

Model Efisiensi Arus pada Elektrolisis Serbuk Tembaga Menggunakan Metode Perancangan Percobaan Faktorial Desain 2^K

R. Mohamad Fajar Gunawan¹, Soleh Wahyudi¹, Andrie Harmaji¹, Diana Kamaliyah Ichsan¹,
Gigih Safardwiyansyah¹, dan Naufal Dhiya Ulhaq¹

¹Program Studi Teknik Metalurgi, Fakultas Teknik Dan Desain, Institut Teknologi Sains Bandung,
Kota Deltamas Lot-A1 CBD, Jl. Ganesha Boulevard, Cikarang Pusat, Jawa Barat 17530, Indonesia

gunawanfajar656@gmail.com, solehwahyudi@yahoo.com, harmaji.a@gmail.com,
dianakamaliyah038@gmail.com, gigih.safar@gmail.com, naufalulhaqhaq@gmail.com

Abstrak

Dalam *paper* ini disampaikan hasil pengembangan model efisiensi arus pada elektrolisis serbuk tembaga dan menganalisis faktor yang paling berpengaruh terhadap efisiensi arus menggunakan perancangan percobaan faktorial 2^K . Tiga variabel bebas yang dipertimbangkan adalah konsentrasi ion tembaga (Cu), rapat arus, dan waktu elektrolisis. Percobaan elektrolisis serbuk tembaga dilakukan dengan menggunakan anoda plat tembaga murni (99,88% Cu) dan katoda dari stainless steel 316L. Efisiensi arus dihitung berdasarkan data berat serbuk tembaga yang dihasilkan. Karakterisasi serbuk tembaga menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk mengetahui morfologi dan distribusi ukuran serbuk, *X-ray Diffraction* (XRD) untuk mengidentifikasi fasa/senyawa serbuk, *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDX) untuk menganalisis komposisi unsur dan *Particle Size Analyzer* (PSA) untuk mengetahui ukuran partikel serbuk dan distribusinya. Dengan model prediksi diperoleh efisiensi arus tertinggi sebesar 96%. Serbuk tembaga yang dihasilkan memiliki morfologi berstruktur dendritik dengan ukuran partikel rata-rata sebesar 114,9 μm serta bersenyawa *cuprite* (Cu_2O) dan tembaga (Cu) dengan komposisi 88,17% Cu dan 11,83% O.

Kata kunci: Faktorial Desain 2^K , Minitab, Elektrolisis, Efisiensi Arus, Serbuk Tembaga

Abstract

This paper presents the results of developing a current efficiency model for copper powder electrolysis and analyzes the factors that most influence current efficiency using a 2^K factorial experimental design. The three independent variables are copper ion (Cu) concentration, current density, and electrolysis time. Copper powder electrolysis experiments were conducted using a pure copper plate anode (99.88% Cu) and a 316L stainless steel cathode. Current efficiency is calculated based on data on the weight of the copper powder produced. Copper powder characterization uses a Scanning Electron Microscope (SEM) to determine the morphology and size distribution of the powder, X-ray Diffraction (XRD) to identify powder phases/compounds, Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) to analyze the elemental composition and Particle Size Analyzer (PSA) to determine the powder particle size and distribution. The prediction model obtains the highest current efficiency at 96%. The resulting copper powder has a dendritic structure morphology with an average particle size of 114.9 μm . It comprises cuprite (Cu_2O) and copper (Cu) with a composition of 88.17% Cu and 11.83% O.

Keywords: 2^K Design Factorial, Minitab, Electrolysis, Current Efficiency, Copper Powder

1. Pendahuluan

Tembaga memiliki sifat konduktivitas listrik yang sangat baik sehingga banyak dimanfaatkan sebagai bahan utama maupun paduan untuk pembuatan komponen elektronik dan listrik (Schlesinger dkk., 2011). Tembaga juga bersifat antimikroba (Grass dkk., 2011). Dalam bentuk serbuk, tembaga merupakan salah satu produk hilir dari logam tembaga yang dibutuhkan untuk beberapa aplikasi dan komponen dari suatu produk (Mubarok & Wahyudi, 2017). Serbuk tembaga dalam senyawa tembaga oksida dapat digunakan sebagai bahan campuran pupuk, industri kimia dan aplikasi spesifik lainnya (Mubarok & Wahyudi, 2017). Ada beberapa metode pembuatan serbuk diantaranya adalah dengan mekanik (*Mechanical atau Pulverization*), kimia (*Chemical*), elektrolisis (*Electrolytic Deposition*), dan atomisasi (*Atomization*) (Henny Mulyani dkk., 2019).

