

**PENGEMBANGAN MODEL PREDIKSI EFISIENSI ARUS PADA  
ELEKTROLISIS SERBUK TEMBAGA DENGAN METODE  
FAKTORIAL DESAIN  $2^k$**

**JURNAL ILMIAH**

**R. MOHAMAD FAJAR GUNAWAN**

**123.18.012**



**PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI  
FAKULTAS TEKNIK DAN DESAIN  
INSTITUT TEKNOLOGI SAINS BANDUNG  
KOTA DELTAMAS  
JULI 2022**

**LEMBAR PENGESAHAN**

**PENGEMBANGAN MODEL PREDIKSI EFISIENSI ARUS PADA  
ELEKTROLISIS SERBUK TEMBAGA DENGAN METODE FAKTORIAL  
DESAIN 2<sup>K</sup>**

**JURNAL ILMIAH**

**R. MOHAMAD FAJAR GUNAWAN**

**123.18.012**

Diajukan Sebagai Salah Satu Persyaratan Untuk Mendapatkan Gelar Sarjana Teknik  
Pada Program Studi Teknik Metalurgi

Menyetujui,

Kota Deltamas, 29 Juli 2022

**Pembimbing 1**



**Dr. Soleh Wahyudi, S.T., M.T.**

**NIDN : 0410017105**

Mengetahui,

Ketua Program Studi Teknik Metalurgi



**Dr. Eng. Akhmad Ardian Korda, S.T., M.T**

**NIP : 19741204200801101**

# PENGEMBANGAN MODEL PREDIKSI EFISIENSI ARUS PADA ELEKTROLISIS SERBUK TEMBAGA DENGAN METODE FAKTORIAL DESAIN 2<sup>k</sup>

R. Mohamad Fajar Gunawan<sup>[1]</sup>, Dr. Soleh Wahyudi, S.T., M.T. <sup>[2]</sup>

Program Studi Teknik Metalurgi, Institut Teknologi Sains Bandung<sup>[1]</sup>

Email: [gunawanfajar656@gmail.com](mailto:gunawanfajar656@gmail.com)

## Abstrak

Penelitian ini dilakukan untuk mengembangkan model untuk prediksi nilai efisiensi arus elektrolisis serbuk tembaga serta untuk mengetahui faktor yang paling berpengaruh dari 3 variabel bebas yaitu konsentrasi ion Cu, rapat arus dan waktu elektrolisis. Metode yang diterapkan adalah perancangan percobaan faktorial 2<sup>k</sup>. Percobaan elektrolisis serbuk tembaga dilakukan dengan menggunakan anoda plat tembaga dengan kemurnian (99,88% Cu) dan material *stainless steel 316 L* sebagai katoda. Data endapan serbuk yang terbentuk digunakan dalam perhitungan nilai efisiensi arus. Serbuk dikarakterisasi dengan 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 ukuran distribusi serbuk tembaga. Efisiensi arus sintesis elektrolisis serbuk tembaga dengan menggunakan model berada pada rentang 16-87%. Karakteristik serbuk tembaga yang dihasilkan pada efisiensi 9% adalah memiliki morfologi yang berstruktur dendritic, rata-rata ukuran partikel 74,93 μm. Karakteristik serbuk tembaga yang dihasilkan pada efisiensi arus 96% adalah memiliki morfologi yang berstruktur kubik, rata-rata ukuran partikel 114,9 μm. Serbuk tembaga yang dihasilkan bersenyawa *cuprite* (Cu<sub>2</sub>O).

KATA KUNCI: Elektrolisis, Serbuk Tembaga, Efisiensi Arus, Faktorial Desain 2<sup>k</sup>, Minitab.

## I. PENDAHULUAN

Serbuk tembaga merupakan salah satu produk hilir dari logam tembaga yang dibutuhkan untuk beberapa aplikasi dan komponen dari suatu produk. Serbuk tembaga digunakan sebagai bahan utama maupun paduan untuk pembuatan komponen elektronik dan listrik karena memiliki sifat konduktivitas listrik yang sangat baik. Serbuk tembaga dan tembaga oksida juga digunakan sebagai bahan campuran pupuk, industri kimia dan aplikasi spesifik lainnya (Mubarok dkk., 2017).

