Elektroplating Baja Karbon dengan Variasi Arus dan Lama Pelapisan terhadap Ketahanan Korosi dengan Ordinary Least Squares Regression

Miftahul Choir[1], Vuri Ayu Setyowati[2]
Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya[1,2]
e-mail: vuri@itats.ac.id

ABSTRACT

Electroplating is a metal coating process widely used to enhance corrosion resistance and mechanical properties. In this study, the effects of current and time of electroplating on coating thickness and corrosion rate were analyzed using experimental data and the Ordinary Least Squares (OLS) regression approach. Experimental data were collected by controlling the electroplating process parameters, where variations in current and time were applied to evaluate the resulting coating thickness and corrosion rate. The OLS model was employed to identify the linear relationships between input and output variables and to assess the statistical significance of each parameter. Regression results indicate that both variables give dominant effect on coating thickness, while only current of electroplatting significantly influences corrosion rate, as evidenced by p-values < 0.05. Additionally, the parity plot confirms that the OLS model exhibits good predictive performance, which show R^2 0.986 and 0.804 for coating thickness model and corresion rate model, respectively. This study demonstrates that the OLS method can serve as an effective predictive tool for understanding the relationships between electroplating process variables. However, to improve predictive accuracy, non-linear methods may be considered.

Kata kunci: *electroplating, coating thickness, corrosion rate, OLS regression, machine learning*

ABSTRAK

Elektroplating merupakan proses pelapisan logam yang banyak digunakan untuk meningkatkan ketahanan korosi dan sifat mekanik suatu material. Dalam penelitian ini, dilakukan analisis pengaruh variasi arus dan waktu pelapisan terhadap ketebalan lapisan dan laju korosi menggunakan data eksperimen dan pendekatan machine learning (ML) metode *Ordinary Least Squares* (OLS) *regression*. Data eksperimen dikumpulkan dengan mengontrol parameter proses elektroplating, di mana variasi arus dan waktu pelapisan diterapkan untuk mengevaluasi hasil ketebalan lapisan dan laju korosi .Model OLS digunakan untuk mengidentifikasi hubungan linier antara variabel input dan output serta mengevaluasi signifikansi statistik setiap parameter. Hasil regresi menunjukkan bahwa kedua variable di atas memiliki pengaruh dominan terhadap ketebalan lapisan sedangkan arus pelapisan lebih signifikan dalam menentukan laju korosi sebagaimana ditunjukkan oleh nilai p-*value* < 0,05. Selain itu, parity plot mengonfirmasi bahwa model OLS memiliki performa prediksi yang baik dengan R^2 sebesar 0,986 untuk model ketebalan lapisan dan R^2 sebesar 0,804 untuk model laju korosi. Studi ini menunjukkan bahwa metode OLS dapat digunakan sebagai alat prediktif yang efektif dalam memahami hubungan variabel proses elektroplating. Namun, untuk meningkatkan akurasi prediksi, metode non-linier dapat dipertimbangkan.

Kata kunci: elektroplating, ketebalan lapisan, laju korosi, OLS *regression, machine learning*

PENDAHULUAN

Baja AISI 1040 adalah baja dengan kandungan karbon sedang yang digunakan secara luas dalam industri otomotif dan manufaktur karena sifat kekuatan dan keuletan. Akan tetapi, baja ini rentan terhadap korosi terlebih pada lingkungan dengan kelembapan tinggi maupun larutan elektrolit seperti air laut [1]. Salah satu strategi untuk mengingkatkan ketahanan korosi adalah elektroplating. Elektroplating adalah proses deposisi logam untuk menghasilkan lapisan logam pelindung yang terbentuk akibat transfer ion menggunakan arus listrik dengan media elektrolit [2]. Dalam upaya peningkatan ketahanan korosi melalui elektroplating, beberapa logam umumnya digunakan sebagai lapisan pelindung yang mampu memperlambat reaksi oksidasi seperti nikel (Ni), seng (Sn), dan kromium (Cr) [3], [4].