Elektrolisis serbuk tembaga memiliki rentang efisiensi arus (*current efficiency*) dan ukuran partikel yang lebar. Dari hasil penelitian yang pernah dilakukan terdapat rentang efisiensi arus yang cukup lebar yaitu 49-63% (Damisih dkk., 2015) dan 60-80% (Nekouei dkk., 2013) dengan faktor yang berpengaruh terhadap efisiensi arus diantaranya

Info Makalah:

Dikirim : 07-20-23;

Revisi 1 : 11-07-23;

Revisi 2 : 01-22-24;

Diterima : 01-26-24.

Penulis Korespondensi:

Telp : -

e-mail : solehwahyudi@yahoo.com

adalah konsentrasi ion Cu, rapat arus dan waktu elektrolisis. Efisiensi arus merupakan perbandingan nilai berat logam yang terendapkan di katoda atau berat logam yang dihasilkan (berat logam aktual) dengan nilai berat logam yang terendapkan secara teoritis pada proses elektrolisis. Adapun efisiensi arus pada metode elektrolisis dinyatakan dengan persamaan (1) (Hurin, 2019):

$$Efisiensi\ Arus = \frac{W_{actual}}{W_{teoritis}} \times 100\% \quad (1)$$

$$W_{teoritis} = \frac{(BA \times I \times t)}{(n \times 96500)} \quad (2)$$

Metode perancangan percobaan (*Design of Experiment*) faktorial 2^K dapat digunakan untuk mengetahui faktor yang paling berpengaruh (Montgomery, 2020). Selanjutnya dengan menggunakan *software* Minitab, tabel perancangan percobaan faktorial 2^K dapat dikembangkan untuk mendapatkan model regresi untuk prediksi efisiensi arus pada sintesis serbuk tembaga (Allen, 2019). Perancangan percobaan faktorial 2^K, memiliki arti dimana angka 2 pada 2^K menunjukkan 2 tingkatan nilai pada masing-masing faktor yang diteliti yaitu tingkatan rendah dan tinggi sedangkan parameter (^K) mewakili faktor yang akan diteliti. Terdapat 3 faktor elektrolisis yang akan diteliti yaitu konsentrasi ion Cu, rapat arus dan waktu elektrolisis.

Tabel *Analysis of Variance* (ANOVA) merupakan rekapitulasi hasil perhitungan masing-masing faktor berdasarkan tabel perancangan percobaan faktorial 2^K. Berdasarkan nilai F_{value} yang ditampilkan di tabel ANOVA akan dapat diketahui faktor yang paling berpengaruh. Nilai F_{value} dihasilkan dengan menggunakan persamaan (3) dan (4):

$$SS_{model} = SS_A + SS_B + SS_C + SS_{AB} + SS_{BC} + SS_{AC} + SS_{ABC} \quad (3)$$

$$F_{value} = \frac{MS_{model}}{MS_{error}} \quad (4)$$

Hasil eksperimen menggunakan faktorial desain 2^K dapat dengan mudah dinyatakan dalam bentuk respon model regresi dijelaskan oleh persamaan polinomial derajat pertama (Hribernik dkk., 2009):

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^K \beta_{i \times i} + \sum_{i < j} \sum \beta_{i \times \dots \times i \dots \times j} + \varepsilon \quad (5)$$

Dengan menggunakan perancangan percobaan faktorial 2³ diharapkan dapat diketahui faktor yang paling berpengaruh pada proses elektrolisis serbuk tembaga. Dan dengan dikembangkannya model prediksi efisiensi arus yang melibatkan faktor konsentrasi ion tembaga, rapat arus dan waktu elektrolisis diharapkan dapat dimanfaatkan untuk menetapkan kondisi operasional proses elektrolisis agar dihasilkan efisiensi arus yang optimum.

2. Metode

Pada penelitian ini menggunakan variasi konsentrasi ion Cu (0,02–0,2) mol/liter, rapat arus (0,05–0,2) A/cm² dan waktu elektrolisis (300–1200) detik. Proses elektrolisis dilakukan di suhu ruangan (25°C) dengan menggunakan bahan tembaga sulfat (CuSO₄.H₂O) dan asam sulfat (H₂SO₄). Endapan serbuk yang terbentuk di *scrapping* menggunakan alat *ultrasonic* dan selanjutnya dibilas dengan aquades dan dikeringkan dalam oven pada suhu 100°C. Serbuk yang telah kering kemudian ditimbang untuk kemudian dihitung efisiensi arusnya. Serbuk yang dihasilkan pada efisiensi tertinggi dilakukan uji SEM untuk mengetahui morfologi serbuk dan distribusi ukuran serbuk, uji EDX untuk mengetahui komposisi unsur serbuk tembaga, uji XRD untuk mengetahui fasa yang terbentuk dan uji PSA untuk mengetahui distribusi ukuran partikelnya.