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui faktor yang paling berpengaruh terhadap efisiensi arus. Selanjutnya dikembangkan model untuk perediksi efisiensi arus pada sintesis

serbuk tembaga. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah menggunakan perancangan percobaan faktorial 2<sup>k</sup>, dimana parameter (k) mewakili 3 faktor yaitu konsentrasi ion Cu, rapat arus dan waktu elektrolisis. 2<sup>k</sup> *faktorial design* merupakan pengaturan faktorial dengan (<sup>k</sup>) faktor, yang masing-masing pada dua tingkat sehingga dalam sistem 2<sup>k</sup> *faktorial design*, faktor-faktornya kuantitatif yang menunjukkan tingkatan rendah dan tinggi (Montgomery, 2013). Penggunaan metode perancangan percobaan faktorial akan menghasilkan suatu model prediksi yang bisa digunakan untuk mendapatkan hasil serbuk yang optimum dengan ukuran partikel yang berada di kisaran < 74 μm.

Untuk melakukan perancangan percobaan faktorial, sangat diperlukan suatu software yang mampu menampilkan *Analysis of Variance* (ANOVA) dan *Design Of Experiment* (DOE), Oleh karena itu, pada penelitian ini digunakanlah perangkat lunak minitab untuk memperoleh model prediksi efisiensi arus pada elektrolisis serbuk tembaga dengan metode perancangan percobaan faktorial. Minitab adalah perangkat lunak statistik yang menyediakan berbagai kemampuan untuk analisis statistik baik dasar dan lanjutan serta merupakan program komputer yang dirancang untuk melakukan pengolahan statistika (Hadijah, 2013).

## II. METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian ini menggunakan variasi konsentrasi ion Cu (0,02 - 0,2) mol/liter, rapat arus (0,05 - 0,2) A/cm<sup>2</sup> dan waktu elektrolisis (300 - 1200) detik. Proses elektrolisis dilakukan di suhu ruangan (25°C) dengan menggunakan bahan CuSO<sub>4</sub>.H<sub>2</sub>O dan H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Endapan serbuk yang terbentuk di scrapping lalu dibilas dengan aquades menggunakan ultrasonik lalu dikeringkan dalam oven dengan atmosfir udara pada suhu 100°C. Setelah itu 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 ukuran distribusi serbuk tembaga.

### 2.1 Proses Elektrolisis Serbuk Tembaga

Serbuk tembaga disintesis melalui metode elektrolisis. Pengujian OES dilakukan sebelum melakukan percobaan menggunakan sampel anoda dan dihasilkan kadar Cu nya sebesar 99,88%. Langkah selanjutnya melakukan preparasi sampel dengan ukuran anoda plat tembaga sebesar (7 × 2,5 cm) dan

*stainless steel* 316 L sebagai katoda berukuran (6 × 2,5 cm), dengan masing-masing satu sisi yang digunakan. Untuk ukuran terendahnya adalah (4,5 × 2,5 cm) untuk anoda dan (3,5 × 2,5 cm) untuk katoda. Selanjutnya dihubungkan capit buaya yang telah dihubungkan dengan *DC power supply* dan untuk anoda tembaga hubungkan ke kutub (+) dan untuk katoda SS 316 L dihubungkan ke kutub (-). Selanjutnya setelah terhubung semua rangkaian listriknya, maka hubungkan juga selang untuk menangkap gas hidrogen yang akan muncul saat berlangsungnya reaksi sel elektrolisis.

### 2.2 Metode Statistika

Faktorial Desain 2<sup>k</sup> telah banyak digunakan dalam suatu percobaan yang melibatkan dengan banyak faktor dan level yang digunakan dan yang terpenting adalah faktor k, masing-masing hanya pada dua tingkat (minimum dan maksimum). Replikasi lengkap dari desain semacam itu membutuhkan 2 × 2 × ... × 2 = 2<sup>k</sup> pengamatan atau disebut juga dengan desain faktorial 2<sup>k</sup>. Faktorial desain 2<sup>k</sup> sangat berguna pada tahap awal pekerjaan eksperimental ketika banyak faktor yang mungkin untuk diselidiki. Ini memberikan jumlah run terkecil yang dengannya faktor k dapat dipelajari dalam desain faktorial lengkap (Montgomery, 2013).