Elektroplating dipengaruhi oleh beberapa parameter diantaranya tegangan, arus, jenis elektrolit, konsentrasi elektrolit, waktu deposisi/pelapisan, dll yang dapat menentukan kualitas lapisan yang dibentuk. Variasi aris listrik dan komposisi media elektroplating pada baja karbon rendah dilakukan oleh Sugiyarta 2012. Ketahanan korosi, kekerasan, dan ketebalan lapisan juga dioptimalkan melalui studi variasi kuat arus elektroplating baja ST 41 di mana laju korosi terendah yakni 36,625 mpy saat arus sebesar 6 A [5].

Pelapisan krom dilakukan dengan variasi waktu pelapisan pada aluminium dan diperoleh ketebalan maksium lapisan krom 28.14 µm selama 60 menit elektroplating [6].
Berdasarkan penelitian sebelumnya yang telah melakukan studi pengaruh parameter elektroplating terhadap ketahanan korosi, pada umumnya penelitian dilakukan melalui eksperimen. Beberapa tahun teakhir ini, analisa data dilakukan melalui pendekatan berbasis machine learning diterapkan pada berbagai bidang ilmu termasuk material untuk memprediksi dan mengoptimalkan material berdasarkan data eksperimen. *Machine learning* adalah satu bagian dari *artificial intelligence*. Katirci et al melakukan studi tentang estimasi komposisi nickel menggunakan artificial intelegence untuk mengoptimalkan tambahan organik di elektroplating [7].
Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi arus listrik dan lama waktu pelapisan elektroplating pada baja AISI 1045 dengan lapisan **nikel** terhadap ketebalan lapisan dengan pendekatan *machine learning* berbasis data eksperimen. Nikel dipilih sebagai anoda dalam elektroplating karena dapat meningkatkan ketahanan korosi, memiliki daya rekat yang kuat untuk baja, dan biaya yang lebih terjangkau. Analisa data dengan machine learning memberikan informasi bagaimana kedua faktor tersebut mempengaruhi ketebalan lapisan dan laju korosi.

TINJAUAN PUSTAKA

Korosi

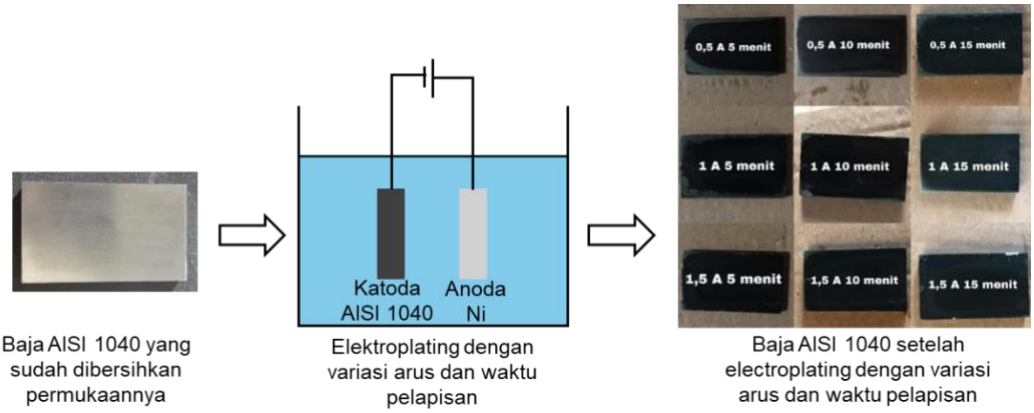
Korosi merupakan proses elektrokimia yang dapat merusak material akibat reaksi dengan lingkungan sekitarnya. Proses ini dapat menyebabkan kerusakan signifikan pada infrastruktur seperti pipa minyak, kapal laut, dan *heat exchanger*. Salah satu metode untuk meningkatkan ketahanan korosi adalah dengan menciptakan permukaan superhidrofobik yang dapat menahan celah udara antara cairan korosif dan struktur padat. Permukaan superhidrofobik yang terdiri dari paduan Zn-Ni dan Zn-Co telah menunjukkan ketahanan korosi yang sangat baik, dengan sudut kontak air lebih dari 150° setelah direndam dalam larutan NaCl selama 48 jam [8]. Selain itu, metode pelapisan elektroplating dengan menggunakan asam miristat pada permukaan nikel juga dapat meningkatkan ketahanan korosi dengan mengurangi densitas arus korosi hingga dua dekade [9].