2.1. Proses Elektrolisis Serbuk Tembaga

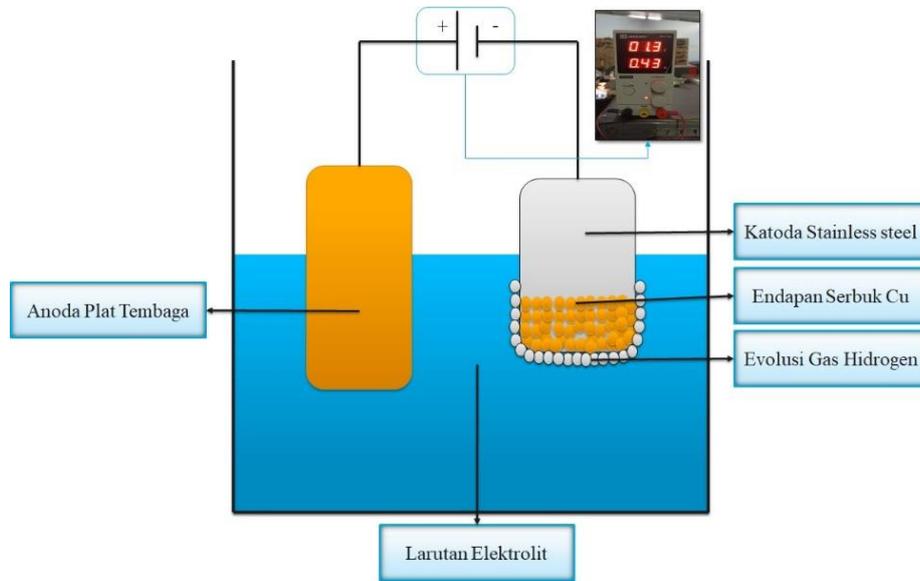
Serbuk tembaga disintesis melalui metode elektrolisis. Larutan elektrolit terdiri dari *copper sulfate* (CuSO₄.5H₂O), asam sulfat (H₂SO₄) dan amidis (aquades). Pengujian *optical emission spectroscopy* (OES) pada anoda tembaga menunjukkan kadar Cu sebesar 99,88%. Preparasi plat tembaga berukuran 7 cm × 2,5 cm sebagai anoda dan plat *stainless steel* 316L berukuran 6 cm × 2,5 cm sebagai katoda. Ukuran terendamnya adalah 4,5×2,5 cm untuk anoda dan 3,5×2,5 cm untuk katoda. Hubungkan DC *power supply* dengan anoda tembaga ke kutub positif (+) dan untuk katoda SS 316L ke kutub negatif (-). Skema sel elektrolisis serbuk tembaga ditampilkan pada Gambar 1.

Variasi percobaan menggunakan 3 variabel bebas, yakni konsentrasi ion Cu, rapat arus dan waktu proses. Variasi konsentrasi Cu adalah 0,02–0,2 (mol/liter), variasi rapat arus yang digunakan adalah 0,05–0,2 (A/cm²), dan waktu proses yang digunakan adalah 300–1200 (detik). Tingkatan nilai terendah dan tertinggi di masing-masing parameter ditampilkan dalam Tabel 1.

2.2. Faktorial Desain 2^K

Faktorial Desain 2^K adalah faktor K, dengan masing-masing faktor hanya menampilkan dua tingkatan nilai (nilai minimum dan maksimum). Replikasi lengkap dari desain semacam itu membutuhkan 2×2×...×2 = 2^K pengamatan.

Terdapat 3 faktor ($K = 3$) variabel independen yang digunakan yaitu rapat arus (A), waktu (B) dan konsentrasi ion Cu (C).



Gambar 1. Skema Sel Elektrolisis Serbuk Tembaga.

Tabel 1. Penamaan Faktor serta Nilai Terendah dan Tertinggi di Masing-Masing Parameter Elektrolisis.

Parameter	Faktor	Level	
		Minimum	Maksimum
Rapat Arus (A/cm^2)	A	0,05	0,2
Waktu (menit)	B	5	20
Konsentrasi Cu (M)	C	0,02	0,2

2.3. Verifikasi Hasil Model Prediksi dengan Hasil Percobaan

Model prediksi efisiensi arus elektrolisis serbuk tembaga yang telah dihasilkan kemudian dilakukan verifikasi dengan hasil percobaan pada kondisi operasional tertentu. Nilai efisiensi arus dari hasil model dengan hasil percobaan kemudian diuji secara statistik menggunakan T-test pada tingkat kepercayaan 95% ($\alpha = 0,05$).

3. Hasil dan Pembahasan

Data lengkap dari hasil percobaan yang menghasilkan nilai efisiensi arus pada variasi konsentrasi ion Cu, rapat arus dan waktu elektrolisis tercantum dalam Tabel 2. Dari data tersebut, nilai efisiensi yang tertinggi sebesar 96% dicapai pada kondisi konsentrasi ion Cu sebesar 0,2 M, waktu elektrolisis sebesar 20 menit dan rapat arus sebesar 0,05 A/cm^2 (sampel No. 8). Pada kondisi tersebut sangat ideal atau optimal untuk sintesis serbuk tembaga dengan metode elektrolisis. Selanjutnya, pembahasan akan disampaikan terkait faktor yang paling berpengaruh pada elektrolisis serbuk tembaga, pengembangan model efisiensi arus pada elektrolisis serbuk tembaga, hasil model prediksi efisiensi arus, dan karakteristik serbuk tembaga.