Hasil eksperimen menggunakan faktorial desain 2<sup>k</sup> dapat dengan mudah dinyatakan dalam bentuk respon model regresi dijelaskan oleh persamaan polinomial derajat pertama berikut (Hribernik et al., 2009):

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (1)$$

Dimana:  $y$  = Respon (variabel dependen),  $\beta_i$  = Koefisien model regresi,  $\beta_0$  = Nilai konstanta,  $x_i$  = Coded variables,  $\epsilon$  = Random error.

Dalam penelitian ini, faktor variabel independen yang digunakan adalah rapat arus (A), waktu (B) dan konsentrasi Cu (C). Level minimum dan maksimum dapat terlihat dengan melakukan *Design of Experiment* (DoE) menggunakan perangkat lunak minitab. Berikut ini merupakan tampilan level yang digunakan dari hasil DoE menggunakan perangkat lunak minitab:

Tabel 1. Hasil *Design of Experiment* (DoE) menggunakan perangkat lunak minitab

Parameter	Faktor	Level	
		Mini mum	Maksi mum
Rapat Arus (A/cm <sup>2</sup> )	A	0,05	0,2
Waktu (menit)	B	5	20
Konsentrasi Cu (gr/liter)	C	5	50

Setelah diperoleh DoE, maka langkah selanjutnya adalah melakukan *Analysis of Variance* (Anova) sehingga data yang diperoleh berdistribusi normal dan persamaan regresi dapat diperoleh sehingga model prediksi yang nantinya dihitung dapat diperoleh dan dibandingkan dengan percobaan yang sesungguhnya menggunakan uji T. Anova adalah ringkasan model keseluruhan (*all main effect and interaction*), adapun beberapa hal seperti *sum of square* dituliskan dalam rumus sebagai berikut: (Montgomery, 2013)

$$SS_{model} = SS_A + SS_B + SS_C + SS_{AB} + SS_{BC} + SS_{AC} + SS_{ABC} \quad (2)$$

F<sub>statistika</sub> (F<sub>value</sub>) yang dihasilkan adalah:

$$F_{value} = \frac{MS_{model}}{MS_{Error}} \quad (3)$$

dengan uji hipotesis:

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_{12} = \beta_{23} = \beta_{13} = \beta_{123} = 0 \quad (4)$$

H<sub>1</sub>: setidaknya satu  $\beta \neq 0$

karena apabila  $F_{value}$  yang diperoleh bernilai besar, setidaknya satu variabel bebas yang digunakan harus memiliki efek bukan nol (*non zero effect*). Kemudian masing-masing efek yang telah diperoleh diuji menggunakan  $F_{statistik}$  dan diperoleh R-square (R<sup>2</sup>), beberapa statistik R-square disajikan dalam rumus sebagai berikut:

$$R - square = \frac{Sum\ of\ square_{model}}{SS_{Total}} \quad (5)$$

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{SS_{error}/df_{error}}{SS_{Total}/df_{Total}} \quad (6)$$

Adj-R-square adalah statistik yang disesuaikan dengan ukuran model yakni jumlah faktor.  $R_{adj}^2$  sebenarnya dapat berkurang nilainya bila istilah variabel yang tidak signifikan ditampilkan dalam model. PRESS<sub>statistic</sub> (*Prediction Error Sum of Square*) adalah nilai seberapa baik pemodelan akan memprediksi data baru (Montgomery, 2013). Berikut ini merupakan rumus untuk memperoleh  $R_{pred}^2$ :

$$R_{pred}^2 = 1 - \frac{PRESS}{SS_{Total}} \quad (7)$$

Apabila  $R_{pred}^2$  yang diperoleh bernilai besar, hal tersebut menunjukkan bahwa model prediksi diharapkan dapat menjelaskan variabilitas dalam data yang baru (Montgomery, 2013).

### 2.3 Pengujian T test

Setelah mendapatkan model prediksi yang dihasilkan dengan menggunakan persamaan regresi, langkah selanjutnya adalah melakukan pengujian T (Test). Uji T bertujuan untuk mendapatkan validitas suatu model prediksi agar dinyatakan sah kebenarannya dalam menentukan suatu pemodelan dibidang apapun. Dalam hal ini, penulis melakukan pemodelan

terhadap nilai efisiensi arus dalam mensintesis serbuk tembaga dengan metode elektrolisis. Variabel yang digunakan dalam uji ini yaitu variabel terikat dan variabel bebas. Hipotesis pada Uji-t dua sampel bebas yaitu Hipotesis nol ( $H_0$ ) dan hipotesis alternatif ( $H_1$ ), yang dapat dinyatakan dalam dua cara yang berbeda tetapi setara (Soeprajogo & Ratnaningsih, 2020) :