Elektroplating

Elektroplating adalah proses pelapisan logam yang melibatkan penggunaan arus listrik untuk mengendapkan lapisan tipis logam pada permukaan logam lainnya. Proses ini bertujuan untuk melindungi logam dari korosi dan meningkatkan penampilan estetika. Dalam penelitian terbaru, ekstrak fenolik dari Pyracantha coccinea digunakan sebagai aditif ramah lingkungan dalam proses elektroplating seng. Hasilnya menunjukkan bahwa penambahan ekstrak ini meningkatkan kualitas endapan seng dengan memberikan permukaan yang halus dan cerah, serta meningkatkan ketahanan korosi dari substrat yang dilapisi [10].
Selain itu, penelitian lain menunjukkan bahwa metode elektroplating dapat dioptimalkan untuk meningkatkan ketahanan korosi. Misalnya, pelapisan elektroplating nikel-krom pada baja profil L dapat dioptimalkan dengan mengatur parameter seperti konsentrasi larutan, suhu, dan densitas arus untuk mendapatkan ketahanan korosi yang maksimal [11]. Metode elektroplating pulsa juga telah terbukti meningkatkan ketahanan korosi dari lapisan paduan Ni-W-P, dengan parameter optimal yang meliputi pH, suhu, dan frekuensi pulsa [12]. Metode ini menunjukkan bahwa elektroplating tidak hanya meningkatkan ketahanan korosi tetapi juga dapat disesuaikan untuk berbagai aplikasi industri.

METODE

Baja AISI 1040 digunakan sebagai material utama pelapisan dengan dimensi sampel 50 mm x 30 mm x 5 mm. Permukaan logam dibersihkan dengan mengaluskan permukaan menggunakan SiC *paper grade* 100 hingga1500. Setelah permukaan bersih dan halus, elektroplating dilakukan dengan anoda Nikel (Ni), baja AISI 1040 sebagai katoda, dan larutan elektrolit $NiCl_2$ (0,38 molar) sebagai media pelapisan. Kondisi pelapisan dilakukan dengan variasi arus dan waktu pelapisan sebanyak 9 kondisi. Variasi arus yang digunakan adalah 0,5A, 1A, 1,5A sedangkan pelapisan dilakukan dengan variasi 5, 10, dan 15 menit. Adapun prosedur pelapisan sampel ditunjukkan pada gambar 1 berikut ini.



Gambar 1. Skema penelitian mulai sampel yang sudah dipreparasi hingga setelah elektroplating

Pengukuran ketebalan dan pengujian laju korosi dilakukan setelah elektroplating. Ketebalan diukur menggunakan mikrometer skrup dengan mengukur ketebalan sampel sebelum dan setelah ektroplating dengan ketelitian mencapai 0.001mm. Micrometer digital digunakan untuk mendapatkan hasil yang lebih tepat. Pengukuran ketebalan dilakukan sebanyak 3 titik secara diagonal untuk setiap sampel yakni bagian kanan atas, tengah, dan kiri bawah. Nilai rata-rata dari ketiga titik tersebut adalah tebal sampel. Namun, ketebalan hasil pelapisan dihitung dari selisih tebal sampel dan dibagi dua. Pembagian ini dilakukan karea lapisan elektroplating berada pada kedua sisi permukaan sampel sehingga selisih ketebalan merupakan akumulasi dari kedua sisi. Oleh karena itu, ketebalan lapisan yang dimaksud adalah ketebalan setiap sisi yang diperoleh dengan membagi selisih total ketebalan dengan dua sebagaimana ditunjukkan pada persamaan (1), di mana *Ta* adalah tebal sampel sebelum dan *Tb* adalah tebal sampel setelah elektroplating.
Pembagian keteba
Sementara itu, laju korosi dilakukan dengan metode coupon selama 48 jam dengan media NaCl (50 gram dan 1L aquades). Penimbangan sampel sebelum dan setelah pengujian korosi dilakukan untuk mengetahui laju korosi sesuai persamaan (2).