3.1. Faktor Yang Paling Berpengaruh Pada Elektrolisis Serbuk Tembaga

Tabel 3 menampilkan ANOVA hasil pengolahan data menggunakan *software* Minitab dari data efisiensi arus di Tabel 2. Berdasarkan Tabel 3, diketahui bahwa faktor konsentrasi ion tembaga merupakan faktor yang paling berpengaruh karena memiliki nilai F_{value} paling besar dan P_{value} paling kecil. Lalu disusul faktor rapat arus. Faktor waktu tidak berpengaruh pada efisiensi arus elektrolisis serbuk tembaga karena nilai F_{value} paling kecil dan P_{value} besar melebihi nilai α . Kondisi tersebut sesuai dengan hasil yang diperoleh dari penelitian (Sopiah, 2008), dimana agar diperoleh efisiensi arus tinggi maka harus digunakan konsentrasi logam yang tinggi dan rapat arus yang kecil. Dengan tingginya konsentrasi logam dalam larutan elektrolit maka volume gas hidrogen yang terbentuk menurun sehingga reaksi terbentuknya serbuk tembaga menjadi lebih dominan dan dapat meningkatkan efisiensi arus.

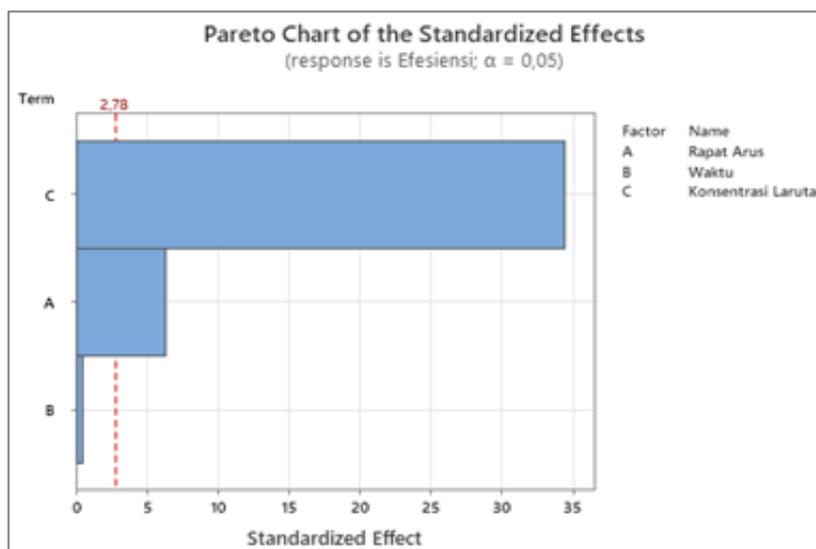
Tabel 2. Data Perolehan Nilai Efisiensi Arus Sesuai Rancangan Percobaan Faktorial 2³.

Sampel	Konsentrasi Ion Cu (M)	Waktu Elektrolisis (menit)	Rapat Arus (A/cm ²)	Berat Cu sesungguhnya (gram)	Berat Cu Teoritis (gram)	Efisiensi Arus (%)
1	0,02	5	0,05	0,011	0,042	26
2	0,02	5	0,2	0,016	0,172	9
3	0,02	20	0,2	0,073	0,691	11
4	0,02	20	0,05	0,034	0,169	20
5	0,2	5	0,2	0,136	0,172	79
6	0,2	5	0,05	0,039	0,042	92
7	0,2	20	0,2	0,575	0,691	83
8	0,2	20	0,05	0,163	0,169	96

Tabel 3. Data Perolehan ANOVA untuk Menentukan Faktor yang Paling Berpengaruh.

Analysis of Variance						
Source	DF	Sum of Square	Mean Square	F-Value	P-Value	
Rapat Arus	1	338,0	338,0	39,76	0,003	Significant
Waktu	1	2,0	2,0	0,24	0,653	Not Significant
Konsentrasi Cu	1	10082,0	10082,0	1186,12	0,000	Significant
Error	4	34,0	8,5			
Total	7	10456,0				

Hasil yang diperoleh dari olah data menggunakan Minitab adalah diagram Pareto. Diagram Pareto juga dapat menunjukkan faktor yang paling berpengaruh. Diagram Pareto dari hasil olah data Tabel 2 menggunakan Minitab ditampilkan pada Gambar 2. Berdasarkan Gambar 2, diketahui bahwa konsentrasi ion tembaga merupakan faktor yang paling berpengaruh pada efisiensi arus. Parameter rapat arus masih merupakan faktor yang berpengaruh terhadap efisiensi arus. Namun, parameter waktu elektrolisis tidak berpengaruh pada efisiensi karena nilainya lebih rendah dari batas 2,78 yang merupakan garis α .