- $H_0: \mu_1 = \mu_2$  (rata-rata dua kelompok sama)
  - $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$  (rata-rata dua kelompok tidak sama)
- Atau
- $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$  (perbedaan rata-rata dua kelompok sama dengan 0)
  - $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$  (perbedaan rata-rata dua kelompok tidak sama dengan 0)

Nilai  $\alpha$  adalah peluang untuk membuat kesalahan tipe I. Kesalahan tipe I adalah kesalahan menolak  $H_0$ , padahal  $H_0$  benar. Penentuan tingkat signifikansi ini bervariasi sesuai keinginan peneliti. Nilai  $\alpha$  yang umum digunakan adalah 0,05 (5%) dan 0,01 (1%). Nilai  $\alpha$  merupakan batasan dalam menentukan pengambilan keputusan uji hipotesa. Homogenitas varian menguji keragaman atau varian kedua kelompok untuk menentukan metode uji-t dua sampel bebas yang akan digunakan, yaitu:

- Asumsi varian sama, nilai  $p > \alpha \rightarrow H_0$  diterima
- Asumsi varian tidak sama, nilai  $p < \alpha \rightarrow H_0$  ditolak (Soeprajogo & Ratnaningsih, 2020).

Uji statistik yang digunakan sesuai dengan asumsi varian. Hipotesis nol dan hipotesis alternatif sama pada kedua uji statistik yang sesuai asumsi varian rata-rata. Adapun rumus yang digunakan untuk asumsi varian rata-rata adalah sebagai berikut: (Soeprajogo & Ratnaningsih, 2020)

$$Sp = \sqrt{\frac{(n_1-1)S_1^2 + (n_2-1)S_2^2}{n_1+n_2-2}} \dots\dots\dots (8)$$

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{Sp \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \dots\dots\dots (9)$$

Keterangan:

- $\bar{x}_1$  = rata-rata sampel 1
- $\bar{x}_2$  = rata-rata sampel 2
- $n_1$  = jumlah sampel 1
- $n_2$  = jumlah sampel 2
- $Sp_1$  = standar deviasi sampel 1
- $Sp_2$  = standar deviasi sampel 2
- $Sp$  = gabungan standar deviasi

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Faktor Yang Paling Berpengaruh Pada Elektrolisis Serbuk Tembaga

Data lengkap dari hasil percobaan yang menghasilkan nilai efisiensi arus pada variasi konsentrasi ion Cu dan kondisi lainnya tercantum dalam **Tabel 2**, data tersebut merupakan data hasil perhitungan efisiensi arus, dari data tersebut dihasilkan nilai efisiensi yang optimal ada pada sampel 9 dengan efisiensi arus sebesar 96%, dengan kondisi konsentrasi ion Cu sebesar 0,2 M, waktu elektrolisis sebesar 1200 detik dan rapat arus sebesar 0,05 A/cm<sup>2</sup>. Hal tersebut menunjukkan bahwa kondisi tersebut sangat ideal atau optimal untuk mensintesis serbuk tembaga dengan metode elektrolisis dan konsentrasi ion Cu merupakan faktor yang paling berpengaruh dalam menghasilkan efisiensi arus yang tinggi dengan metode elektrolisis. Sedangkan dari data tersebut juga dihasilkan nilai efisiensi arus minimum ada pada sampel 5 dengan efisiensi arus sebesar 9%, dengan konsentrasi ion Cu sebesar 0,02 M, waktu sebesar 300 detik dan rapat arus sebesar

0,2 A/cm<sup>2</sup>. Hal tersebut menunjukkan bahwa kondisi tersebut tidak ideal untuk dilakukan percobaan karena menghasilkan efisiensi yang rendah

disebabkan karena konsentrasi ion Cu yang rendah mempengaruhi kadar larutan elektrolitnya sehingga menyebabkan nilai efisiensinya rendah.

