran kristalnya tinggi 28 nm (C. Wang et al. 2020). Hasil yang mirip dengan Wang pada penelitian ini dimana semakin tinggi rapat arus yang digunakan maka semakin tinggi ukuran kristalnya dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Orientasi kristal lapisan Ni-Cu dapat dianalisis dengan koefisien tekstur untuk melihat bidang mana yang tumbuh dan tidak. Sehingga setiap bidang (111), (002) dan (022) hasil analisis XRD dari pelapisan Ni-Cu dengan variasi rapat arus dapat diketahui. Analisis tersebut dengan menggunakan persamaan (3.7) yang kemudian disajikan pada Tabel 4.5.



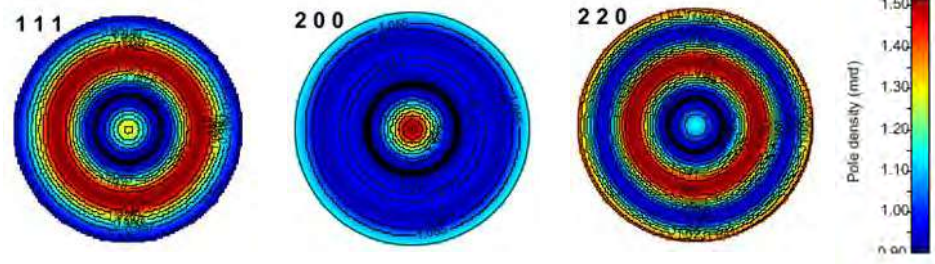
Gambar 4.6 Hubungan *crystalline size* dan *lattice strain* terhadap variasi rapat arus, menunjukkan semakin tinggi *crystalline size* semakin kecil *lattice strain*.

Menurut Seakr (2017) jika koefisien tekstur lebih dari 1 maka dapat diartikan bidang tersebut tumbuh, sebaliknya jika hasil dari koefisien tersebut bernilai kurang dari 1 maka dianggap bidang tersebut tidak terjadi pertumbuhan (SEAKR 2017). Pada perhitungan analisis koefisien tekstur pada penelitian ini terlihat dari Tabel 4.5, dari semua sampel Ni-Cu terlihat bidang (111) mengalami pertumbuhan dan hal ini juga dapat dilihat dari hasil Analisis XRD pada Gambar 4.4. Sementara itu pada bidang lainnya yaitu bidang (002) dan (022) semakin turun. Hal ini juga diperoleh Geramipour *et. al* (2021) pada penelitiannya yang terlihat bahwa bidang (111) mengalami pertumbuhan (Geramipour, 2021).

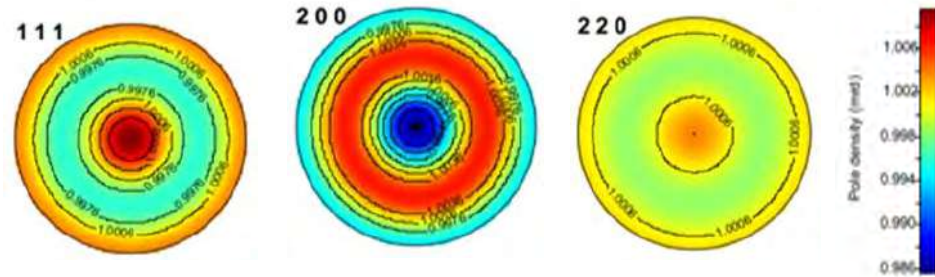
Tabel 4.5 Koefisien tekstur Ni-Cu

Sampel	M(hkl)		
	(111)	(002)	(022)
Ni-Cu 15	1,12	0,86	0,77
Ni-Cu 20	1,17	0,74	0,81
Ni-Cu 30	1,18	0,74	0,78
Ni-Cu 40	1,48	0,34	0,32
Ni-Cu 50	1,08	0,88	0,89
Ni-Cu 100	1,38	0,48	0,47

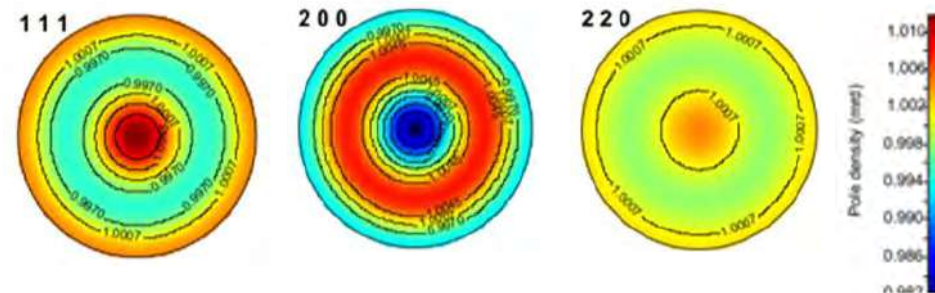
Cu



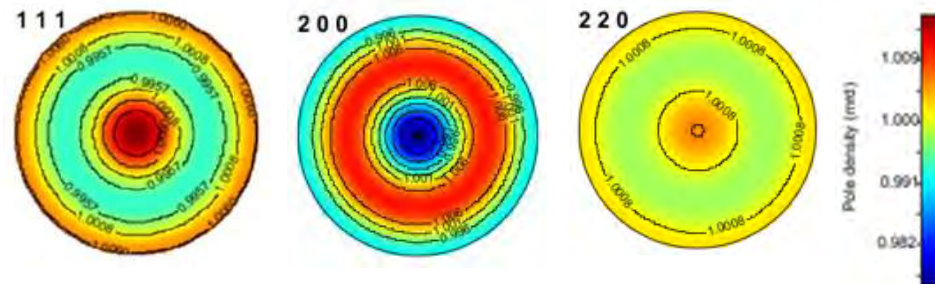
Ni-Cu 15



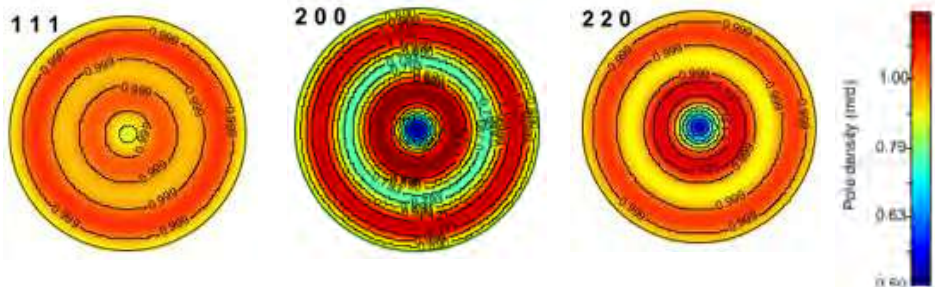
Ni-Cu 20

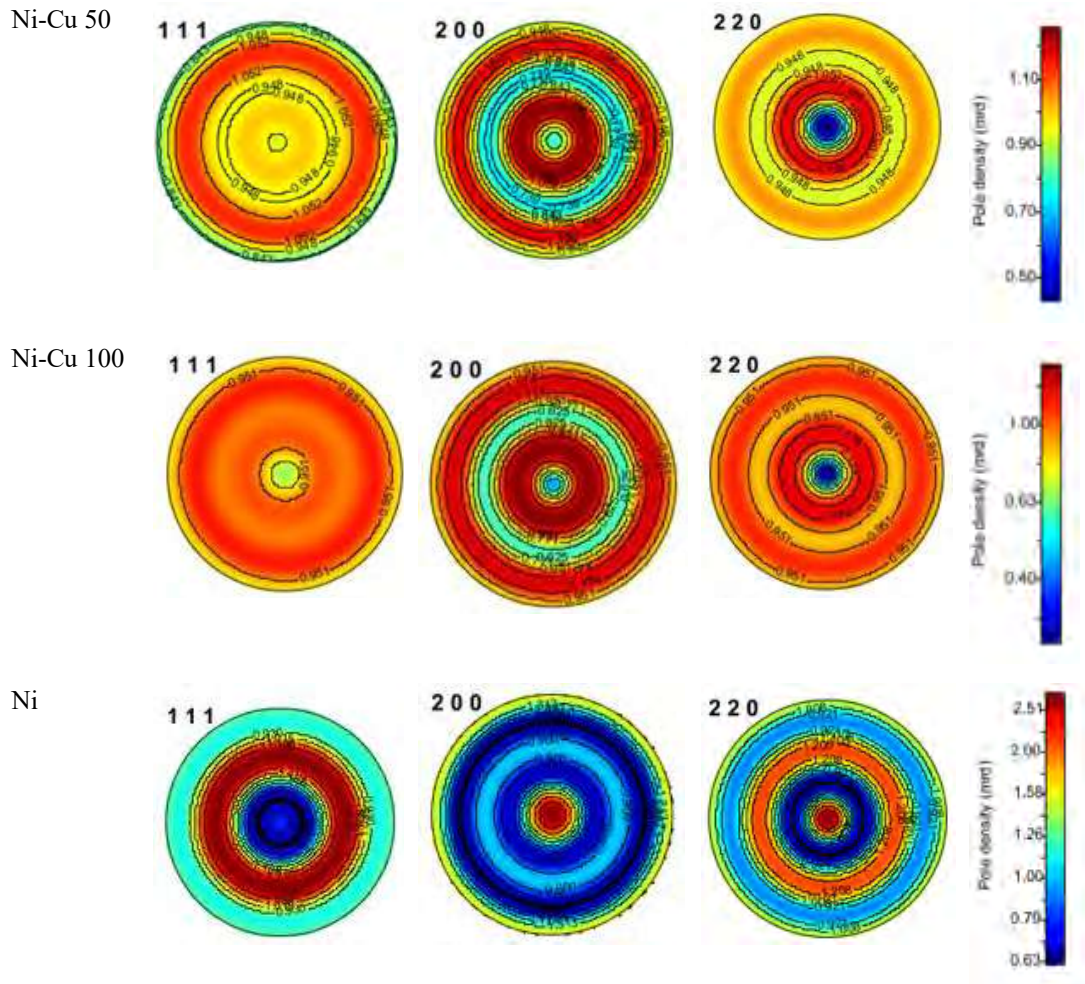


Ni-Cu 30



Ni-Cu 40





Gambar 4.7 Grafik analisis *Pole figure* rekonstruksi hasil rietveld perangkat lunak MAUD menunjukkan sampel paduan Ni-Cu memiliki orientasi kristal yang dominan pada bidang (111).

Gambar 4.7 merupakan hasil *pole figure* rekonstruksi yang diperoleh dari fungsi distribusi (ODF). Analisis tekstur dilakukan dengan menggunakan *pole figure* rekonstruksi (111), (200) dan (220). Dari *pole figure* rekonstruksi terlihat jelas butir kristalit terorientasi pada bidang (111) sangat kuat yang dapat dilihat dari distribusi warna atau *multiple random distribution*. Pada sampel Ni-Cu terlihat adanya kontur yang kuat pada pusat lingkaran dengan warna yang cerah. Adanya perbedaan tekstur akibat pengaruh variasi rapat arus dapat terlihat dari intensitas warna. Pada sampel Ni-Cu 15 nilai maksimum berada pada 1,0096 mrd, sedangkan intensitas tertinggi pada sampel Ni-Cu 100 dimana intensitas tertinggi berada pada 1,4480 mrd. Hasil ini juga diperoleh oleh Meng *et. al* (2020) dimana melakukan penelitian pelapisan Ni-Cr-Gr dengan variasi rapat arus (Meng *et al.* 2020).

Perubahan variasi rapat arus memperlihatkan perubahan tekstur dan orientasi kristalit yang kuat dilihat dari kontur pada pusat lingkaran dengan warna yang cerah. Sehingga dapat diperoleh kesimpulan dengan analisis tekstur menggunakan rekonstruksi *pole figure* adanya perbedaan tekstur akibat pengaruh variasi rapat arus dan butir kristalit terorientasi pada bidang (111).

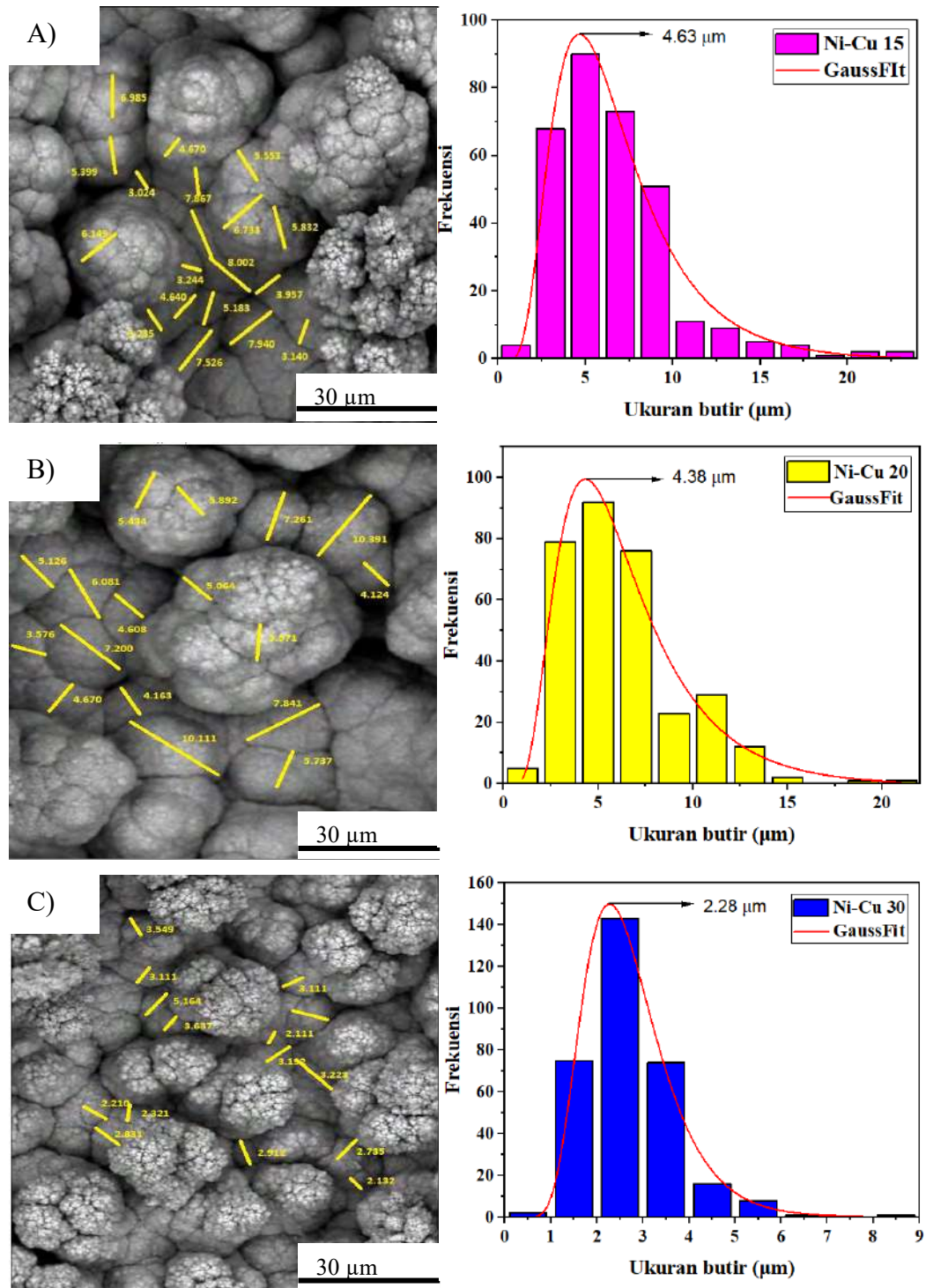
Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa pelapisan Ni-Cu terhadap variasi rapat arus dapat menggeser sudut 2θ ke arah kanan, menurunkan *lattice* parameter, menurunkan *lattice strain*, *prefer orientation* (tekstur) pada bidang (111) dan meningkatkan ukuran kristal.