Gambar 2. Tampilan Diagram Pareto.

Secara visual, proses elektrolisis yang berlangsung pada konsentrasi ion Cu nya tinggi, serbuk tembaga yang dihasilkan relatif lebih banyak dan evolusi gas hidrogen yang terbentuk sangat rendah. Tapi, jika konsentrasi ion Cu nya rendah maka evolusi gas hidrogen yang terbentuknya lebih banyak dan serbuk tembaga yang dihasilkan relatif sedikit. Selanjutnya pada variasi rapat arus sebagai faktor kedua yang mempengaruhi nilai efisiensi arus, secara visual, proses elektrolisis pada rapat arus yang rendah menunjukkan reaksi evolusi gas hidrogen lebih rendah dibandingkan pada rapat arus tinggi.

3.2. Pengembangan Model Efisiensi Arus Pada Elektrolisis Serbuk Tembaga

Model prediksi yang dihasilkan dari olah data Tabel 2 menggunakan *software* Minitab ditampilkan pada persamaan (6) dan untuk mengetahui tingkat validitasnya, digunakan ANOVA untuk model prediksi tersebut. Sebuah model persamaan dinyatakan valid jika memiliki *P-value* yang sangat rendah dan *R-square* yang mendekati 100% (Montgomery, 2020). Data perolehan ANOVA untuk model prediksi ditampilkan dalam Tabel 4. Berdasarkan Tabel

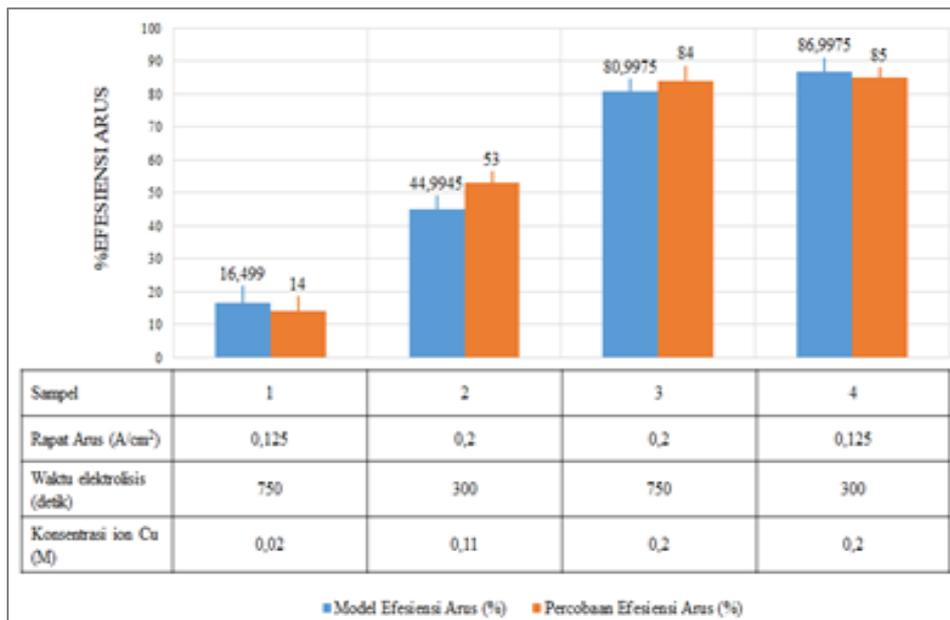
4, model prediksi efisiensi arus elektrolisis serbuk tembaga sangat valid. Hal tersebut ditunjukkan dari nilai *P-Value* yang sangat rendah dan nilai *R-square* yang mencapai 99,67%

$$\text{Efisiensi Arus} = 18,61 - (86,7 \times \text{Rapat Arus}) + (0,067 \times \text{Waktu}) + (1,5778 \times \text{Konsentrasi Cu}) \quad (6)$$

Tabel 4. Data Perolehan ANOVA untuk Model Prediksi.

Analysis of Variance						
Source	DF	Sum of Square	Mean Square	F-Value	P-Value	
Model	3	10422,0	3474,0	408,71	0,000	Significant
R-Square		Adj-R-Square		R-Square Pred		
99,67%		99,43%		98,70%		