Tabel 2. Data Perolehan nilai efisiensi arus

Sampel	Konsentrasi Ion Cu (gr/liter)	Waktu Elektrolisis (detik)	Rapat Arus (A/cm <sup>2</sup> )	Faraday (gram)	Berat Endapan Cu Aktual (gram)	Efisiensi Arus (%)
1	5	300	0,05	0,011	0,042473751	26
2	5	750	0,125	0,039	0,269165052	14
3	5	1200	0,2	0,073	0,691433161	11
4	5	1200	0,05	0,034	0,169895005	20
5	5	300	0,2	0,016	0,17285829	9
6	27,5	750	0,05	0,111	0,106184378	105
7	27,5	1200	0,125	0,351	0,430664083	82
8	27,5	300	0,2	0,092	0,17285829	53
9	50	1200	0,05	0,163	0,169895005	96
10	50	300	0,125	0,091	0,107666021	85
11	50	750	0,2	0,363	0,432145725	84
12	50	300	0,05	0,039	0,042473751	92
13	50	1200	0,2	0,575	0,691433161	83
14	50	300	0,2	0,136	0,17285829	79

Menurut (Sopiah. S., 2008), proses elektrolisis dipengaruhi oleh banyak faktor, agar diperoleh efisiensi arus dan kualitas endapan yang baik maka harus digunakan rapat arus yang kecil, waktu elektrolisis yang memadai, suhu yang optimum dan konsentrasi elektrolit yang tinggi. Dari pernyataan tersebut berbanding lurus dengan percobaan yang dilakukan, dikarenakan pada rapat arus yang rendah, endapan serbuk tembaga yang dihasilkan relatif halus, merata dan tidak kasar serta konsentrasi yang tinggi menyebabkan nilai efisiensi arus tinggi akan tetapi untuk pengaruh waktu elektrolisis pada penelitian ini jika waktunya lama, akan menghasilkan endapan yang dihasilkan relatif banyak, ukuran serbuk tembaga relatif merata atau butirannya halus dan pada katoda terbentuk plating atau lapisan yang tidak ikut mengendap melainkan menempel pada katoda dalam bentuk lapisan. Rata-rata bila waktunya 20 menit proses

elektrolisis, ukuran serbuk relatif halus dan nilai efisiensi rendah diakibatkan banyak terbentuknya gas hidrogen yang menghalangi endapan menempel pada dinding katoda.

### 3.2 Pengembangan Model Efisiensi Arus Pada Elektrolisis Serbuk Tembaga

Dari data perolehan *Design of Experiment* atau perancangan percobaan dalam bentuk *factorial design 2<sup>k</sup>* dengan menggunakan perangkat lunak minitab dihasilkanlah *analysis of variance* (Anova), model summary, persamaan regresi, pareto chart, histogram, grafik normal probabilitas, dan normal plot. Pada **Tabel 3**, merupakan data hasil pengolahan minitab yakni *analysis of variance* (Anova), menunjukkan bahwa dari kondisi faktor rapat arus dan konsentrasi larutan nilai p-value <  $\alpha$ , yang berarti nilai tersebut masih signifikan dan bisa dikatakan juga bahwa H<sub>0</sub> tidak

terima sehingga dapat disimpulkan bahwa rapat arus dan konsentrasi ion Cu atau larutan terdapat interaksi dengan efisiensi arus yang dihasilkan dan merupakan faktor yang menyebabkan nilai efisiensi arus tinggi. Sedangkan pada kondisi faktor waktu menunjukkan bahwa nilai p-value >  $\alpha$  atau memiliki nilai  $0,653 > 0,05$  (nilai dari  $\alpha$ ) yang berarti nilai tersebut tidak signifikan

karena p-valuenya lebih dari  $\alpha$  dan bisa dikatakan juga bahwa  $H_0$  diterima sehingga dapat disimpulkan bahwa waktu bukan sebagai salah satu faktor utama yang menyebabkan nilai efisiensi arus tinggi. Semakin kecil nilai p-value yang didapatkan, maka semakin kecil pula mean probability yang di ujikan atau dengan kata lain prediksi desain yang dimiliki akan semakin signifikan.