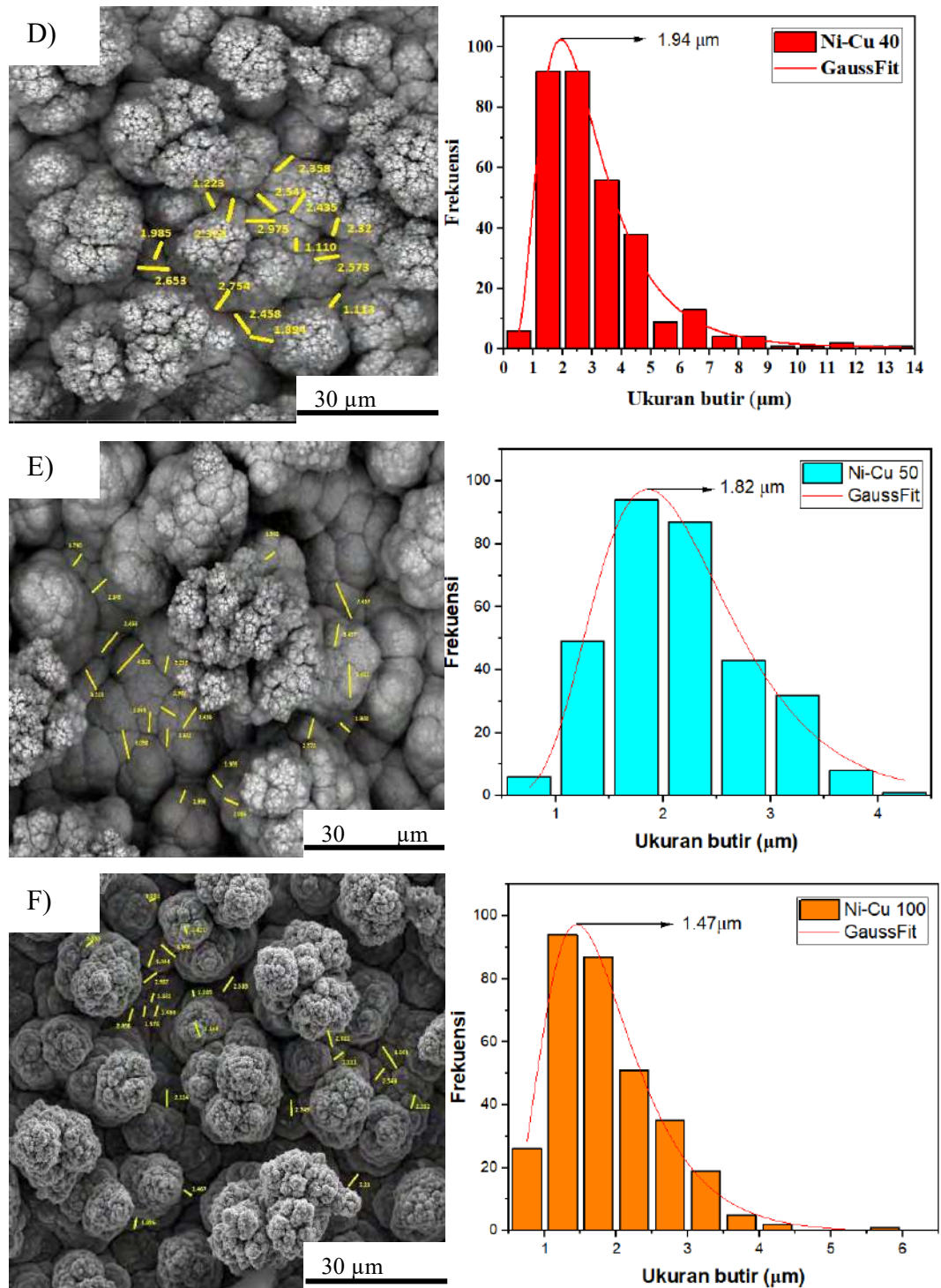
4.1.5. Hasil Analisis Morfologi, EDS dan Crosss Section terhadap Variasi Rapat Arus

Proses oksidasi adalah proses pelepasan ion dari anoda menuju katoda. Proses reduksi dapat terlihat dari terbentuknya endapan Ni-Cu di katoda. Karena reduksi di katoda berlangsung cepat maka endapan Ni-Cu di katoda pun cepat terbentuk. Kualitas endapan yang baik tergantung dari penggunaan rapat arus. Penggunaan rapat arus yang besar perlu mendapatkan perhatian karena pada proses reduksi terjadi pelepasan gas hidrogen. Karena jika pelepasan hidrogen ini cukup besar maka akan menghasilkan lapisan pecah-pecah dan tidak teratur.

Pada proses pelapisan Ni-Cu menggunakan variasi rapat arus yakni dimulai dengan rapat arus 15 mA/cm^2 sampai arus yang paling besar adalah 100 mA/cm^2 . Pengamatan morfologi dan komposisi kimia Ni-Cu menggunakan karakterisasi SEM-EDS. Gambar dari SEM selanjutnya ditentukan ukuran grain dengan menggunakan *image-J* dan disajikan pada Gambar 4.8.

Menurut Alizadeh dan Safaei (2018) struktur morfologi Ni berbentuk bulat (nodular) mirip seperti tonjolan (Alizadeh and Safaei 2018). Pada Gambar 4.8 rapat arus mempengaruhi bentuk dari morfologi paduan Ni-Cu. Pada rapat arus rendah lebih halus dan kompak, sementara itu semakin tinggi rapat arus tonjolan semakin banyak dan cenderung kasar. Hasil ini juga dilaporkan oleh Lee dan Chung (2020) semakin tinggi rapat arus bentuk morfologinya seperti bunga kol (*cauliflower*) (Lee and Chung 2020).





Gambar 4.8 Citra morfologi SEM sampel paduan Ni-Cu (kiri) dan histogram distribusi ukuran butir (kanan).

Menurut Fukunaka, Doi, dan Kondo (1990) morfologi permukaan dikelompokkan menjadi tiga kelompok (Fukunaka, Doi, and Kondo 1990). Kelompok ini berdasarkan potensial yang digunakan pada saat elektrodeposisi.

Pengelompokan tersebut adalah: *faceted structure* (0-0,1V), *columnar dendrit* atau *spheroidal* (0,1-0,35V) dan *spongi dendrite* (>0,35V). Jika dilihat dari Gambar 4.1 dimana tegangan yang terbentuk berada pada interval (0,65 – 2,30 V) maka tipikal morfologi paduan Ni-Cu adalah *spongi dendrite* dan hasil ini sama dengan yang diperoleh Goranova *et.al* (2016) (D. Goranova et al. 2016).

Pengukuran ukuran diameter rata-rata grain menggunakan *image-J*. Penyajian perhitungan ukuran diameter grain rata-rata disajikan pada Tabel 4.6. Hasil perhitungan menunjukkan penurunan diameter rata-rata ukuran grain. Perhitungan distribusi rata-rata ukuran grain melalui pendekatan distribusi Gaussian menggunakan persamaan $y(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} * \exp\left(-\frac{1}{2} * \frac{(x-\mu)^2}{\sigma^2}\right)$ dengan σ adalah simpangan baku dan μ adalah rata-rata.

Tabel 4.6 Hasil perhitungan ukuran grain rata-rata

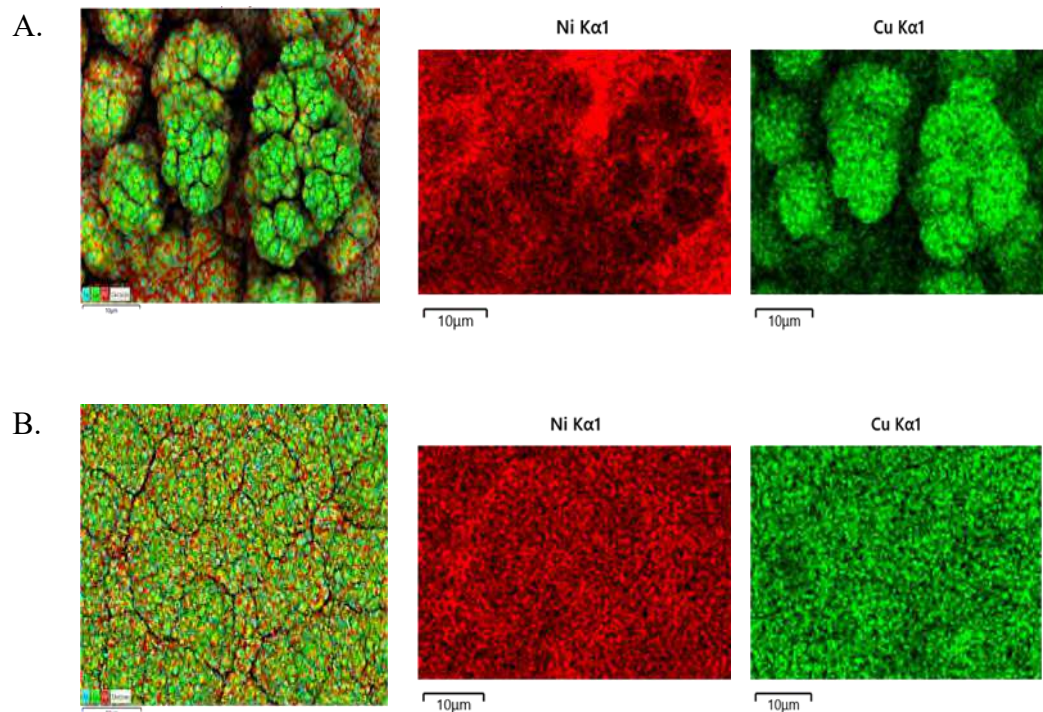
Sampel	Diameter rata-rata (μm)
Ni-Cu 15	4,63
Ni-Cu 20	4,38
Ni-Cu 30	2,28
Ni-Cu 40	1,94
Ni-Cu 50	1,82
Ni-Cu 100	1,47

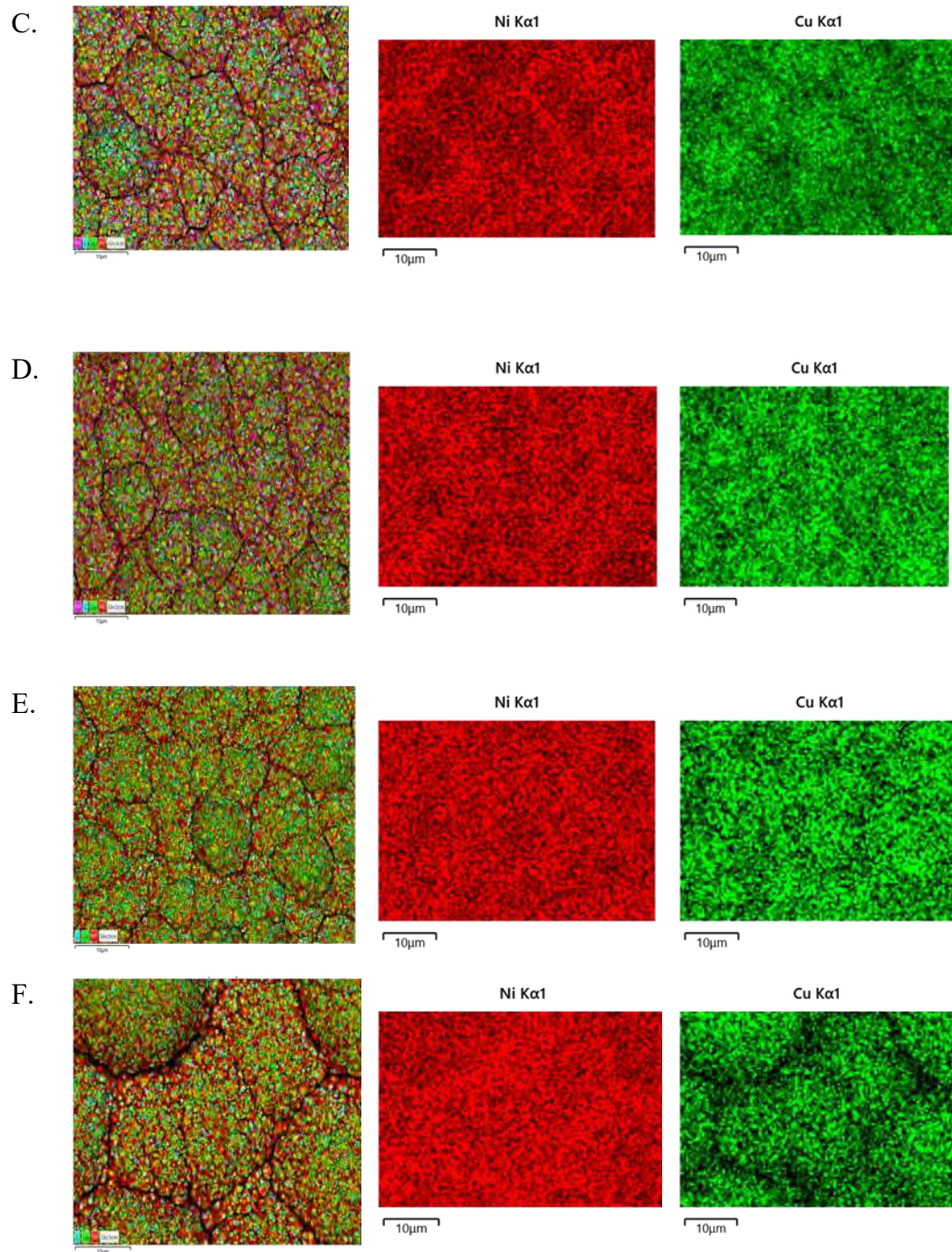
Komposisi kimia sampel paduan Ni-Cu dapat diperoleh dengan EDS. Tabel 4.7 menyajikan hasil Analisis EDS, dimana terlihat semakin tinggi rapat arus maka komposisi Ni akan semakin banyak dibandingkan Cu. Hasil ini akan terlihat jelas pada observasi visual yang disajikan pada Gambar 4.3. Paduan Ni-Cu 15 mempunyai komposisi berat (wt%) Cu lebih banyak dibandingkan Ni, sehingga jika diamati menghasilkan warna yang lebih gelap. Sementara itu paduan Ni-Cu 100 menghasilkan warna yang lebih terang karena komposisi berat (%wt) Ni lebih banyak. Hasil ini sama dengan yang diperoleh (Lee and Chung 2020) dimana massa atom Cu lebih kecil akan menghasilkan warna gelap.

Tabel 4.7 Komposisi kimia Ni-Cu (%wt)

Sampel	<i>Weight</i>	<i>Weight</i>
	<i>Conc.</i>	<i>Conc.</i>
	Cu	Ni
Ni-Cu 15	54,95	45,05
Ni-Cu 20	30,36	69,64
Ni-Cu 30	29,80	70,20
Ni-Cu 40	19,64	80,36
Ni-Cu 50	15,97	84,03
Ni-Cu 100	12,90	87,10

Gambar 4.9 menyajikan analisis *mapping* yang merupakan pemetaan unsur yang terdapat dalam paduan Ni-Cu. Dari gambar tersebut, menunjukkan bahwa persebaran unsur Ni diwakilkan dengan berwarna merah dan Cu berwarna hijau.