Selanjutnya, hasil model prediksi tersebut diverifikasi dengan hasil percobaan. Perbandingan efisiensi arus antara hasil model prediksi dengan percobaan pada kondisi operasional yang dibuat acak ditampilkan pada Gambar 3. Selanjutnya, dari data efisiensi arus tersebut diuji secara statistik dengan metode T-test untuk membuktikan hipotesis bahwa efisiensi arus dari model prediksi sama dengan efisiensi arus dari hasil percobaan. Hipotesis tersebut terbukti jika syarat nilai $T_{hitung} (|t_0|)$ lebih kecil dari nilai $T_{tabel} (t_{0,025,3})$ (Montgomery, 2020). Uji T-test antara data efisiensi dari hasil model prediksi dengan efisiensi arus dari hasil percobaan ditampilkan pada Tabel 5. Berdasarkan perhitungan T-test diperoleh $T_{hitung} (|t_0|)$ sebesar -0,661 dan dari pengecekan tabel distribusi T pada tingkat kepercayaan 95% dengan derajat kebebasan 3 diperoleh $T_{tabel} (t_{0,025,3})$ sebesar 3,182. Dengan demikian $T_{hitung} (|t_0|)$ lebih kecil dari $T_{tabel} (t_{0,025,3})$ sehingga hipotesis bahwa efisiensi arus dari model prediksi sama dengan efisiensi harus dari hasil percobaan telah terbukti secara statistik.



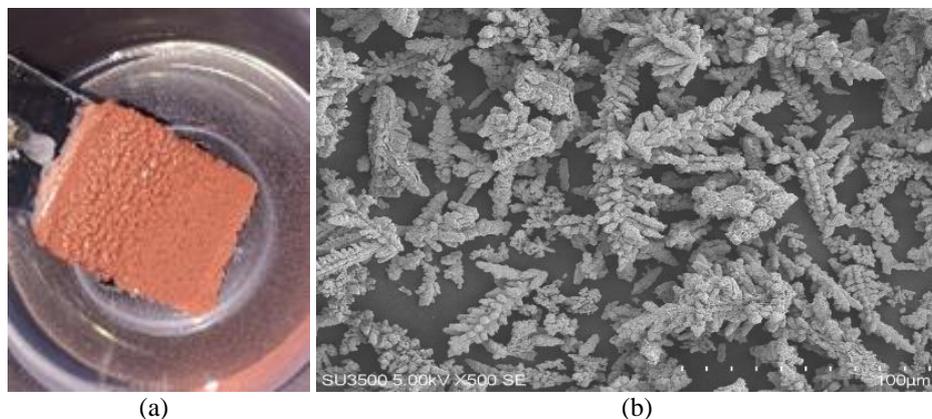
Gambar 3. Perbandingan Efisiensi Arus dari Hasil Model Prediksi dengan Hasil Percobaan (*Real*).

Tabel 5. Hasil Pengujian T-test Efisiensi Arus Antara Model dan *Real*.

Sampel	Efisiensi Arus (%)		$d_j = \eta_{model} - \eta_{real}$	$(d_j - \bar{d}_j)^2$
	Model	Real		
1	80,997	84	-3,003	1,891
2	16,499	14	2,499	17,030
3	44,995	53	-8,006	40,669
4	86,998	85	1,998	13,146
	\bar{d}_j		-1,628	
	$\Sigma(d_j - \bar{d}_j)^2$			72,737
	S_d		4,924	
	$ t_0 $		-0,661	
	$t_{0,025,3}$		3,182	

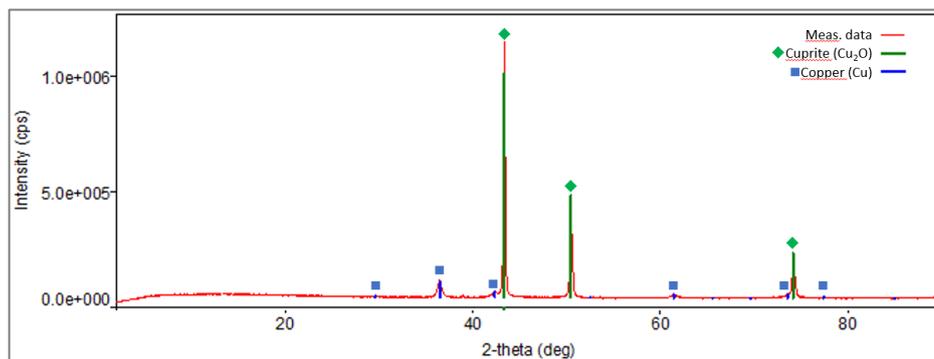
3.3. Karakteristik Serbuk Tembaga

Serbuk tembaga yang dikarakterisasi berasal dari serbuk yang dihasilkan saat tercapai efisiensi arus 96%. Tampak pada Gambar 4(a) foto endapan serbuk tembaga yang masih menempel pada permukaan katoda dan jika serbuk tersebut telah dikeringkan lalu diamati dengan SEM, tampak tampilan partikel serbuknya berbentuk dendritik. Foto SEM serbuk tembaga dapat dilihat pada Gambar 4 (b).