Tabel 3. Data Perolehan Anova

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
Linear	3	10422,0	3474,0	408,71	0,000	Significant
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				
R-Square		Adj-R-Square		R-Square Pred		
99,67%		99,43%		98,70%		

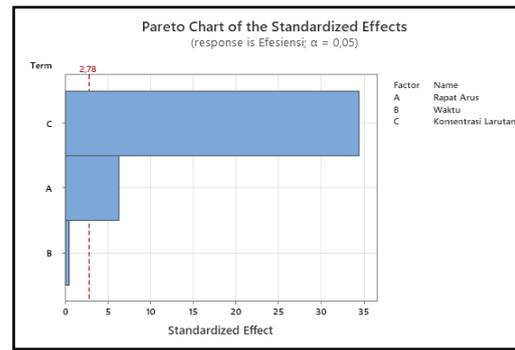
R-square yang didapatkan adalah 99,67%, hal ini menunjukkan bahwa koefisien determinasi berganda pada model eksperimen desain ini dapat dijelaskan dengan sekelompok variabel independen/bebas secara simultan memiliki pengaruh sebesar 0,9967 atau 99,67% terhadap nilai efisiensi arus (variabel dependen atau variabel terikat) dan sisanya adalah 0,33% diluar dari faktor variabel independen yang tidak diteliti dan tidak digunakan pada model eksperimen desain. Berdasarkan hasil Anova diperoleh juga nilai *adjusted R-Square* atau R-Sq(adj) sebesar 0,9943 atau 99,43%, hal tersebut menunjukkan bahwa kemampuan variabel independen dalam eksperimen desain yang digunakan dalam penelitian ini mempengaruhi

variabel dependen atau variabel terikatnya sebesar 99,43%.

Dalam model prediksi menggunakan faktorial desain  $2^k$  juga memperoleh sebuah persamaan yang disebut persamaan regresi. Persamaan regresi bisa digunakan dalam menentukan nilai model efisiensi arus Model efisiensi arus yang dihasilkan dengan faktorial desain  $2^k$  adalah model efisiensi arus yang tergolong baik dalam eksperimen desain dengan menggunakan pengaruh dari 3 parameter yakni: rapat arus (A), waktu elektrolisis (B) dan konsentrasi ion Cu (C). Model efisiensi arus ditampilkan pada persamaan regresi berikut ini:

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

Pada **Gambar 1**, menunjukkan tampilan pareto chart hasil pengolahan minitab menggunakan faktorial desain  $2^k$ , pada gambar tersebut menunjukkan bahwa grafik pareto yang diperoleh memperlihatkan faktor yang paling mempengaruhi nilai efisiensi arus pada proses elektrolisis serbuk tembaga. Dapat dilihat bahwa konsentrasi ion Cu merupakan faktor utama yang paling mempengaruhi nilai efisiensi arusnya tinggi. Hal ini juga terbukti dengan hasil percobaan real yang telah dilakukan dapat diamati bahwa jika konsentrasi ion Cu nya tinggi, serbuk tembaga yang dihasilkan relatif lebih banyak dan evolusi gas hidrogen yang terbentuk pun diperoleh hanya sedikit dikarenakan jika efisiensi arus bernilai tinggi, maka nilai evolusi gas hidrogen akan bernilai rendah atau berbanding terbalik dengan nilai efisiensi arusnya. Selanjutnya rapat arus sebagai faktor yang kedua yang mempengaruhi nilai efisiensi arusnya tinggi, sedangkan untuk waktu dapat dilihat dari grafik pareto yang diperoleh pengaruhnya tidak melebihi tingkat kepercayaan atau tidak melewati garis  $\alpha$ .



Gambar 1. Tampilan Pareto Chart Faktor Yang Paling Berpengaruh Pada Nilai Efisiensi Arus

Setelah memperoleh hasil dari uji normalitas, heteroskedastisitas dan multikolinieritas tadi telah memenuhi asumsi klasik regresi, langkah selanjutnya adalah menentukan model prediksi yang telah diperoleh menggunakan analisis statistik uji T test, untuk mengetahui validitas dari model prediksi dengan metode faktorial desain  $2^k$ . Dapat dilihat pada **Tabel 4**, tabel tersebut menunjukkan uji T test yang dilakukan menghasilkan model prediksi yang valid dikarenakan  $|t_0| < t_{0,025,3}$  sehingga  $H_0$  diterima dan model = percobaan atau dapat diartikan bahwa nilai  $t_{hitung} < \text{nilai } t_{tabel}$  sehingga kriteria menolak  $H_0$  yang berarti model prediksi = percobaan.