Gambar 4.9 Citra EDS *mapping* sampel paduan A. Ni-Cu 15, B. Ni-Cu 20, C. Ni-Cu 30, D. Ni-Cu 40, E. Ni-Cu 50 dan F. Ni-Cu 100.

Analisis pemetaan unsur pada Gambar 4.9 menunjukkan semua pelapis terdiri dari Ni dan Cu. Pada sampel Ni-Cu 15 terlihat paduan Ni dan Cu belum merata, namun seiring dengan bertambahnya rapat arus paduan Ni dan Cu nampak merata

pada permukaan sampel. Hal ini teramati juga dari hasil XRD bahwa adanya pergeseran dari Cu ke Ni sehingga Ni mendominasi permukaan sampel. Hasil ini juga diamati oleh Geramipour *et. al* (2021) bahwa Ni dan Cu terdistribusi secara merata pada permukaan (Geramipour, 2021) .

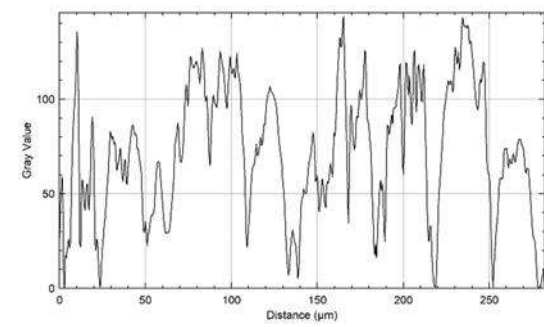
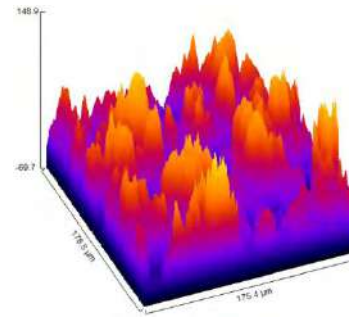
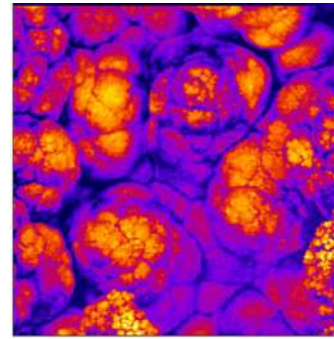
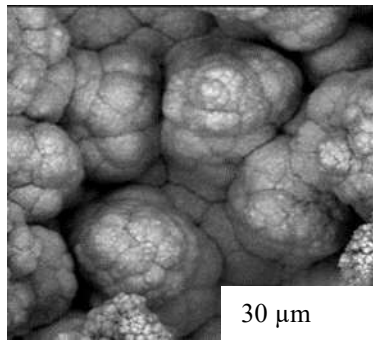
Berdasarkan Gambar 4.10, terlihat bahwa permukaan sampel paduan Ni-Cu memiliki citra gambar yang berbeda. Citra gambar dari SEM yang dihasilkan berbeda-beda karena proses sintesis variasi rapat arus yang diterapkan. Untuk memperoleh informasi yang detail terkait pola citra yang dihasilkan, maka digunakan perangkat lunak *image-J* untuk mengolah citra gambar dari SEM.

Hasil pengolahan citra gambar SEM dengan menggunakan perangkat lunak *image-J* untuk semua sampel paduan Ni-Cu memperlihatkan semakin tinggi rapat arus semakin kasar permukaan. Kekasaran atau *roughness* secara khusus didefinisikan sebagai tingkat ketidakhalusan bentuk yang muncul sebagai hasil dari proses produksi atau sintesis. Besaran dari kekasaran diukur dengan menggunakan nilai rata-rata kekasaran (Ra). Ra diartikan sebagai nilai rata-rata aritmatika dari penyimpangan profil kekasaran terhadap garis tengah rata-rata. Hubungan antara *distance* (μm) dengan *gray value* dari permukaan masing-masing sampel paduan Ni-Cu menunjukkan *gray value* mengalami fluktuasi seiring dengan semakin besarnya *distance* (μm).

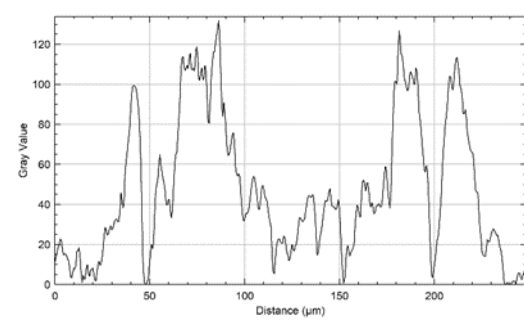
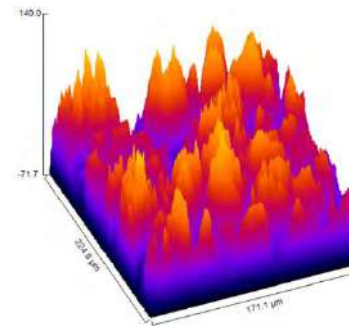
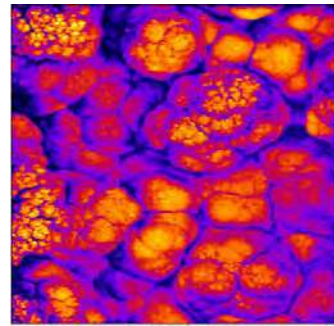
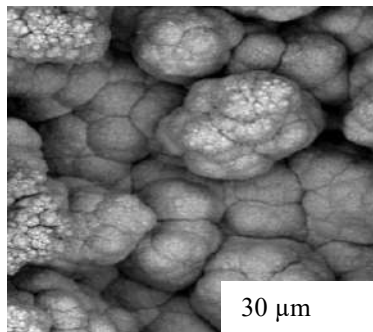
Tabel 4.8 Nilai kekasaran rata-rata paduan Ni-Cu dari SEM

Sampel	<i>Roughness Average</i> (Ra) μm
Ni-Cu 15	25,84
Ni-Cu 20	27,47
Ni-Cu 30	27,54
Ni-Cu 40	32,93
Ni-Cu 50	33,73
Ni-Cu 100	36,80

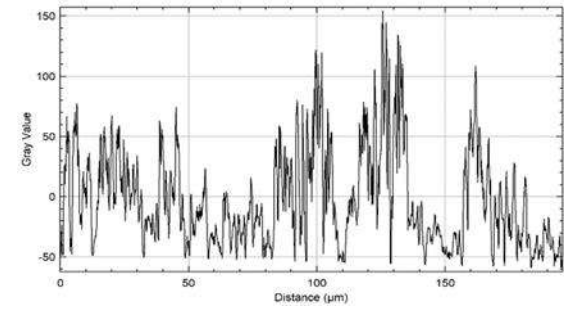
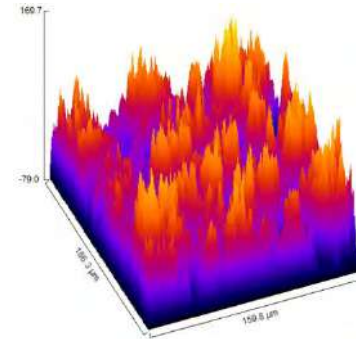
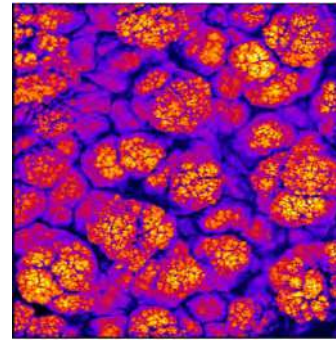
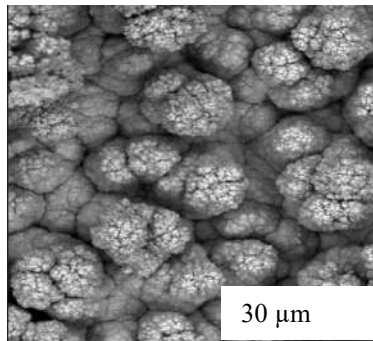
Dari Tabel 4.8 dapat dilihat bahwa sampel Ni-Cu 100 memiliki nilai *Roughness Average* (Ra) paling tinggi yakni sebesar 36,80 μm . Sehingga sampel Ni-Cu 100 merupakan sampel yang memiliki permukaan yang paling tidak rata.



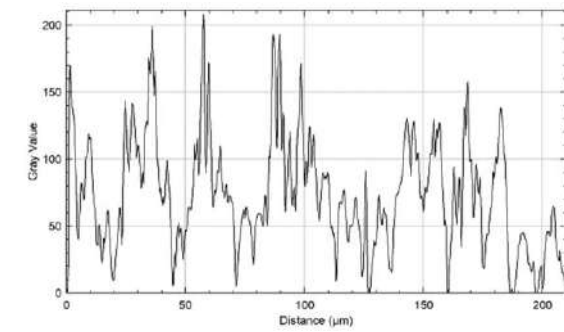
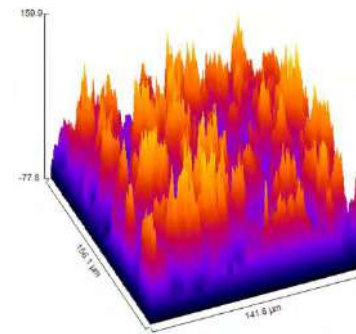
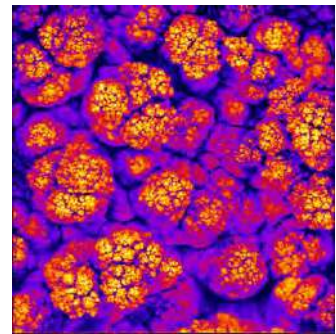
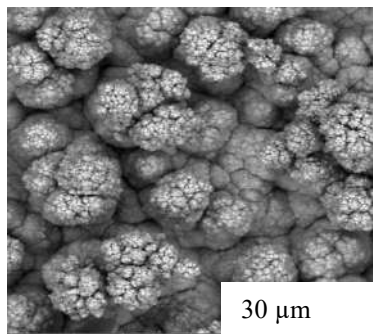
a) Ni-Cu 15