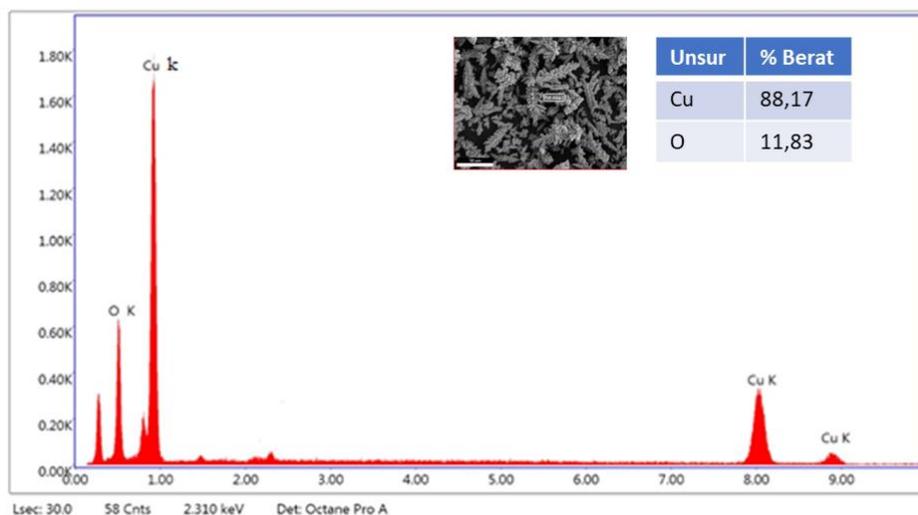


Gambar 4. (a) Serbuk Tembaga yang Masih Menempel pada Permukaan Katoda dan (b) Partikel Serbuk Tembaga Hasil Foto SEM.

Gambar 5 menampilkan hasil XRD serbuk tembaga yang telah dikeringkan dalam oven pada suhu 10°C. Berdasarkan hasil XRD diketahui bahwa terdapat serbuk yang berunsur tembaga (Cu) dan serbuk yang bersenyawa cuprite (Cu_2O). Gambar 6 menampilkan hasil uji EDX dimana diketahui komposisi serbuk tembaga terdiri atas 88,17% Cu dan 11,83% O.

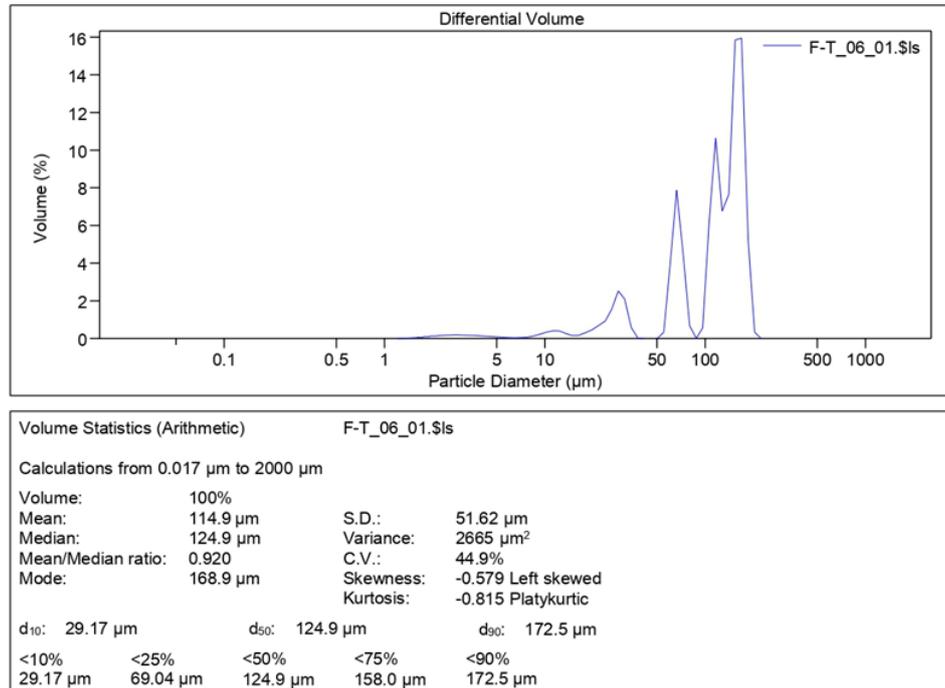


Gambar 5. Grafik Hasil Pengujian XRD Serbuk Tembaga.



Gambar 6. Hasil Uji EDX Serbuk Tembaga.

Selanjutnya, pada Gambar 7, ditampilkan hasil uji PSA untuk mengetahui distribusi ukuran partikel serbuk tembaga. Berdasarkan Gambar 7 diketahui bahwa ukuran rata-rata partikel serbuk tembaga adalah sebesar 114,9 μm .



Gambar 7. Hasil Pengujian PSA Serbuk Tembaga.