$$Ketebalan\ lapisan = \frac{Ta-Tb}{2} \dots\dots\dots\dots (1)$$

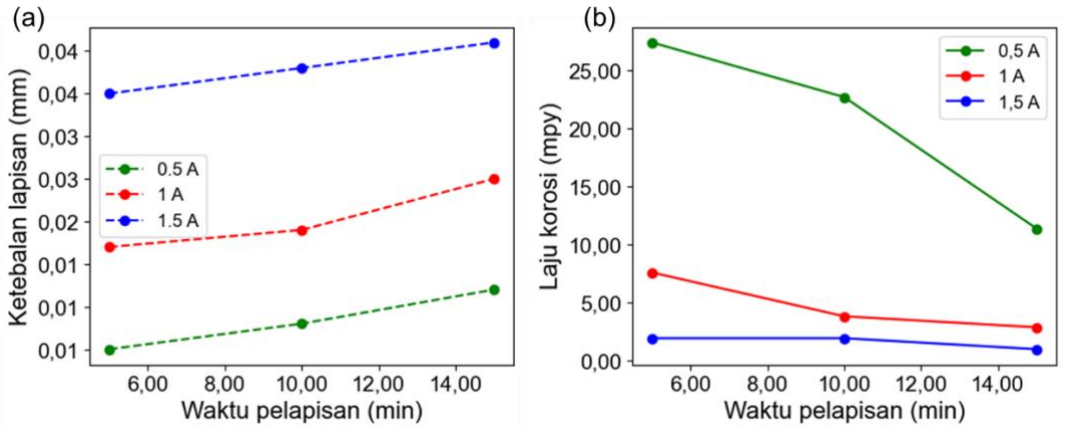
$$laju\ korosi = \frac{534\ x\ W}{\rho\ x\ A\ x\ T} \dots\dots\dots\dots (2)$$

Dimana, laju korosi dinyatakan dalam mpy (*mils per year*), 534 adalah konstanta bila laju korosi dinyatakan dengan mpy, W adalah selisih berat awal dan berat akhir (mg), ρ adalah densitas benda yang dilapisi (gr/cm^3), A adalah luas permukaan (in^2), dan T adalah waktu pelapisan (jam).
Berdasarkan hasil eksperimen, analisis data juga dilakukan dengan metode *Ordinary Least Squares* (OLS) *regression* untuk mendapatkan model hubungan antara parameter elektroplating (arus dan waktu) terhadap ketebalan lapisan dan laju korosi. Dalam implementasi membentuk model prediksi ketebalan lapisan dan laju korosi digunakan Python dengan library statsmodels [13]. Arus dan waktu elektroplating digunakan sebagai *feature* sedangkan ketebalan lapisan dan laju korosi digunakan sebagai target. Data eksperimen disusun sebagai dataset untuk analisis data dengan OLS *regression* dengan menampilkan ringkasan statistik seperti R2 untuk menunjukkan performa model prediksi dan p-value untuk menentukan signifikansi pengaruh parameter elektroplating terhadap ketebalan lapisan dan laju korosi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Ketebalan lapisan hasil elektroplating dengan variasi kondisi pelapisan ditunjukkan pada gambar 2a. Variasi arus 0,5A, 1A, 1,5A menunjukkan bahwa semakin tinggi kuat arus yang digunakan maka semakin tebal pula lapisan yang di hasilkan. Sedangkan pada variasi waktu pelapisan juga terlihat bahwa semakin lama waktu yang di berikan juga semakin tebal lapisan yang diperoleh, tetapi peningkatan ketebalan tidak sesignifikan dibanding hasil dari variasi kuat arus. Dengan mengamati grafik tersebut maka dapat terlihat adanya pengaruh antara arus yang divariasikan terhadap ketebalan lapisan yang di hasilkan. Hal ini sesuai

dari hukum Faraday, dimana kedua hukumnya menyatakan secara matematis bahwa masa yang terbentuk pada proses elektrokimia adalah berbanding lurus dengan kuat arus listrik, hal tersebut sesuai dengaan kutipan dari [14]. Peningkatan ketebalan lapisan seiring kenaikan arus terjadi karena proses pelepasan ion nikel pada anoda dan pengendapan ion nikel pada katoda. Semakin tinggi arus maka pelepasan ion pada anoda semakin cepat, serta pengendapan ion nikel pada spesimen pun lebih cepat. Karena dengan meningkatnya kuat arus listrik yang mengalir maka akan menyebabkan jumlah ion-ion semakin banyak, sehingga ion yang terlepas dari larutan semakin banyak dan mengendap di katoda.