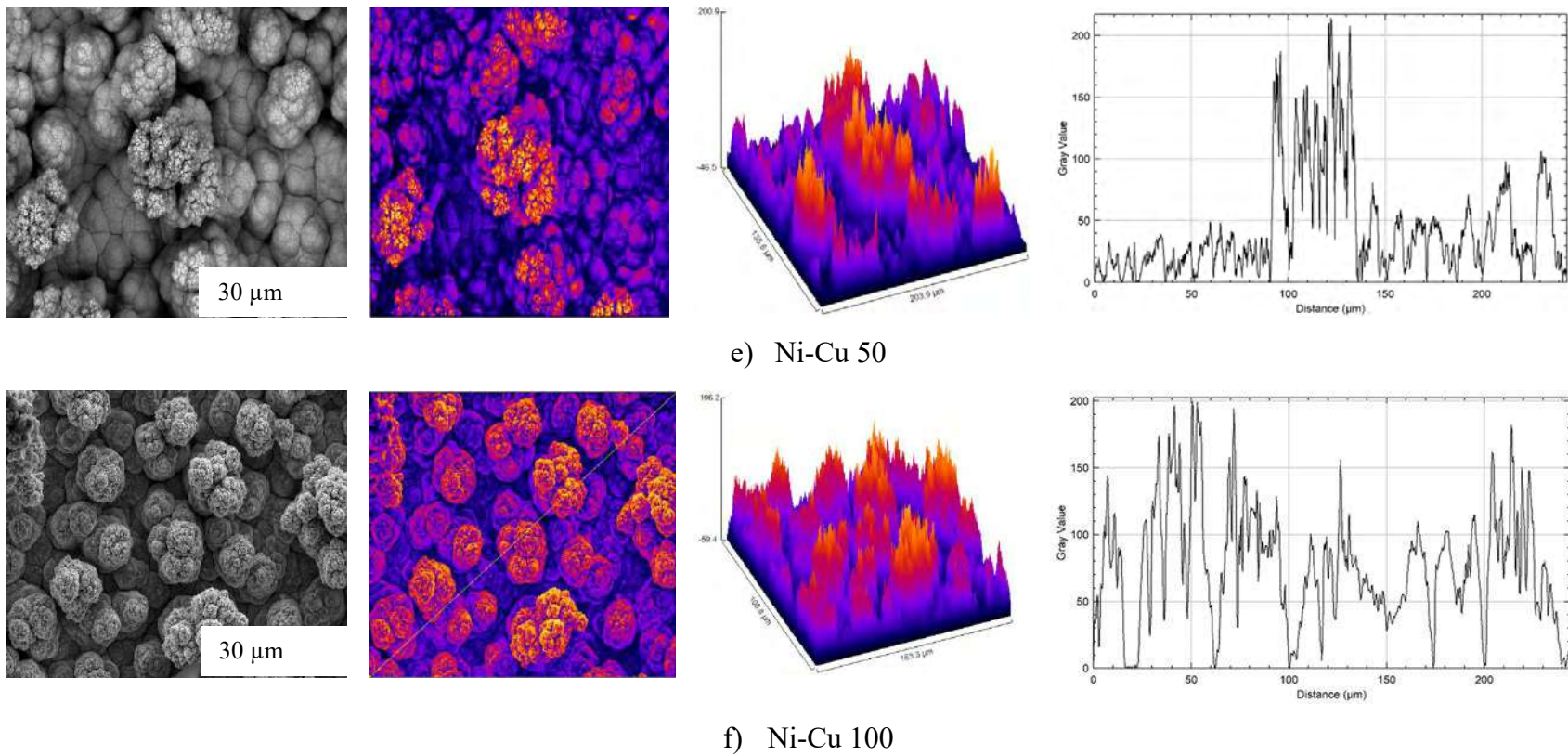
b) Ni-Cu 20



c) Ni-Cu 30

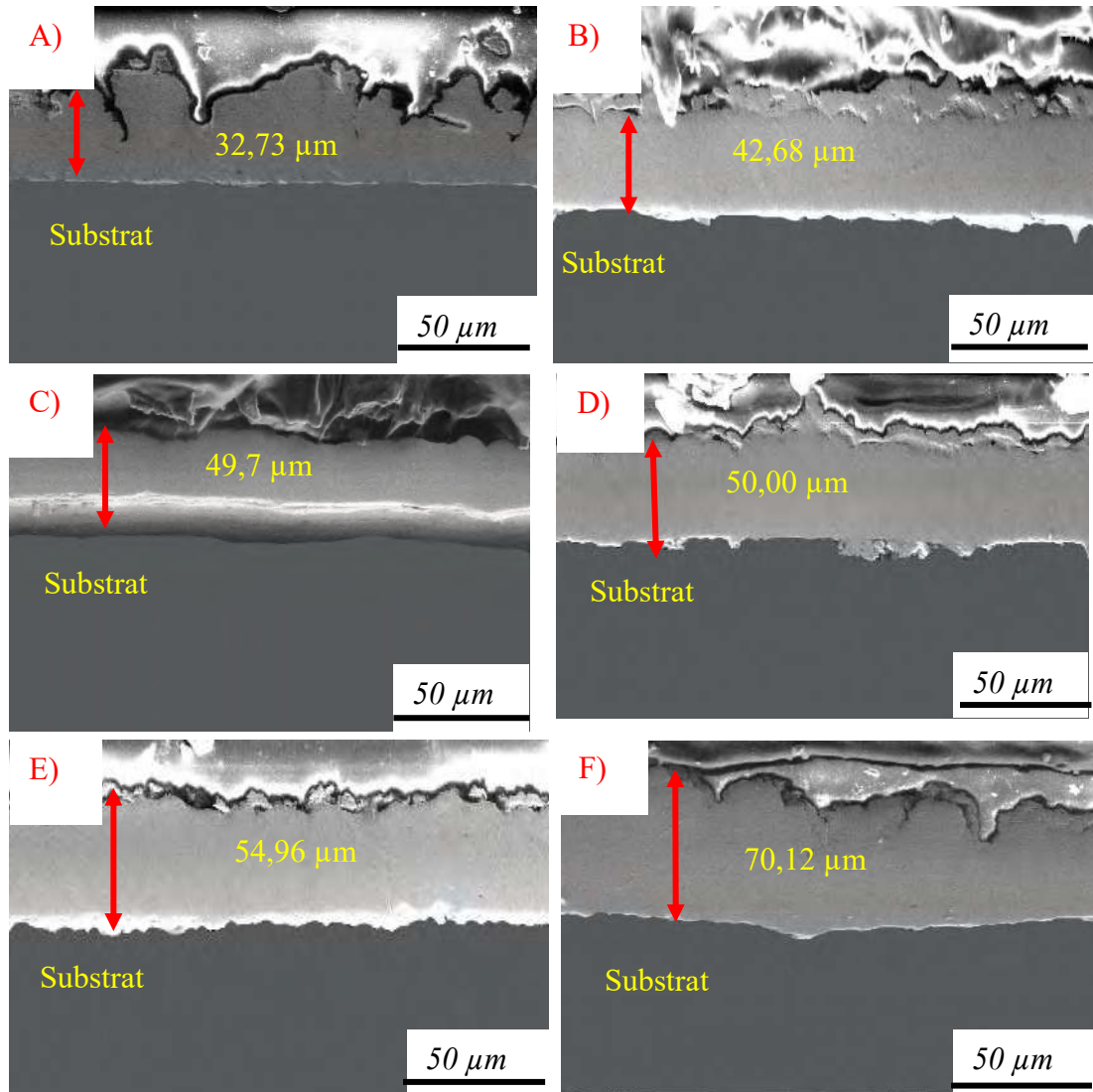


d) Ni-Cu 40



Gambar 4.10 Analisis kekasaran permukaan sampel a) Ni-Cu 15, b) Ni-Cu 20, c) Ni-Cu 30, d) Ni-Cu 40, e) Ni-Cu 50, f) Ni-Cu 100 pada citra SEM 2D, grafik 3D, dan grafik *gray value* terhadap *distance* (kiri-kanan).

Keberhasilan pelapisan dapat dilihat dari tampang lintang yang dipindai dengan SEM untuk mengamati efek dari rapat arus pada proses pelapisan Ni-Cu. Gambar 4.11 menunjukkan foto tampang lintang dari sampel Ni-Cu. Hasil pelapisan menunjukkan lapisan cukup melekat pada substrat dan seragam.



Gambar 4.11 Pengaruh variasi rapat arus menghasilkan lapisan yang semakin tebal dilihat dari tampang lintang tiap sampel A) Ni-Cu 15, B) Ni-Cu 20, C) Ni-Cu 30, D) Ni-Cu 40, E) Ni-Cu 50, dan F) Ni-Cu 100 mA/cm².

Ketebalan pelapisan yang diperoleh dari tampang lintang SEM menunjukkan hasil yang bervariasi. Ketebalan tersebut bervariasi dari 32,73 sampai dengan 70,12 μm . Pada penelitian ini ketebalan lapisan dipengaruhi oleh efisiensi arus dan laju deposisi. Hasil ketebalan ini bervariasi sesuai dengan teori, dimana semakin tinggi rapat arus maka ketebalan akan meningkat. Hasil ini juga diperoleh oleh Syamsuir *et. al* (2023) dimana semakin tinggi efisiensi arus dan laju deposisi ketebalan juga semakin meningkat (Syamsuir et al. 2023). Pada penelitian ini menggunakan waktu pelapisan secara teori adalah 1 jam, maka ketebalan secara teori pada penelitian ini disajikan pada Tabel 3.2. Hasil ketebalan aktual dari hasil tampang lintang (*cross section*) tidak sama dengan ketebalan secara teoritis. Hal ini disebabkan pada perhitungan teoritis tidak mempertimbangkan konsentrasi larutan, jarak antara anoda-katoda, luas area anoda dan efisiensi katoda. Sehingga terdapat perbedaan antara hasil aktual dari data tampang lintang dengan ketebalan secara teori.

Dari analisis morfologi dapat disimpulkan pola yang dihasilkan dari analisis foto SEM tidak sama dengan pola yang dihasilkan oleh XRD, karena sampai saat ini dari penelusuran literatur belum dijumpai korelasi antara ukuran kristal (XRD) dan ukuran grain pada sampel paduan Ni-Cu. Selain itu semakin tinggi rapat arus yang digunakan mengakibatkan jumlah Ni juga semakin banyak dan semakin tebal lapisan. Pengamatan SEM-EDS menunjukkan distribusi unsur Ni dan Cu merata di atas permukaan. Analisis kekasaran dengan menggunakan *image-J* menunjukkan sampel Ni-Cu 100 paling kasar.

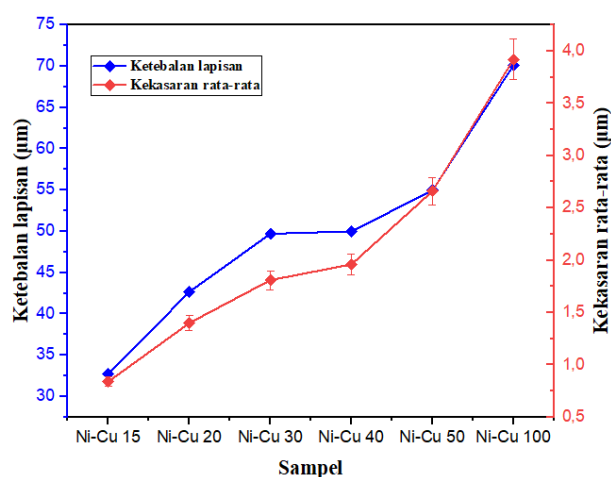
4.1.6. Hasil Analisis Kekasaran Terhadap Variasi Rapat Arus

Kekasaran permukaan adalah hasil dari proses pemesinan pada permukaan benda kerja. Ini mengacu pada tingkat variasi rata-rata aritmetika dari garis tengah permukaan tersebut. Definisi ini digunakan untuk mengukur nilai rata-rata kekasaran permukaan dan menentukan sejauh mana permukaan tersebut kasar atau halus. Tabel 4.9 merupakan hasil pengujian kekasaran permukaan pelapisan Ni-Cu dengan variasi rapat arus.

Tabel 4.9 Hasil perhitungan kekasaran Ni-Cu sebagai fungsi rapat arus

No	Nama Sampel	Hasil Pengukuran					<i>Roughness Average (Ra)</i> μm
		1	2	3	4	5	
1	Ni-Cu 15	0,87	0,79	0,87	0,82	0,84	0,84
2	Ni-Cu 20	1,39	1,4	1,4	1,41	1,4	1,40
3	Ni-Cu 30	1,89	1,86	1,86	1,83	1,83	1,81
4	Ni-Cu 40	1,97	1,97	1,96	1,96	1,96	1,96
5	Ni-Cu 50	2,27	2,77	2,76	2,75	2,74	2,66
6	Ni-Cu 100	4,02	3,95	3,89	3,89	3,86	3,92

Pengukuran kekasaran dilakukan pada permukaan sampel dengan lima titik pengukuran. Berdasarkan Tabel 4.9 semakin tinggi rapat arus, maka kekasaran juga semakin tinggi. Hasil kekasaran variasi rapat arus pada paduan Ni-Cu berada pada range $0,84 \mu\text{m} - 3,92 \mu\text{m}$. Semakin kasar permukaan, maka ketebalan dari lapisan juga semakin meningkat seperti ditunjukkan pada Gambar 4.12. Hal ini juga sama diamati oleh El Mahallawy *et. al* (2021), bahwa kekasaran permukaan meningkat dengan meningkatnya ketebalan lapisan (Mahallawy, Shoeib, and Abouelenain 2011).



Gambar 4.12 Akibat pengaruh rapat arus menghasilkan ketebalan dan kekasaran semakin meningkat.

4.1.7. Hasil Analisis Kekerasan Terhadap Variasi Rapat Arus

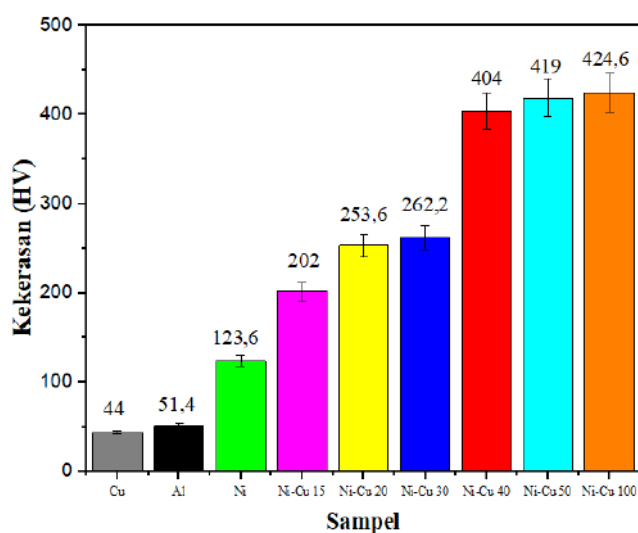
Kekerasan merupakan ketahanan material untuk membatasi perubahan bentuk plastis. Hasil akhir dari proses pelapisan elektrodposisi Ni-Cu adalah

meningkatnya kekerasan hasil pelapisan. Suatu proses pelapisan dikatakan berhasil apabila mampu meningkatkan sifat barang yang dilapisi serta dapat berguna dengan baik. Mendapatkan hasil kekerasan lapisan dilakukan menggunakan alat uji kekerasan Vickers dengan bahan yang terbuat dari intan dan berbentuk piramid bujur sangkar.

Tabel 4.10 Perhitungan nilai kekerasan Al

Sampel	Pengambilan data ke					Rata-rata (HV)	Keterangan
	1	2	3	4	5		
	52	52	51	51	51	51,4	Vickers Load: 100gf, 10 detik

Jika dilihat dari nilai rata-rata pengukuran kekerasan dengan metode vicker diperoleh kekerasan sebesar 51,4 HV yang disajikan pada Tabel 4.10. Nilai kekerasan Al yang digunakan lebih tinggi dibandingkan dengan Al murni yakni sebesar 167 MPa atau setara dengan 17,04 HV. Hal ini karena Al yang digunakan berupa paduan Al dengan komposisi unsur ($Mg = 1,49\%$; $Fe = 1,63\%$; $Al = 96,88\%$) pada pengujian XRF.



Gambar 4.13 Hasil perhitungan kekerasan Ni-Cu terhadap pengaruh variasi rapat arus.

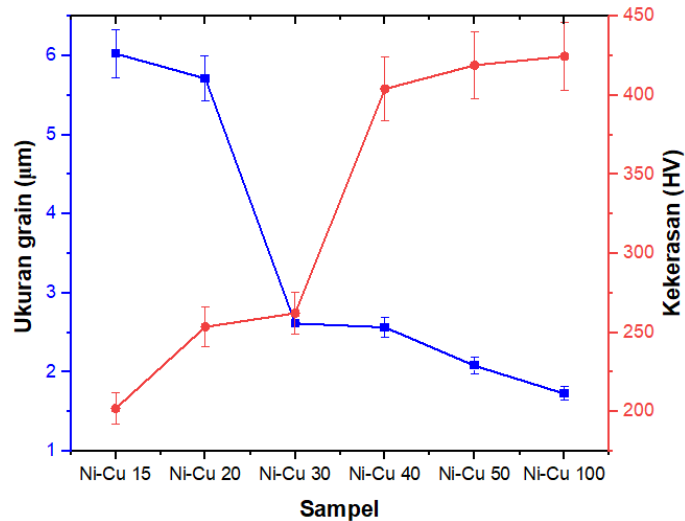
Pengujian dengan metode kekerasan mikrovicker diperoleh 202 HV pada rapat arus 15 mA/cm² dan tertinggi 424,6 HV pada rapat arus 100 mA/cm². Hasil ini dipengaruhi oleh ukuran butir yang semakin kecil seiring dengan bertambahnya

rapat arus yang digunakan. Penelitian yang dilakukan oleh Alizadeh dan Safaei (2018) memperlihatkan bahwa kekerasan Ni murni jauh lebih kecil dibandingkan dengan paduan Ni-Cu (Alizadeh and Safaei 2018). Nilai kekerasan Ni murni sebesar 245 HV dan paduan Ni-Cu sebesar 331 HV dengan rapat arus sebesar 20 mA/cm².

Pingale *et. al* (2020) melakukan penelitian pengujian kekerasan pada paduan Ni-Cu yang diberikan komposit *graphene*, menemukan fakta bahwa dengan bertambahnya komposisi matrik pada paduan akan memberikan keuntungan nilai kekerasannya juga meningkat. Oleh karena itu dalam mendapatkan sifat kekerasan yang tinggi maka ukuran partikel sangat berpengaruh terhadap kekerasan. Pada penelitian ini diperoleh nilai kekerasan paduan Ni-Cu tanpa diperkuat matriks mendapatkan hasil 320 HV, sementara itu untuk sampel yang diberikan matriks komposit *graphene* sebanyak 400 mg/l diperoleh nilai kekerasannya sebesar 483 HV (Pingale, 2020).

Pengujian nilai kekerasan juga dilakukan oleh Karunakaran *et. al* (2018) dengan menggunakan komposisi paduan Ni-Cu-P pada substrat *Al* dengan rapat arus 40 mA/cm² diperoleh nilai kekerasan sebesar 153 HV (Karunakaran *et al.* 2018). Jika dibandingkan dengan hasil yang sekarang, maka nilai tersebut masih dibawah daripada yang diperoleh pada penelitian ini yakni sebesar 404 HV pada rapat arus 40 mA/cm².

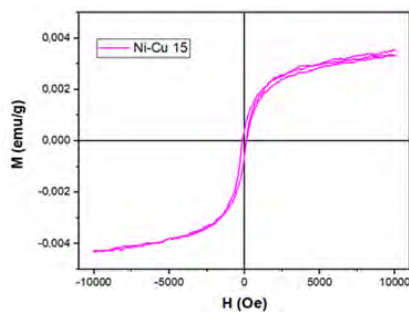
Dapat disimpulkan bahwa nilai kekerasan dipengaruhi oleh rapat arus, semakin tinggi rapat arus yang digunakan maka diperoleh nilai kekerasan yang tinggi juga. Hasil analisis kekerasan pada Gambar 4.13 jika dibandingkan dengan Tabel 4.6 maka ada hubungan semakin tinggi rapat arus maka ukuran grain (butir) akan semakin kecil sehingga akan menghasilkan kekerasan yang tinggi seperti ditunjukkan pada Gambar 4.14. Menurut Jiang *et. al* (2020) semakin kecil ukuran grain (butir) maka akan menghasilkan nilai kekerasan yang tinggi (Jiang et al. 2020).