Tabel 4. Hasil Perolehan Pengujian T test Efisiensi Arus Antara Model dan Real

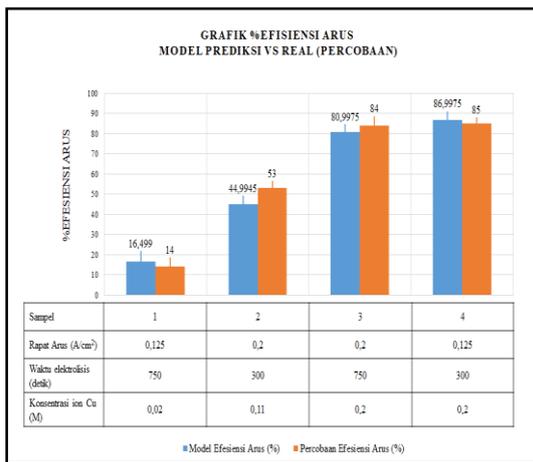
Uji Test T (Efisiensi Arus)					
Sampel	Rapat Arus	%Efisiensi Arus		dj	$(dj - \bar{dj})^2$
		Model	Real		
1	0,2	80,9975	84	-3,0025	1,889593891
2	0,125	16,499	14	2,499	17,03109727
3	0,2	44,9945	53	-8,0055	40,67410064
4	0,125	86,9975	85	1,9975	13,14334389
d <sub>rata-rata</sub>				-1,627875	72,73813569
S <sub>d</sub>				4,924027338	
t <sub>0</sub>				-0,661196573	
Tabel T test			t <sub>0,025,3</sub>	3,18245	

$$|t_0| < t_{0,025,3}$$

Sehingga kriteria menolak  $H_0$  tidak terpenuhi, maka  $H_0$  diterima  
Sehingga (model = Percobaan)

### 3.3 Efisiensi Arus Hasil Model Serta Hubungannya Dengan Evolusi Gas Hidrogen dan Ukuran Partikel Serbuk Tembaga

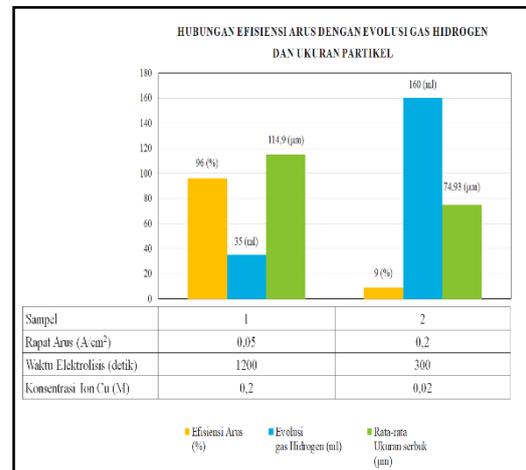
Setelah memperoleh model prediksi efisiensi arus, Diperoleh grafik %efisiensi arus hasil model prediksi dengan percobaan sesungguhnya (real). Dapat diamati pada **Gambar 2**, menunjukkan bahwa dari keempat kondisi yang dijadikan sebagai sampel pada analisis statistik uji T test, model prediksi yang diperoleh perbedaannya tidak terlalu signifikan dan bisa dikatakan akurat pemodelannya dikarenakan antara percobaan sesungguhnya dengan model prediksi yang digunakan, nilai efisiensi arus nya hanya terpaut  $\pm 10\%$ , baik itu melebihi atau kurang dari nilai efisiensi arus percobaan sesungguhnya. Sehingga model percobaan faktorial desain  $2^k$  yang digunakan untuk mensintesis serbuk tembaga menggunakan metode elektrolisis dapat digunakan sebagai acuan untuk memprediksi atau memperkirakan nilai efisiensi arus yang optimal dengan kondisi tertentu dengan menggunakan faktor independen yang sama.



Gambar 2. Grafik Model Prediksi vs Real (hasil percobaan)

Selanjutnya dilakukan juga pengamatan mengenai hubungan efisiensi arus hasil model prediksi yang

diperoleh dengan perolehan evolusi gas hidrogen dan ukuran partikel serbuk tembaga yang dihasilkan melalui proses elektrolisis serbuk tembaga. Dapat diamati pada **Gambar 3**, apabila nilai efisiensi arus yang diperoleh tinggi, semakin sedikit volume gas hidrogen yang terbentuk pada saat proses elektrolisis berlangsung dan semakin besar ukuran partikel serbuk tembaga yang diperoleh. Pada saat proses elektrolisis berlangsung, gas hidrogen terbentuk pada bagian sisi katoda, apabila gas hidrogen yang dihasilkan banyak, serbuk tembaga yang dihasilkan menjadi relatif sedikit dan ukuran butirannya kasar, dikarenakan pada saat proses berlangsung serbuk tembaga yang seharusnya mengendap pada katoda terhalang oleh gelembung gas hidrogen menyebabkan nilai efisiensi nya rendah dan partikel serbuk tembaga yang terbentuk tidak sepenuhnya terbentuk secara merata.