Kesimpulan

Faktor yang paling berpengaruh dalam proses elektrolisis serbuk tembaga adalah konsentrasi ion tembaga. Efisiensi arus dapat diprediksi menggunakan model persamaan (7) yang dihasilkan dari perancangan percobaan faktorial 2^3 dengan 3 parameter yakni: rapat arus (A), waktu elektrolisis (B) dan konsentrasi ion Cu (C) pada rentang kondisi operasional rapat arus 0,05-0,2 A/cm^2 , waktu elektrolisis 5-20 menit dan konsentrasi ion tembaga 0,02-0,2 M.

$$\text{Efisiensi Arus} = 18,61 - (86,7 \times A) + (0,067 \times B) + (1,5778 \times C) \quad (7)$$

Nilai efisiensi arus yang dicapai dalam penelitian ini adalah 9-96 %. Serbuk tembaga dari sampel efisiensi arus 96% memiliki bentuk dendritik dengan ukuran rata-rata partikelnya sebesar 114,9 μm , serta berupa Cu dan Cu_2O dengan komposisi 88,17% Cu dan 11,83% O.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Kemendikbudristek Republik Indonesia dalam program *Matching Fund* Kedaireka tahun 2022. PT. Rekayasa *Plating* yang telah menyediakan fasilitas dan perlengkapan selama penelitian ini berlangsung. Serta panitia BKPMi-SENAMM 2022 di Universitas Jend. A. Yani yang telah menerima artikel kami untuk diikutsertakan dalam kegiatan seminar.

Daftar Notasi

$W_{teoritical}$	= Berat endapan teoritis [gram]
W_{actual}	= Berat endapan yang diperoleh dari hasil percobaan [gram]
Y	= Respon (variabel dependen)
β_i	= Koefesien model regresi
β_0	= Nilai konstanta
X_i	= Coded variable
ε	= Random error
η	= Efisiensi arus [%]
I	= Arus listrik [A]
t	= Waktu elektrolisis [s]
BA	= Massa atom relatif [gram/mol]
n	= Valensi

Daftar Pustaka

- Allen, T. T. (2019). Software Overview and Methods Review: Minitab. *Introduction to Engineering Statistics and Lean Six Sigma*, 575–600. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-7420-2_24
- Damisih, D., Fidyarningsih, R., Deca Pravitasari, R., Agustanhakri, A., Aprilia, L., & Purwati, H. (2015). Pembuatan Serbuk Tembaga Berukuran Di Bawah 1 Mikron dengan Metode Elektrolisis. *PROSIDING SEMINAR NASIONAL FISIKA (E-JOURNAL)*, 4, SNF2015-VII-127–132. <https://doi.org/10.21009/03>
- Grass, G., Rensing, C., & Solioz, M. (2011). Metallic copper as an antimicrobial surface. *Applied and environmental microbiology*, 77(5), 1541–1547. <https://doi.org/10.1128/AEM.02766-10>
- Henny Mulyani, R., Carisca Tanjung, Y., Djoko, D., & Prajitno, H. (2019). The Effect of Variations in Current and Time to Manufacture Powder Tin (Sn) via Electrodeposition Process. *Jurnal Kartika Kimia*, 2(1), 7–16. <https://doi.org/10.26874/JKK.V2I1.21>
- Hribernik, A., Bauman, M., & Lobnik, A. (2009). APPLICATION OF 2 k FACTORIAL DESIGN IN WASTEWATER DECOLORIZATION RESEARCH. *19th IMEKO World Congress*, 2225–2229.
- Hurin, F. R. (2019). *Pengaruh Penambahan Aditif Tiourea Terhadap Komposisi Oksigen pada Sintesis Serbuk Tembaga dengan Metode Elektrolisis* [Institut Teknologi Sains Bandung]. https://repository.itsb.ac.id/index.php?p=show_detail&id=562
- Montgomery, D. C. (2020). *Design and Analysis of Experiments*, 10th Edition, Wiley. Wiley, 1–682. <https://www.wiley.com/en-us/Design+and+Analysis+of+Experiments%2C+10th+Edition-p-9781119492443>
- Mubarok, Z., & Wahyudi, S. (2017). Sintesis Serbuk Tembaga dengan Metode Elektrolisis: Studi Perilaku Elektrokimia dan Karakterisasi Serbuk. *Seminar Nasional Metalurgi dan Material (SENAMM) X 2017*, 623–632. <https://www.researchgate.net/publication/336721014>
- Nekouei, R. K., Rashchi, F., & Amadeh, A. A. (2013). Using design of experiments in synthesis of ultra-fine copper particles by electrolysis. *Powder Technology*, 237, 165–171. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2013.01.032>
- Schlesinger, M. E., King, M. J., Sole, K. C., & Davenport, W. G. (2011). Extractive Metallurgy of Copper. *Extractive Metallurgy of Copper*, 1–455. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-64841-3>
- Sopiah, S. (2008). *Analisis Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Proses Elektrolisis Larutan CuSO4 Sebagai Bahan Kajian dalam Pembuatan Modul Praktikum dan Pembelajaran Elektronik* [Institut Teknologi Bandung]. <https://digilib.itb.ac.id/index.php/gdl/view/9280>