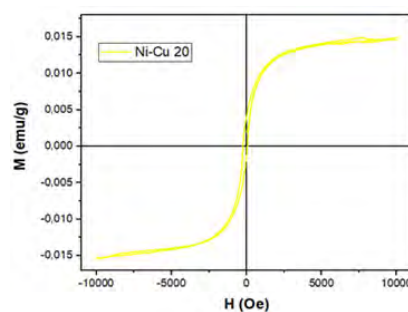
Gambar 4.14 Hubungan antara ukuran grain terhadap kekerasan.

4.1.8. Hasil Analisis Sifat Magnet Terhadap Variasi Rapat Arus

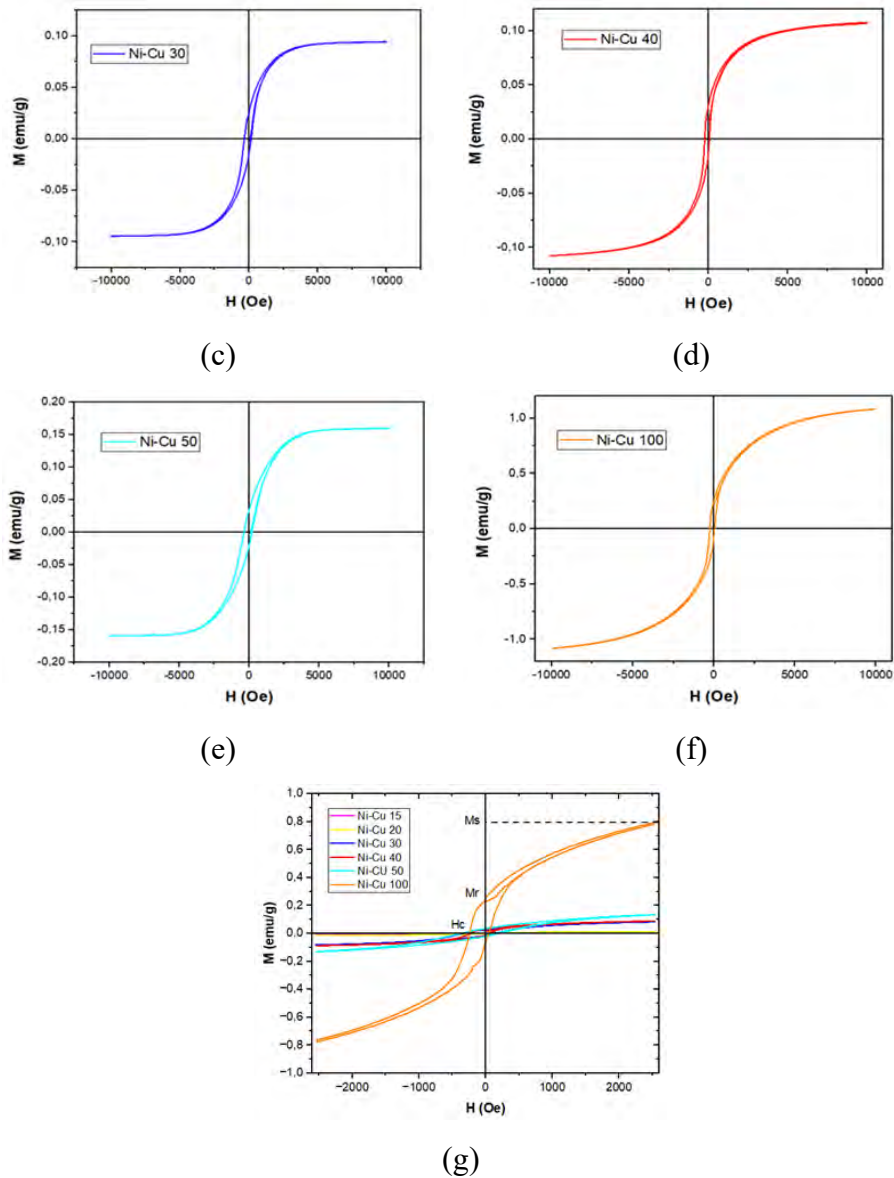
Pengujian VSM digunakan untuk mengetahui sifat magnetik pada sampel Ni-Cu. Sifat magnetik yang diperoleh dari perubahan rapat arus 15 mA/cm² sampai 100 mA/cm². Sifat magnet material Ni-Cu sangat bergantung dari kandungan mineral magnetik dan ukuran partikel. Untuk mengetahui respon paduan Ni-Cu terhadap medan magnet adalah dengan melihat kurva histeresis Gambar 4.15 terlihat semakin tinggi rapat arus maka respon paduan Ni-Cu terhadap sifat magnet akan tinggi juga nilai magnet saturasinya, hal ini juga terkonfirmasi dari hasil pengujian EDS. Terlihat pada sampel Ni-Cu 100 mempunyai komposisi Ni yang tinggi dibandingkan dengan komposisi Cu. Karena secara alamiah Ni sendiri merupakan bahan feromagnetik dan Cu adalah diamagnetik.



(a)



(b)



Gambar 4.15 Kurva histerisis M vs H pada pengukuran $10^4 - 10^{-4}$ (Oe) sampel paduan (a) Ni-Cu 15, (b) Ni-Cu 20, (c) Ni-Cu 30, (d) Ni-Cu 40, (e) Ni-Cu 50, (f) Ni-Cu 100 dan (g) kurva histerisis M vs H variasi N-Cu 15- Ni-Cu 100.

Tabel 4.11 menunjukkan sifat magnet yang diekstrak dari kurva histerisis pada Gambar 4.15. Pada penelitian sekarang diperoleh nilai Ms paling besar pada sampel Ni-Cu 100 yaitu sebesar 1,084 emu/g. Pengamatan pengaruh rapat arus terhadap sifat magnet juga dilakukan oleh Baskaran *et. al* (2006) dengan menggunakan rapat arus 2,5; 5; 7,5; 10; 15 dan 20 mA/cm² (Baskaran, Sankara Narayanan, and Stephen 2006). Komposisi kimia pada rapat arus 20 mA/cm²

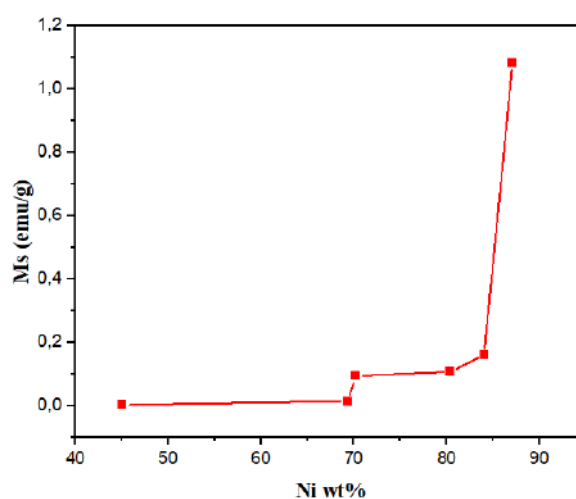
diperoleh $\text{Cu}_{0.38}\text{Ni}_{0.62}$ sehingga menghasilkan saturasi magnet sebesar 5,868 (emu/g).

Kenaikan M_r dan M_s dipengaruhi oleh komposisi kimia Ni pada larutan yang semakin meningkat seiring dengan rapat arus yang besar. Pengamatan ini juga sama diperoleh oleh Kuru *et. al* (2013) dimana pada sampel dengan komposisi Ni 74,3 at% dan Cu 25,7 at% menghasilkan saturasi magnet sebesar 101 (emu/cm³). Gambar 4.16 memperlihatkan hubungan antara kandungan Ni dengan M_s (Kuru, Kockar, and Alper 2013).

Tabel 4.11 Hasil perhitungan kurva histeresis Ni-Cu dengan VSM

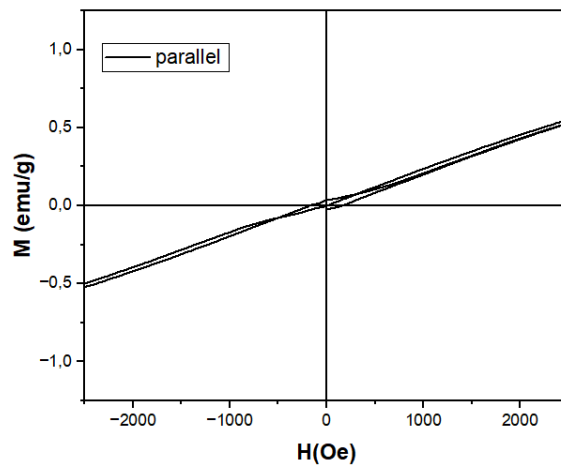
Sampel	Hc (Oe)	M_r (emu/g)	M_s (emu/g)
Ni-Cu 15	143,829	4,7E-4	0,003
Ni-Cu 20	140,081	0,004	0,015
Ni-Cu 30	256,215	0,025	0,094
Ni-Cu 40	144,023	0,032	0,108
Ni-Cu 50	281,859	0,035	0,160
Ni-Cu 100	143,097	0,257	1,084

Penelitian sifat magnet dari material Ni-Cu dengan substrat Al telah dilakukan oleh Karunakaran dan Vadivu (2019) dengan menggunakan rapat arus 40 mA/cm² (Karunakaran and Pugazh Vadivu 2019). Nilai saturasi magnet yang diperoleh dari percobaan ini diperoleh M_s 0,0004 (emu/g). Jika dibandingkan dengan hasil penelitian sekarang pada Tabel 4.11, pada rapat arus 40 mA/cm² menghasilkan magnet saturasi (M_s) sebesar 0,108 (emu/g), maka hasil ini cukup memuaskan.



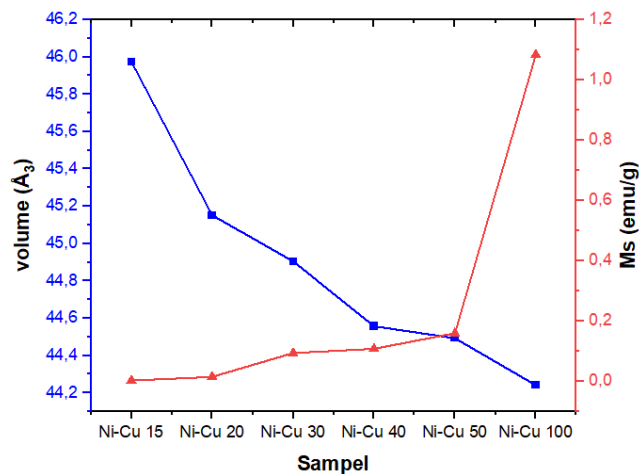
Gambar 4.16 Hubungan berat persen Ni terhadap M_s .

Bahan feromagnetik seperti Ni memiliki anisotropi kristal yang disebut sebagai *magnetocrystalline anisotropy*. Orientasi magnetisasi cenderung sejajar sepanjang arah *easy axis* seperti pada Gambar 4.17. Ni dengan struktur kristal FCC mempunyai *easy axis* sepanjang $[111]$ dengan konstanta anisotropi $K < 0$ (Tang, Wang, and Shima 2007). Hal ini juga terlihat dari pola XRD di Gambar 4.4 yang terbentuk dominan pada bidang (111) .



Gambar 4.17 *Easy axis* pada sampel Ni-Cu 100.

Magnetisasi merupakan rasio momen magnet per satuan volume. Sehingga jika volume semakin mengecil maka nilai magnetisasinya semakin besar (Spaldin 2020). Hubungan antara volume dengan magnetisasi saturasi disajikan pada Gambar 4.18.

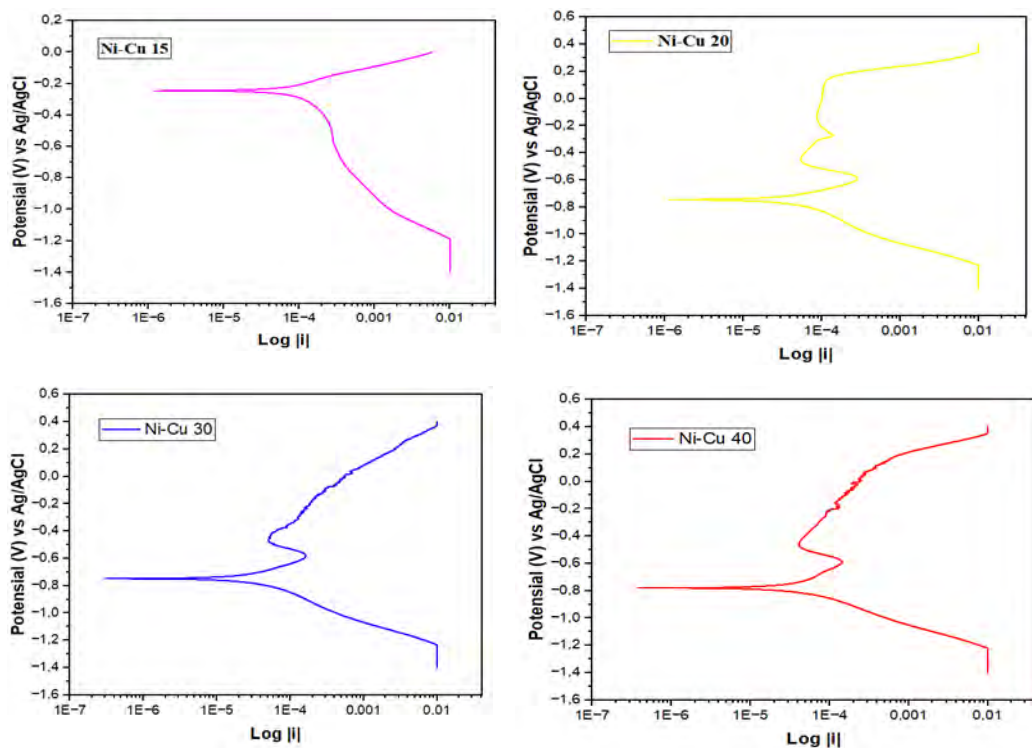


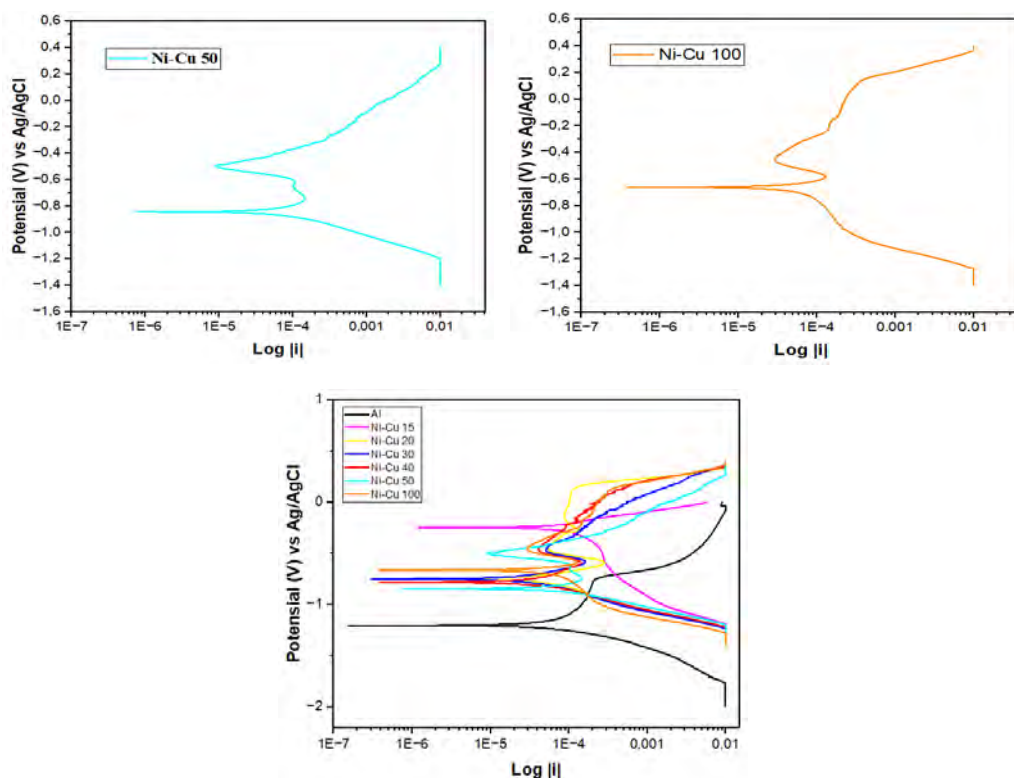
Gambar 4.18 Pengaruh rapat arus menyebabkan semakin kecil volume maka semakin besar nilai M_s .