Gambar 2. Hubungan antara waktu dengan variasi arus pelapisan terhadap (a) ketebalan lapisan dan (b) laju korosi dari data eksperimen

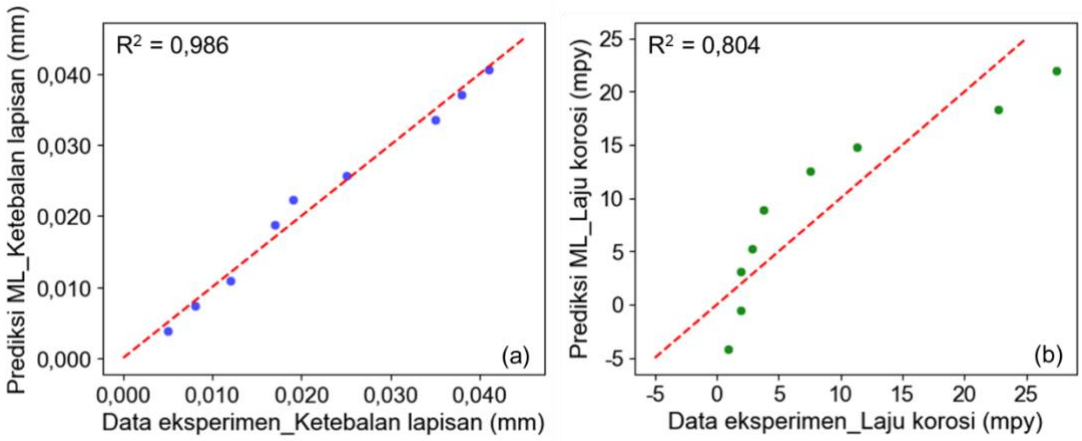
Pengujian metode *coupon* dilakukan untuk mengetahui laju korosi pada baja AISI 1020 yang sudah dilapisi Ni. Gambar 2b menunjukkan laju korosi baja AISI 1040 semakin rendah saat kenaikan arus elektroplating. Berdasarkan perhitungan laju korosi dapat dilihat spesimen original (tanpa *plating*/*coating*) memiliki laju korosi sebesar 42,52 mpy sedangkan spesimen elektroplating yang divariasi dengan arus 0,5A selama 5 menit, 10 menit, dan 15 menit memiliki laju korosi berturut-turut sebesar 27,40 mpy, 22,68 mpy, 11,34 mpy. Ketahan korosi lebih baik saat arus yang digunakan 1,0A untuk waktu pelapisan 5, 10, dan 15 menit dengan nilai laju korosi 27,40, 22,68, dan 11,34 mpy. Sedangkan penurunan laju korosi yang significant dibandingkan baja tanpa pelapisan Ni terjadi saat arus 1,5A dengan variasi waktu 5, 10, dan 15 menit yakni menjadi 1,89, 1,89, dan 0,94 mpy. Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin besar arus dan lama pelapisan memberikan laju korosi yang lebih rendah.

Pengamatan morfologi baja AISI 1040 sebelum dan setelah dilakukan uji ketahanan korosi ditunjukkan pada gambar 3. Setelah elektroplating dan sebelum dilakukan pengujian laju korosi, terlihat dengan jelas perbedaan struktur lapisan Ni yang berbeda saat arus paling kecil dan waktu elektroplating paling kecil (0,5 A selama 5 menit) dengan arus palingbesar dan waktu yang paling lama (1,5 A selama 15 menit). Pada kondisi pelapisan 0,5 A selama menit belum menjangkau semua area baja AISI 1040, sehingga terdapat are yang tidak dilapisi oleh Ni. Akibatnya, laju korosi semakin tinggi dan produk korosi yang dihasilkan paling banyak. Sebaliknya, ketika kondisi arus dan waktu elektroplating yang paling besar memberikan kemampuan melindungi baja AISI 1040 yang lebih optimal. Hal itu dibuktikan dengan terbentuknya sedikit produk korosi dan masih terlihat lapisan Ni setelah uji korosi selama 48 jam.