Pada pengujian sifat magnet dengan menggunakan VSM dapat disimpulkan bahwa pengaruh rapat arus dapat memberikan hasil yang berbeda sehingga rekayasa sifat magnetik dapat dilakukan. Karena semakin tinggi rapat arus yang digunakan akan menghasilkan unsur Ni yang semakin tinggi sehingga menghasilkan nilai Mr dan Ms semakin tinggi. Selain itu, semakin kecil volume akan menghasilkan nilai Ms semakin tinggi.

4.1.9. Hasil Analisis Korosi

Hasil uji potensiodinamik polarisasi dari substrat serta lapisan Ni-Cu yang dibuat dengan metode elektrodposisi menggunakan variasi rapat arus 15, 20, 30, 40, 50 dan 100 mA/cm² disajikan pada Gambar 4.19. Uji potensiodinamik dilakukan dimulai dari tegangan – 1,4 sampai 0,4 V dalam larutan 3,5% NaCl dengan kecepatan sebesar 0,001 V/s.





Gambar 4.19 Pengaruh rapat arus terhadap pengukuran potensi dinamik polarisasi paduan Ni-Cu, dan Al.

Ada beberapa pembahasan wilayah atau daerah terkait pengujian potensi dinamik polarisasi diantaranya adalah wilayah aktif, pasif dan transpasif (Basori et al. 2023). Sebelum terjadinya wilayah pasif, maka logam akan mengalami pelepasan ion dimana akan terjadi proses korosi seragam yakni di wilayah aktif. Krawczyk *et. al* (2017) menemukan bahwa perilaku pasif dikaitkan dengan penurunan tiba-tiba dari kerapatan arus dengan potensial, yang terjadi sebagai fungsi dari konsentrasi elektrolit (Krawczyk et al. 2017). Paduan Ni-Cu 20 memiliki wilayah pasif yang paling luas diantara semua sampel, sementara itu wilayah pasif paling kecil dimiliki oleh sampel Ni-Cu 50. Sampel Ni-Cu 15 tidak terdapat wilayah pasif mungkin dikarenakan paduan Ni-Cu 15 lebih banyak Cu dibandingkan Ni. Menurut Nasirpouri dan Shoesmith (2013), lapisan pasif pada Ni dapat menurunkan laju korosi (Mishra and Shoesmith 2013).

Sampel Ni-Cu 20 menghasilkan potensial pitting (E_{pit}) tertinggi -0,429 V. E_{pit} merupakan potensial terendah di mana lapisan pasif masih stabil sebelum senyawa agresif dalam larutan elektrolit dapat menembus lapisan. Menurut Basori

et. al (2023), semakin tinggi nilai E_{pit} maka sampel akan tahan terhadap korosi (Basori et al. 2023). Jika dilihat dari Gambar 4.19, paduan Ni-Cu memiliki tegangan korosi yang lebih positif dibandingkan logam Al . Analisis potensiodinamik polarisasi paduan Ni-Cu dalam larutan 3,5% NaCl dengan berbagai variasi rapat arus ditunjukkan pada Tabel 4.12.

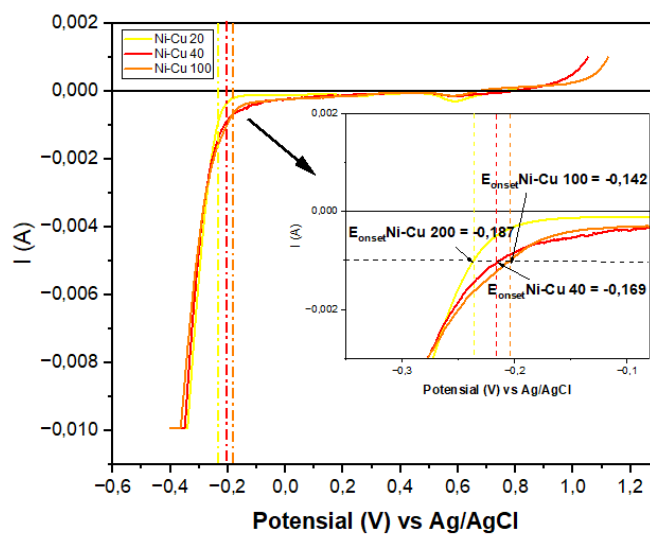
Tabel 4.12 Analisis potensiodinamik polarisasi paduan Ni-Cu, dan Al

Sampel	E_{corr} (V vs Ag/AgCl)	i_{corr} (mA/cm ²)	E_{pit} vs Ag/AgCl (V)
Ni-Cu 15	-0,245	$3,15 \times 10^{-3}$	-
Ni-Cu 20	-0,745	$1,96 \times 10^{-2}$	-0,429
Ni-Cu 30	-0,751	$1,99 \times 10^{-2}$	-0,436
Ni-Cu 40	-0,782	$2,01 \times 10^{-2}$	-0,455
Ni-Cu 50	-0,844	$3,94 \times 10^{-2}$	-0,505
Ni-Cu 100	-0,658	$2,92 \times 10^{-2}$	-0,452
Al	-1,204	$1,18 \times 10^{-2}$	-0,745

Jika dilihat dari Gambar 4.19 Al mempunyai wilayah pasif yang cukup luas membentang dari potensial -1,129 sampai -0,747 V karena pembentukan lapisan oksida pada permukaan Al . Pengujian tegangan korosi Al menunjukkan nilai -1,204 V vs Ag/AgCl, hasil ini lebih kecil dari yang diperoleh oleh Durmus *et. al* (2019) mendapatkan potensial korosi Al -1,250 V vs Ag/AgCl dalam larutan NaCl pH= 7 (Durmus et al. 2019). Analisis tegangan korosi paduan Ni-Cu pada Tabel 4.12 dengan larutan NaCl menunjukkan kecenderungan seiring bertambahnya kadar Ni maka tegangan korosi juga akan naik, hasil ini sama dengan yang diperoleh oleh Saranya, Velayutham dan Suryanarayanan (2014) mendapatkan tegangan korosi -0,724 V vs SCE pada komposisi 27,5% Cu – 72,5% Ni (Saranya, Velayutham, and Suryanarayanan 2014). Wilayah aktif atau daerah yang terkorosi pertama kali dari paduan Ni-Cu 20 sampai dengan Ni-Cu 50 adalah substrat Al , karena nilai potensial pitting (E_{pit}) Al berada pada -0,745 V. Sampel Ni-Cu 20 mengalami korosi kedua pada daerah transpasif dari potensial -0,428 sampai -0,288 V. Dari

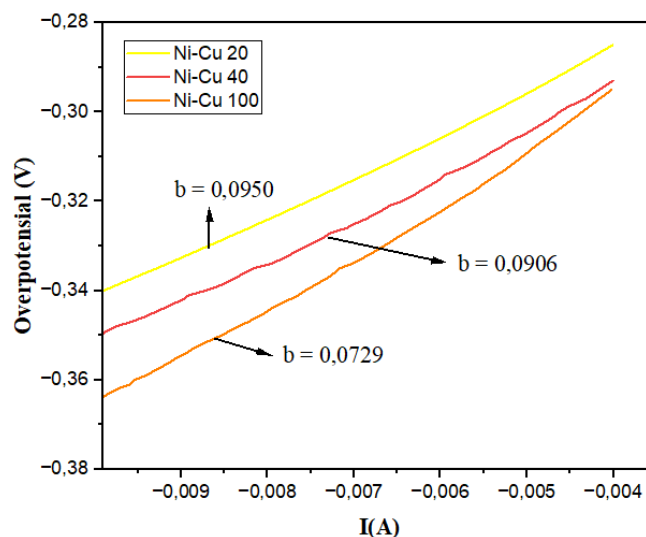
wilayah transpasif ini paduan Ni-Cu 20 yang mengalami korosi terlebih dahulu adalah Cu, karena berdasarkan penelitian D. Wang *et. al* (2014) nilai tegangan korosi Cu -0,320 V vs SCE. (D. Wang et al. 2014)

Gambar 4.20 menunjukkan kurva polarisasi katodik sampel Ni-Cu 20, Ni-Cu 40 dan Ni-Cu 100 di larutan 3,5% NaCl. Ni-Cu 40 dan Ni-Cu 100 menunjukkan onset overpotensial -0,169 V dan -0,142 V, sementara itu sampel Ni-Cu 20 menunjukkan lebih negatif -0,187 V untuk reaksi evolusi hidrogen. Ng *et. al* (2015) menyatakan overpotensial didefinisikan sebagai titik di mana arus reduksi terkoreksi menyimpang dari garis dasar dengan lebih dari 1 mA/cm² (Ng et al. 2015).



Gambar 4.20 Kurva polarisasi katodik Ni-Cu 20, Ni-Cu 40 dan Ni-Cu 100.

Gambar 4.21 menunjukkan kurva *Tafel Plot* dari sampel Ni-Cu 20, Ni-Cu 40 dan Ni-Cu 100 yang dicatat dengan daerah linier dimasukkan ke dalam persamaan 3.9. Menunjukkan semakin besar rapat arus, intersep dan *Tafel slope* semakin turun.



Gambar 4.21 Tafel plot Ni-Cu 20, Ni-Cu 40 dan Ni-Cu 100.

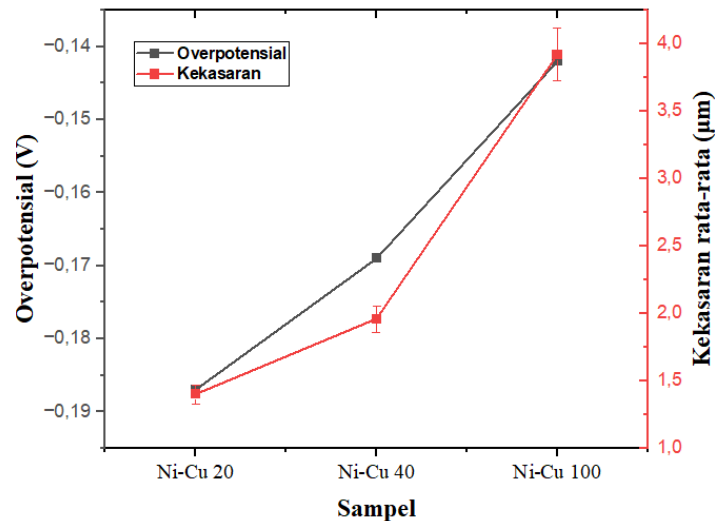
Menurut Huang *et. al* (2016) menyatakan semakin tinggi nilai tafel *slope* maka akan terbentuk lapisan *oxide* di permukaan (Huang et al. 2016). Tabel 4.13 menunjukkan parameter kinetik HER paduan Ni-Cu 20, Ni-Cu 40 dan Ni-Cu 100. Nilai *exchange current density* yang dihitung dengan persamaan 3.10 menunjukan semakin tinggi rapat arus maka nilai *exchange current density* semakin besar. Menurut Mahmood *et. al* (2017) semakin tinggi *exchange current density* mengindikasikan produksi hidrogen juga semakin tinggi, dalam penelitian ini yang memproduksi hidrogen yang paling besar adalah Ni-Cu 100 (Mahmood et al. 2017).

Tabel 4.13 Parameter kinetik HER paduan Ni-Cu 20, Ni-Cu 40 dan Ni-Cu 100

Sampel	a (V)	b (V dec ⁻¹)	η (V)	J_0 (A/cm ²)
Ni-Cu 20	-0,2412	0,0950	-0,187	344,95
Ni-Cu 40	-0,2476	0,0906	-0,169	537,25
Ni-Cu 100	-0,2360	0,0729	-0,142	1726,40

Gambar 4.22 merupakan hubungan antara overpotensial (V) vs kekasaran, dimana semakin kecil overpotensial (V) maka kekasaran permukaan semakin meningkat. Hal ini juga sama yang diamati oleh Cao *et. al* (2017) menemukan semakin kecil overpotensial maka kekasaran akan meningkat (Cao et al. 2017). Pada proses elektrodposisi perlu diwaspadai terbentuknya gas hidrogen di katoda.

Karena gas hidrogen akan menimbulkan permukaan yang kasar, permukaan kasar ini memberikan lebih banyak area di permukaan yang terbuka sehingga dapat berpotensi terpapar dengan lingkungan korosif yang akan menaikkan laju korosi (Li, Mei, Li, and Du 2019).



Gambar 4.22 Hubungan antara overpotensial (V) vs kekasaran.

Pada analisis korosi dan reaksi evolusi hidrogen dapat disimpulkan bahwa pengaruh rapat arus akan menaikkan potensial korosi, menghasilkan overpotensial yang semakin kecil dan *exchange current density* yang semakin tinggi. Kekasaran dapat mempengaruhi overpotensial dimana semakin kasar permukaan, maka semakin kecil overpotensial (V).

BAB 5

KESIMPULAN

Hasil elektrodeposisi memperlihatkan gradiasi warna tergantung pada komposisi kimia yang terdeposisi pada substrat. Dari penelitian ini menunjukkan:

1. Pembuatan Ni-Cu di atas substrat Al telah berhasil dilakukan dengan variasi rapat arus.
2. Akibat pengaruh rapat arus kadar Ni semakin besar dalam paduan Ni-Cu. Jari-jari atom Ni lebih kecil daripada atom Cu, akibatnya dengan kenaikan Ni konstanta kisi paduan mengecil dan d_{111} mengecil. Hal ini tampak pada pergeseran puncak bidang (111) ke arah kanan.
3. Semakin tinggi rapat arus menyebabkan laju deposisi semakin meningkat disebabkan oleh pergerakan ion dari anoda menuju katoda lebih cepat sehingga akan menghasilkan lapisan yang lebih tebal (32,73-70,12 μm) dalam jangka waktu yang sama.
4. Semakin tinggi rapat arus akan menghasilkan ukuran kristal yang semakin besar, maka akan menyebabkan permukaan morfologi yang semakin kasar, semakin kasar permukaan sampel akan menghasilkan ketebalan meningkat, dan kekerasan meningkat. Nilai kekerasan berada pada interval 202 sampai dengan 424,6 HV pada interval rapat arus dari 15 mA/cm^2 sampai dengan 100 mA/cm^2 . Kenaikan kekerasan ini juga bisa dihasilkan karena ada peningkatan kadar Ni dalam paduan Ni-Cu (kekerasan Ni lebih tinggi daripada Cu).
5. Bertambahnya rapat arus mempengaruhi warna karena adanya peningkatan kadar Ni di sampel. Kenaikan kadar Ni akan memberikan kenaikan sifat magnetik remanen dan magnetik saturasi kepada sampel. Komposisi sampel yang menghasilkan sifat magnetik dengan nilai M_r dan M_s tertinggi pada sampel Ni-Cu 100 dengan nilai 0,257 emu/g dan 1,084 emu/g secara berurutan.
6. Seiring dengan bertambahnya rapat arus akan memperoleh tegangan korosi paduan Ni-Cu semakin negatif dan menghasilkan gas hidrogen di katoda sebagai produk reduksi. Paduan Ni-Cu 15 menghasilkan potensial korosi terendah sebesar -0,245 (V vs Ag/AgCl). Dari analisis reaksi evolusi hidrogen sampel Ni-Cu 100 menghasilkan potensial lebih (overpotensial) paling kecil -0,142 V dan *exchange*

current density paling besar 1726,40 (A/cm²). Gas hidrogen ini dapat mengganggu proses deposisi sehingga permukaan menjadi kasar.

DAFTAR REFERENSI

- Albasre, Nur Mashitah, and Mohd Hazwan Hussin. 2021. "The Study of Electroless Ni-Cu-P Plating on Corrosion Resistance of Aluminium The Study of Electroless Ni-Cu-P Plating on Corrosion Resistance of Aluminium in 3 . 5 % NaCl." 9(March): 12–26.
- Alizadeh, Morteza, and Hamed Safaei. 2018. "Characterization of Ni-Cu Matrix, Al₂O₃ Reinforced Nano-Composite Coatings Prepared by Electrodeposition." *Applied Surface Science* 456(June): 195–203. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.06.095>.
- Alphanoda, Abid Fahreza. 2017. "Pengaruh Jarak Anoda-Katoda Dan Durasi Pelapisan Terhadap Laju Korosi Pada Hasil Electroplating Hard Chrome." *Jurnal Teknologi Rekayasa* 1(1): 1.
- Aziz, Shujahadeen B. et al. 2021. "Improving Edlc Device Performance Constructed from Plasticized Magnesium Ion Conducting Chitosan Based Polymer Electrolytes via Metal Complex Dispersion." *Membranes*.
- Baskaran, I., T. S.N. Sankara Narayanan, and A. Stephen. 2006. "Pulsed Electrodeposition of Nanocrystalline Cu-Ni Alloy Films and Evaluation of Their Characteristic Properties." *Materials Letters* 60(16): 1990–95.
- Basori, Basori et al. 2023. "Effect of KOH Concentration on Corrosion Behavior and Surface Morphology of Stainless Steel 316L for HHO Generator Application." *Journal of Electrochemical Science and Engineering* 13(3): 451–67.
- Bellige, Susheela, Liju Elias, and Ampar C. Hegde. 2016. "Electrodeposition of Cu-Ni Coatings for Marine Protection of Mild Steel." *Innovations in Corrosion and Materials Science (Formerly Recent Patents on Corrosion Science)* 5(2): 127–31.
- Bloom, Nicholas, and John Van Reenen. 2013. "濟無No Title No Title No Title." *NBER Working Papers* 2(June): 89. <http://www.nber.org/papers/w16019>.
- Budi, Setia et al. 2020. "Saccharin-Assisted Galvanostatic Electrodeposition of Nanocrystalline FeCo Films on a Flexible Substrate." *International Journal of Electrochemical Science* 15: 6682–94.
- Callister, William D., and David G. Rethwisch. 2014. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 9th ed. eds. Daniel Sayfe, James Metzger, and MaryAnn Price. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Cao, Pengfei, Jing Peng, Jiuqiang Li, and Maolin Zhai. 2017. "Highly Conductive Carbon Black Supported Amorphous Molybdenum Disulfide for Efficient Hydrogen Evolution Reaction." *Journal of Power Sources* 347: 210–19.
- Danhardjo, Danhardjo. 2020. "Analisis Sifat Mekanik Paduan Al-Si Pada Cast Piston Dan Forged Piston." *Sainstech: Jurnal Penelitian dan Pengkajian Sains dan Teknologi*.
- Deo, Yashwardhan et al. 2020. "Electrodeposited Ni-Cu Alloy Coatings on Mild Steel for Enhanced Corrosion Properties." *Applied Surface Science* 515(March): 146078. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146078>.
- Durmus, Yasin Emre et al. 2019. "Influence of Al Alloying on the Electrochemical Behavior of Zn Electrodes for Zn–Air Batteries With Neutral Sodium Chloride Electrolyte." *Frontiers in Chemistry* 7(November): 1–13.
- Evans, R. F.L. et al. 2014. "Atomistic Spin Model Simulations of Magnetic Nanomaterials." *Journal of Physics Condensed Matter* 26(10).
- Fadillah, Laras et al. 2019. "The Role of Tungsten Species in the Transition of Anodic Nanopores to Nanotubes Formed on Iron Alloyed with Tungsten." *Electrochimica Acta* 309: 274–82. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.03.206>.
- Firdouz, Zuveria, Pragya Tripathi, K. Mondal, and Kantesh Balani. 2022. "Effect of

- Carbonaceous Reinforcements on Anticorrosive and Magnetic Properties of Ni-Cu Based Composite Coatings Prepared by Pulsed Electrodeposition." *Surface and Coatings Technology* 441(March).
- Fukunaka, Y., H. Doi, and Y. Kondo. 1990. "Structural Variation of Electrodeposited Copper Film with the Addition of an Excess Amount of H_2SO_4 ." *Journal of The Electrochemical Society* 137(1): 88–93.
- Ganesan, Muthusankar et al. 2021. "Post-Supercritical CO_2 Electrodeposition Approach for Ni-Cu Alloy Fabrication: An Innovative Eco-Friendly Strategy for High-Performance Corrosion Resistance with Durability." *Applied Surface Science* (November).
- Geramipour, F., S. M. Mousavi Khoei, and H. Shooshtari Gughtapeh. 2021. "Effect of Shaped Waveform on Structure and Electrochemical Corrosion Behavior of Pulse Electrodeposited Ni[Sbnd]Cu Alloy Coatings." *Surface and Coatings Technology* 424(August).
- Di Gianfrancesco, Augusto. 2017. *Materials for Ultra-Supercritical and Advanced Ultra-Supercritical Power Plants Technologies for Chemical Analyses, Microstructural and Inspection Investigations*. Rome: Elsevier Ltd.
- Goranova, D., R. Rashkov, G. Avdeev, and V. Tonchev. 2016. "Electrodeposition of Ni-Cu Alloys at High Current Densities: Details of the Elements Distribution." *Journal of Materials Science* 51(18): 8663–73.
- Goranova, Desislava, Georgi Avdeev, and Rashko Rashkov. 2014. "Electrodeposition and Characterization of Ni-Cu Alloys." *Surface and Coatings Technology* 240: 204–10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.12.014>.
- Goyal, Bindu et al. 2018. "Electroplating of Nickel and Chromium on Aluminum 6082-T6 Alloy." (February 2018).
- Grimshaw, Pengpeng, Joseph M. Calo, and George Hradil. 2011. "III. Co-Electrodeposition/Removal of Copper and Nickel in a Spouted Electrochemical Reactor." *Industrial and Engineering Chemistry Research* 50(16): 9532–38.
- Groover, M. P. 2012. "Fundamentals of Modern Manufacturing 4th Edition." *Metallurgy of Welding*.
- Guisbiers, Grégory et al. 2014. "Cu-Ni Nano-Alloy: Mixed, Core-Shell or Janus Nano-Particle?" *Nanoscale* 6(24): 14630–35.
- Hamidah, Ida et al. 2021. "Corrosion of Copper Alloys in KOH, NaOH, NaCl, and HCl Electrolyte Solutions and Its Impact to the Mechanical Properties." *Alexandria Engineering Journal* 60(2): 2235–43. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.12.027>.
- Handayani, Ade Silvia et al. 2020. "Pemanfaatan Aplikasi Simulasi Rangkaian Listrik Sebagai Media Pembelajaran Fisika." *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*.
- Huang, You guo et al. 2016. "The Effect of Graphene for the Hydrogen Evolution Reaction in Alkaline Medium." *International Journal of Hydrogen Energy* 41(6): 3786–93.
- Jiang, Yiming et al. 2020. "Electrodeposition of Ni-Co Alloys and Their Mechanical Properties by Micro-Vickers Hardness Test." *Electrochem* 2(1): 1–9.
- Jikan, S S et al. 2015. "Corrosion Behaviour and Morphological Analysis of Ni / Cu Nanolayer Coating in Salt Solution." *Applied Mathematics and Computer Intelligence* 4(1): 355–60.
- Karunakaran, M., and M. Pugazh Vadivu. 2019. "Magnetic and Micro-Mechanical Behavior of Cu-Ni-P-W-TiO₂ Hybrid Composite Electroplating on Al Alloy Substrate." *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 475(November 2018):

- 359–67. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.11.077>.
- Karunakaran, M., M. Pugazhvadivu, V. Gunasegaran, and G. Gowtham. 2018. "Electrodeposition of Cu-Ni-P-W Composite on Al-6063 Substrate." *International Journal of Scientific Research in Physics and Applied Sciences*.
- Korchef, Atef, and Abdelkrim Kahoul. 2013. "Corrosion Behavior of Commercial Aluminum Alloy Processed by Equal Channel Angular Pressing." *International Journal of Corrosion*.
- Krawczyk, Benjamin, Paul Cook, Jeff Hobbs, and Dirk L. Engelberg. 2017. "Corrosion Behavior of Cold Rolled Type 316L Stainless Steel in HCl-Containing Environments." *Corrosion* 73(11): 1346–58.
- Kuru, Hilal, Hakan Kockar, and Mursel Alper. 2013. "Characterizations of NiCu/Cu Multilayers: Dependence of Nonmagnetic Layer Thickness." *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 26(4): 779–84.
- Lee, Wen His, and K. C. Chung. 2020. "Investigation of a Copper–Nickel Alloy Resistor Using Co-Electrodeposition." *Journal of Applied Electrochemistry* 50(5): 535–47.
- Li, Baosong, Tianyong Mei, Dandan Li, Shengsong Du, et al. 2019. "Structural and Corrosion Behavior of Ni-Cu and Ni-Cu/ZrO₂ Composite Coating Electrodeposited from Sulphate-Citrate Bath at Low Cu Concentration with Additives." *Journal of Alloys and Compounds* 804: 192–201. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.381>.
- Li, Baosong, Tianyong Mei, Dandan Li, Shengsong Du, et al. 2019. "Ultrasonic-Assisted Electrodeposition of Ni-Cu/TiN Composite Coating from Sulphate-Citrate Bath: Structural and Electrochemical Properties." *Ultrasonics Sonochemistry* 58(May): 104680. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104680>.
- Lotfi, N., and Gh. Barati Darband. 2022. "Energy-Saving Electrochemical Hydrogen Production on Dynamic Hydrogen Bubble-Template Electrodeposited Ni-Cu-Mn Nano-Micro Dendrite." *Journal of The Electrochemical Society* 169(9): 096508.
- Lotfi, N., T. Shahrabi, Y. Yaghoubinezhad, and Gh Barati Darband. 2019. "Surface Modification of Ni Foam by the Dendrite Ni-Cu Electrode for Hydrogen Evolution Reaction in an Alkaline Solution." *Journal of Electroanalytical Chemistry* 848.
- Mae, Yoshiharu. 2016. "What the Darken–Gurry Plot Means About the Solubility of Elements in Metals." *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science* 47(12): 6498–6506.
- Mahallawy, N. A. El, M. A. Shoeib, and M. H. Abouelenain. 2011. "AZ91 Magnesium Alloys: Anodizing of Using Environmental Friendly Electrolytes." *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology* 01(02): 62–72.
- Mahmood, Javeed et al. 2017. "An Efficient and PH-Universal Ruthenium-Based Catalyst for the Hydrogen Evolution Reaction." *Nature Nanotechnology* 12(5): 441–46. <http://dx.doi.org/10.1038/nnano.2016.304>.
- Marrone, Pierpaolo. 2013. 15 Etica e Politica *Chambers, RT*.
- Meng, Liang, Qinyou Hu, Chaojian Shi, and Changhai Huang. 2020. "Roles of Graphene Additives in Optimizing the Microstructure and Properties of Ni-Cr-Graphene Coatings." *Coatings* 10(2): 1–16.
- Merino, Susana et al. 2019. "Comparing Different Cross-Section Cutting Methods for SEM Analysis of Membrane-Electrodes Assemblies." *ECS Transactions*.
- Mishra, A. K., and D. W. Shoesmith. 2013. "The Activation/Depassivation of Nickel-Chromium-Molybdenum Alloys: An Oxyanion or a PH Effect - Part II." *Electrochimica Acta* 102: 328–35.

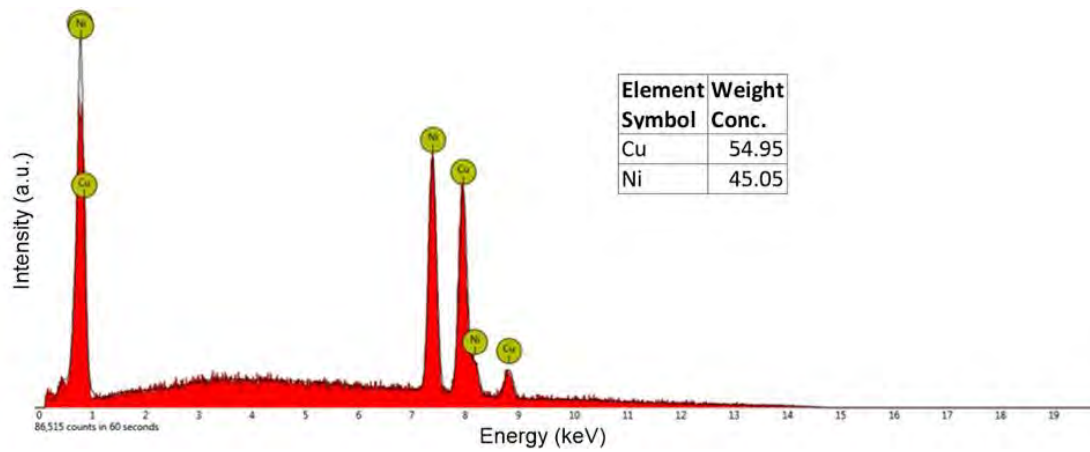
- Mkawi, E. M. et al. 2014. "Effect of Complexing Agents on the Electrodeposition of Cu-Zn-Sn Metal Precursors and Corresponding Cu₂ZnSnS₄-Based Solar Cells." *Journal of Electroanalytical Chemistry* 735: 129–35.
- Mohammad, Elham Jasim. 2019. "Image Processing of SEM Image Nano Silver Using K-Means MATLAB Technique." *Al-Mustansiriyah Journal of Science* 29(3): 150–57.
- Montiel Hernández, J. F. et al. 2014. "Thermodynamic Study of Leached Metals (Cu, Zn and Ni) from Waste Printed Circuits by Electrochemical Method." *Advanced Materials Research* 976: 86–90.
- Mujamilah et al. 2000. "Vibrating Sample Magnetometer (VSM) Tipe Oxford Vsm1.2h." *Prosiding Seminar Nasional Bahan Magnet* 1 di: 77–81.
- Mustopo, Yogik Dwi. 2011. *Pengaruh Waktu Terhadap Ketebalan Dan Adhesivitas Lapisan Pada Proses Elektroplating Khrom Dekoratif Tanpa Lapisan Dasar, Dengan Lapisan Dasar Tembaga Dan Tembaga-Nikel*. digilib.uns.ac.id.
- Nady, H., and M. Negem. 2016. "Ni-Cu Nano-Crystalline Alloys for Efficient Electrochemical Hydrogen Production in Acid Water." *RSC Advances* 6(56): 51111–19.
- Nath, Prekshya, Deepak Kumar Sahu, and Archana Mallik. 2016. "Physicochemical and Corrosion Properties of Sono-Electrodeposited Cu-Ni Thin Films." *Surface and Coatings Technology* 307: 772–80. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.09.085>.
- Newbury, Dale E., and Nicholas W.M. Ritchie. 2019. "Electron-Excited X-Ray Microanalysis by Energy Dispersive Spectrometry at 50: Analytical Accuracy, Precision, Trace Sensitivity, and Quantitative Compositional Mapping." *Microscopy and Microanalysis*.
- Ng, Chun Hin, Orawan Winther-Jensen, C. André Ohlin, and Bjorn Winther-Jensen. 2015. "Exploration and Optimisation of Poly(2,2'-Bithiophene) as a Stable Photo-Electrocatalyst for Hydrogen Production." *Journal of Materials Chemistry A* 3(21): 11358–66.
- Ni, Haitao et al. 2019. "Fabrication and Characterization of Nanocrystalline Nickel with a Grain Size Gradient by Direct Current Electrodeposition." *International Journal of Electrochemical Science* 14(9): 8429–38.
- Niam, M Y, H Purwanto, and S M B Respati. 2017. "Pengaruh Waktu Pelapisan Elektro" 13(1): 7–10.
- Nikhil, Manvandra Kumar Singh, Gopal Ji, and Rajiv Prakash. 2021. "Investigation on the Effects of Cooling Rate on Surface Texture, Corrosion Behaviour and Hardness of Pure Copper." *Materials Today: Proceedings* (xxxx).
- Ningsih, Sherly Kasuma Warda. 2016. *Sintesis Anorganik Sintesis Anorganik*.
- Pellicer, Eva et al. 2010. "983-991 Nanocrystalline Electroplated Cu-Ni: Metallic Thin Films with Enhanced Mechanical Properties and Tunable Magnetic Behavior." *Advanced Functional Materials* 20(6): 983–91.
- Pingale, Ajay D. et al. 2021. "Recent Researches on Cu-Ni Alloy Matrix Composites through Electrodeposition and Powder Metallurgy Methods: A Review." *Materials Today: Proceedings* 47: 3301–8.
- Pingale, Ajay D., Sachin U. Belgamwar, and Jitendra S. Rathore. 2020. "Effect of Graphene Nanoplatelets Addition on the Mechanical, Tribological and Corrosion Properties of Cu-Ni/Gr Nanocomposite Coatings by Electro-Co-Deposition Method." *Transactions of the Indian Institute of Metals* 73(1): 99–107.