Gambar 3. Morfologi baja AISI 1040 (a) setelah elektroplating dan sebelum pengujian laju korosi (b) setelah pengujian laju korosi selama 48 hari

Selain berdasarkan data pengujian, analisa hubungan variable (arus dan waktu elektroplating) dilakukan menggunakan pendekatan machine learning, khususnya metode regresi *Ordinary Least Squares* (OLS). Pendekatan ini memberikan pemahaman yang lebih dalam mengoptimalkan proses elektroplating. Model prediksi dibentuk dari dataset yang terdiri dari variabel arus pelapisan dan waktu pelapisan sebagai feature, sedangkan tagetnya adalah ketebalan lapisan ataupun laju korosi. Performa model prediksi dari metode OLS ditampilkan melalui parity plot sesuai gambar 4a untuk model ketebalan lapisan dan gambar 4b untuk model laju korosi. Kemampuan model dievaluasi berdasarkan nilai R^2 (*coefficient of determinant*). Model ketebalan lapisan memiliki performa yang lebih baik dibandingkan model laju korosi, yakni R^2 sebesar 0,986. Persebaran nilai ketebalan lapisan dari data eksperimen dan prediksi ML mendekati garis ideal, di mana nilai prediksi mendekati data eksperimen sehingga mampu melakukan prediksi. Sebaliknya, model laju korosi memiliki persebaran data yang tidak linear dan tersebar menjauhi garis ideal. Hal ini menunjukkan bahwa variable arus dan lama pelapisan berpengaruh signifikan secara linear terhadap ketebalan lapisan, namun untuk laju korosi pada kondisi tertentu variasi kondisi arus dan waktu elektroplating tidak memberikan kenaikan yang signifikan. Secara statistik, pengaruh variable dapat diketahui melalui nilai p-*value* dari metode regresi OLS seperti rangkuman pada Tabel 1. Nilai p-*value* kurang dari 0,05 menunjukkan bahwa variable tersebut memberikan kontribusi yang signifikan terhadap target. Dalam hal ini, arus dan waktu pelapisan berpengaruh terhadap ketebalan lapisan, namun waktu pelapisan tidak berkontribusi signifikan terhadap laju korosi. Variable waktu pelapisan pada model laju korosi memiliki p-*value* 0,126 di mana menunjukkan pengaruh terhadap model yang tidak signifikan dengan tingkat kepercayaan 95%.



Gambar 4. Perbandingan nilai antara hasil eksperimen dan prediksi ML menggunakan

Tabel 1. P-value untuk setiap variable terhadap ketebalan lapisan laju korosi

Variable	Ketebalan lapisan	Laju korosi
Arus pelapisan	0.003	0,004
Waktu pelapisan	~0.000	0,126

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa variasi arus dan waktu pelapisan memiliki pengaruh yang berbeda terhadap ketebalan lapisan dan laju korosi sebagaimana dianalisis menggunakan pendekatan OLS regression. Hasil regresi mengindikasikan bahwa arus dan waktu pelapisan lebih berkontribusi terhadap ketebalan lapisan, sementara hanya arus pelapisan yang lebih berpengaruh pada sifat ketahanan korosi. Evaluasi model menggunakan parity plot menunjukkan bahwa OLS mampu memprediksi hasil eksperimen dengan tingkat akurasi yang baik, meskipun terdapat beberapa penyimpangan yang kemungkinan disebabkan oleh faktor eksperimental atau hubungan non-linier antar variabel. Hasil ini mengonfirmasi bahwa pendekatan *machine learning* berbasis OLS dapat digunakan sebagai metode analisis dalam elektroplating, terutama dalam memahami keterkaitan antara parameter proses dan kualitas lapisan.