- <https://doi.org/10.1007/s12666-019-01807-9>.
- Pingale, Ajay D., Sachin U. Belgamwar, and Jitendra S. Rathore. 2020. "Synthesis and Characterization of Cu–Ni/Gr Nanocomposite Coatings by Electro-Co-Deposition Method: Effect of Current Density." *Bulletin of Materials Science* 43(1): 1–9. <https://doi.org/10.1007/s12034-019-2031-x>.
- Pranjono, Torowati, Banawa Sri Galuh, and Lilis Windaryati. 2015. "Pengukuran Kekasaran Permukaan Pelet UO₂ Menggunakan Alat Roughness Tester Surtronic 25."
- Putra, Valentinus Galih Vidia, Endah Purnomosari, and Ngadiyono. 2019. Pengantar Praktikum Mekatronika Tekstil *Pengantar Praktikum Mekatronika Tekstil*.
- Rees, William S. 1995. "Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings: Science, Technology and Applications, 2nd Edition: Edited By Rointan F. Bunshah, Noyes, Park Ridge, NJ, 1994, XXVI, 861 Pp., Hardcover, \$ 98.00, ISBN 0-81 55-13372." *Advanced Materials* 7(1): 96–96.
- Rwawiire, Samson. 2014. "Prediction of Polyester/Cotton Ring Spun Yarn Unevenness Using Adaptive Neuro Fuzzy Inference System." *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management* 8(4).
- Sarac, Umut, and M. Celalettin Baykul. 2013. "Morphological and Microstructural Properties of Two-Phase Ni-Cu Films Electrodeposited at Different Electrolyte Temperatures." *Journal of Alloys and Compounds*.
- Sarac, Umut, and M. Celalettin Baykul. 2014. "Microstructural and Morphological Characterizations of Nanocrystalline Ni-Cu-Fe Thin Films Electrodeposited from Electrolytes with Different Fe Ion Concentrations." *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*.
- Sarac, Umut, R. Mustafa Öksüzöğlü, and M. Celalettin Baykul. 2012. "Deposition Potential Dependence of Composition, Microstructure, and Surface Morphology of Electrodeposited Ni-Cu Alloy Films." *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 23(12): 2110–16.
- Saranya, D., D. Velayutham, and V. Suryanarayanan. 2014. "Electrodeposition of Ni-Cu Alloys from a Protic Ionic Liquid Medium-Voltammetric and Surface Morphologic Studies." *Journal of Electroanalytical Chemistry* 734: 70–78. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jelechem.2014.10.001>.
- Schlesinger, Mordechai, and Milan Paunovic. 2010. "Part a Electrochemical Aspects." *Modern Electroplating (5th edition)*.
- SEAKR, R. 2017. "Microstructure and Crystallographic Characteristics of Nanocrystalline Copper Prepared from Acetate Solutions by Electrodeposition Technique." *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)* 27(6): 1423–30. [http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60164-X](http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60164-X).
- Setiyawan, M U H Taufiq. 2016. "STUDI KETAHANAN COATING Ni YANG DIBENTUK MELALUI PROSES ELEKTROPLATING TERHADAP BEBAN PANAS KEJUT."
- Silaimani, S. M., G. Vivekanandan, and P. Veeramani. 2015. "Nano-Nickel–Copper Alloy Deposit for Improved Corrosion Resistance in Marine Environment." *International Journal of Environmental Science and Technology* 12(7): 2299–2306.
- Skilbred, Ellen Synnøve. 2016. "Corrosion of Nickel-Aluminium Bronze." (June).
- Soegijono, Bambang, Ferry Budhi Susetyo, Yusmaniar, and Musfirah Cahya Fajrah. 2020. "Electrodeposition of Paramagnetic Copper Film under Magnetic Field on Paramagnetic Aluminum Alloy Substrates." *e-Journal of Surface Science and*

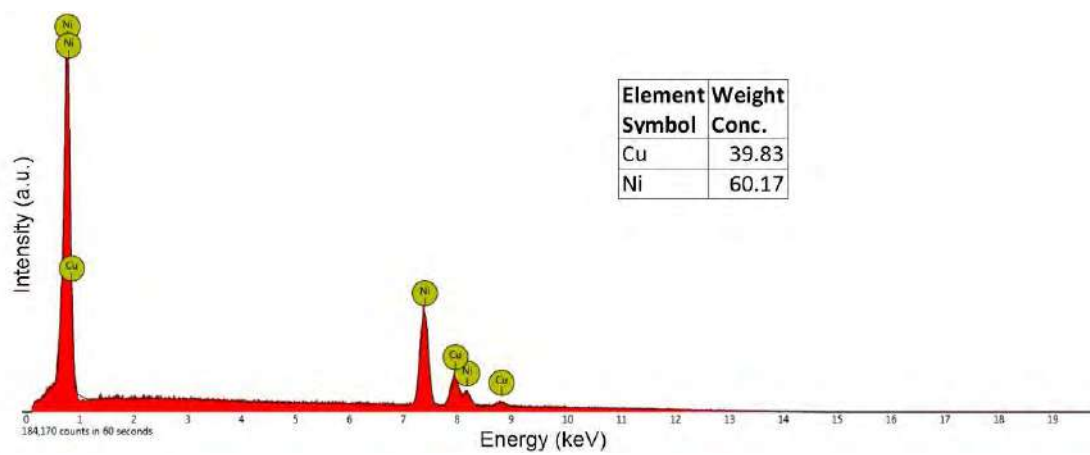
- Nanotechnology* 18: 281–88.
- Spaldin, Nicola A. 2020. “Multiferroics beyond Electric-Field Control of Magnetism Subject Areas : Author for Correspondence :” .*Proc. R. Soc. A* 476.
- Suparno, Supriyanto. 2008. “Komputasi Untuk Sains Dan Teknik.” *Naskah, Departemen Fisika* 3(September 2007): 1–9.
<http://staff.ui.ac.id/system/files/users/supriyanto.si/material/komputasiedisi3.pdf>.
- Susetyo, F. B., B. Soegijono, and Yusmaniar. 2021. “Effect of a Constant Magnet Position and Intensity on a Copper Layer Obtained by DC Electrodeposition.” *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition* 10(2): 766–82.
- Syamsuir, S et al. 2023. “Electrolyte Temperature Dependency of Electrodeposited Nickel in Sulfate Solution on the Hardness and Corrosion Behaviors.” 36(06): 1193–1200.
- Tang, Xue Ti, Gwo Ching Wang, and Mutsuhiro Shima. 2007. “Magnetic Layer Thickness Dependence of Magnetization Reversal in Electrodeposited CoNi/Cu Multilayer Nanowires.” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 309(2): 188–96.
- Tata Surdia & Shinroku Saito. 1999. “Pengetahuan Bahan Teknik.” *Pengetahuan bahan Teknik*.
- Thurber, Casey R. et al. 2016. “Electrodeposition of 70-30 Cu-Ni Nanocomposite Coatings for Enhanced Mechanical and Corrosion Properties.” *Current Applied Physics* 16(3): 387–96.
- Ul-Hamid, A. et al. 2012. “Electrochemical Deposition of Ni on an Al-Cu Alloy.” *Journal of Materials Engineering and Performance* 21(2): 213–21.
- Wang, Chao, Md Emran Hossain Bhuiyan, Salvador Moreno, and Majid Minary-Jolandan. 2020. “Direct-Write Printing Copper-Nickel (Cu/Ni) Alloy with Controlled Composition from a Single Electrolyte Using Co-Electrodeposition.” *ACS Applied Materials and Interfaces* 12(16): 18683–91.
- Wang, Dan et al. 2014. “Corrosion Control of Copper in 3.5 Wt.% NaCl Solution by Domperidone: Experimental and Theoretical Study.” *Corrosion Science* 85: 77–86.
- Wang, T., and W. Chen. 2015. “Effects of Rotating Magnetic Fields on Nickel Electrodeposition.” *ECS Electrochemistry Letters* 4(6): D14–17.
- Zhang, Yong et al. 2014. “Microstructures and Properties of High-Entropy Alloys.” *Progress in Materials Science* 61(October 2013): 1–93.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.10.001>.

LAMPIRAN

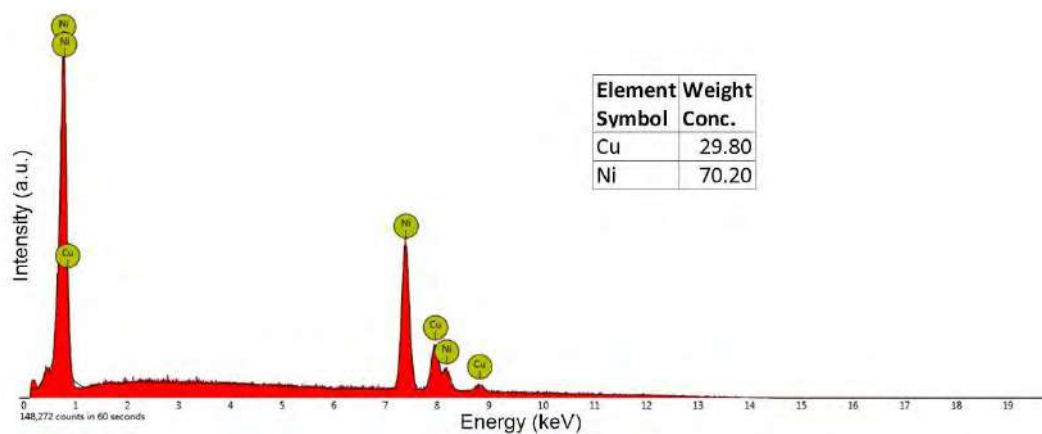
Lampiran 1. Hasil EDS Sampel Ni-Cu 15



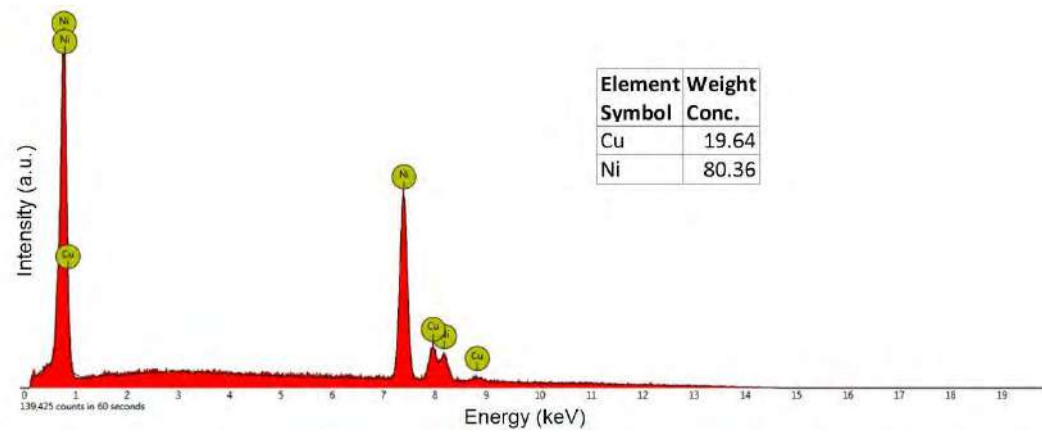
Lampiran 2. Hasil EDS Sampel Ni-Cu 20



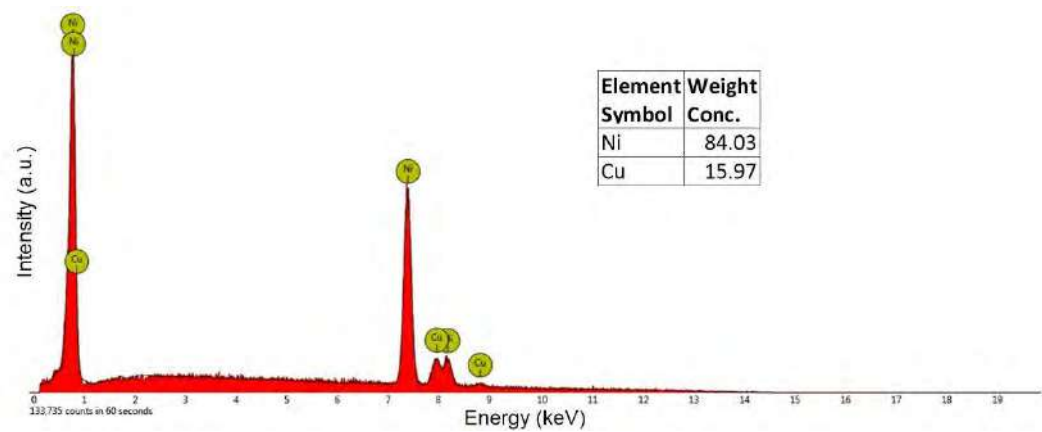
Lampiran 3. Hasil EDS Sampel Ni-Cu 30



Lampiran 4. Hasil EDS Sampel Ni-Cu 40



Lampiran 5. Hasil EDS Sampel Ni-Cu 50



Lampiran 6. Hasil EDS Sampel Ni-Cu 100