DAFTAR PUSTAKA

[1] A. P. Sandi, E. Ginting Suka, Y. Iman Supriyatna, L. Ilmu Pengetahuan Indonesia, and L. Selatan, "Pengaruh Waktu Elektroplating Terhadap Laju Korosi Baja AISI 1020 Dalam Medium Korosif NaCl 3%," *J. Teor. dan Apl. Fis.*, vol. 05, no. 02, pp. 205–212, 2017.

[2] B. Febriansyah, N. Mulyaningsih, and S. Hastuti, "DAMPAK VARIASI WAKTU ELEKTROPLATING TEMBAGA-NIKEL-KROM TERHADAP KEAWETAN LAPISAN BAJA AISI 1015," *SENASTER "Seminar Nas. Ris. Teknol. Ter.*, vol. 4, no. 1, p. 2023, Nov. 2023.

[3] F. Galeotti, F. Lissandrello, and L. Magagnin, "Electrodeposition of Zn-Cr Alloys: A Comparison with Pure Zinc," *ECS Meet. Abstr.*, vol. MA2023-02, no. 20, p. 1262, Dec. 2023.

[4] R. F. Shekhanov, S. N. Gridchin, and A. V. Balmasov, "Electroplating and Physicochemical Properties of Zinc–Nickel Alloy Coatings from Ammonium Oxalate Electrolytes," *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, vol. 56, no. 4, pp. 427–431, Jul. 2020.

[5] Saefuloh Imam, Haryadi, and Muhammad Gema Winisuda, "Studi Analisa Kuat Arus Proses Elektroplating Dengan Pelapis Nikel Cobalt Terhadap Kekerasan, Ketahanan Korosi, Dan Penambahan Tebal Baja Karbon Rendah ST 41," *J. Tek. Mesin Untirta*, vol. III, no. 2, pp. 42–47, 2017.

[6] M. Y. Niam A, H. (Helmy) Purwanto, and S. M. Bondan Respati, "Pengaruh Waktu Pelapisan Elektro Nikel-khrom Dekoratif Terhadap Ketebalan, Kekerasan Dan Kekasaran Lapisan," *J. Momentum UNWAHAS*, vol. 13, no. 1, p. 114995, 2017.

[7] R. Katirci and K. I. Danaci, "The optimization of nickel electroplating process parameters with artificial intelligence methods," *J. Appl. Electrochem.*, vol. 53, no. 10, pp. 2077–2089, Oct. 2023.

[8] T. Xiang *et al.*, "Fabrication of Inherent Anticorrosion Superhydrophobic Surfaces on Metals," *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 6, no. 4, pp. 5598–5606, Apr. 2018.

[9] H. M. Forooshani, M. Aliofkhazraei, and H. Bagheri, "Fabrication of hierarchical dual structured (HDS) nickel surfaces and their corrosion behavior," *J. Alloys Compd.*, vol. 784, pp. 556–573, May 2019.

[10] H. karima *et al.*, "Corrosion inhibition impact of Pyracantha coccinea M. Roem extracts and their use as additives in zinc electroplating: Coating morphology, electrochemical and weight loss investigations," *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 121, pp. 337–348, Apr. 2021.

[11] Mad Yusup, Diyaa Aaisyah Salmaa Putri Atmaja, Purbawati Purbawati, and Ida Rosanti, "Optimasi Kondisi Operasi Proses Elektroplating Nikel-Khrom Untuk Ketahanan Korosi Baja Profile L," *J. Kendali Tek. dan Sains*, vol. 2, no. 3, pp. 239–248, Jul. 2024.

[12] H. ZHOU *et al.*, "Pulse electroplating of Ni-W-P coating and its anti-corrosion performance," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 28, no. 1, pp. 88–95, Jan. 2018.

[13] S. Seabold and J. Perktold, "Statsmodels: Econometric and Statistical Modeling with Python," *scipy*, pp. 92–96, 2010.

[14] S. Sugiyarta, A. P. Bayuseno, and S. Nugroho, "Pengaruh konsentrasi larutan dan kuat arus terhadap ketebalan pada proses pelapisan nikel untuk baja karbon rendah," *ROTASI*, vol. 14, no. 4, pp. 23–27, 2012.