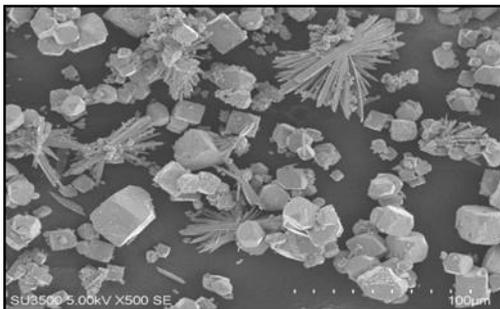
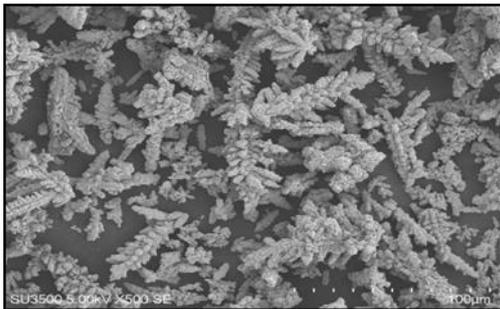


Gambar 3. Grafik hubungan antara efisiensi arus dengan nilai evolusi gas  $H_2$  dan ukuran partikel

### 3.4 Karakteristik Serbuk Tembaga

Dilakukan juga pengujian karakterisasi XRD untuk mengetahui fasa yang terbentuk. Hasil XRD serbuk tembaga yang telah dipanaskan dalam suhu  $100^\circ C$  menunjukkan terindikasi

serbuk tembaga yang dihasilkan terbentuk fasa *cuprite* ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) dan sebagian ada yang teroksidasi menjadi *Copper oxide* ( $\text{CuO}$ ) sebesar 0,0718%. Dalam penelitian ini juga, dilakukan analisis mengenai morfologi struktur dari serbuk tembaga yang dihasilkan dalam skala makro dan mikro. Serbuk tembaga dianalisis dengan melihat struktur morfologi yang terbentuk dalam skala makro dengan menggunakan mikroskop optic dan skala mikro menggunakan pengujian SEM. Sampel yang digunakan adalah serbuk tembaga yang lolos dan tidak lolos 74  $\mu\text{m}$ . Dapat terlihat pula baik itu dalam skala makro dan mikro bentuk morfologi serbuk tembaga nya dominan yang terbentuk adalah dendritik. Sedangkan untuk ukuran serbuk yang lolos 74  $\mu\text{m}$  terlihat bahwa morfologi yang terbentuk dominan pada bentuk dendritik dengan yang paling dominan adalah membentuk kubik dan sebagian membentuk pola memanjang tajam menyerupai jarum. Hal ini juga terlihat sangat jelas bahwa baik itu dalam skala makro dan mikro bentuk morfologi serbuk tembaganya dominan yang terbentuk adalah dendritik.



Dilakukan juga pengujian EDX untuk mengetahui komposisi unsur serbuk tembaga. Diperoleh bahwa unsur yang terbentuk adalah unsur Cu dengan 79,85% Cu dan 20,15% O. Hal ini menunjukkan bahwa serbuk tembaga yang dihasilkan mengandung unsur O dan Cu, sehingga kandungan serbuk tembaga tidak murni 100% Cu melainkan ada kandungan O dan unsur lainnya yang memang sudah ada pada hasil pengujian OES sebelumnya. Pengujian karakterisasi yang terakhir dilakukan adalah uji PSA untuk mengetahui ukuran distribusi serbuk tembaga yang memiliki nilai efisiensi arus tinggi mempunyai rata-rata ukuran sebesar 342,3  $\mu\text{m}$ , sementara itu untuk ukuran distribusi serbuk tembaga yang memiliki nilai efisiensi arus rendah mempunyai rata-rata ukuran sebesar 114,9  $\mu\text{m}$ .

#### IV. KESIMPULAN

1. Model persamaan yang diperoleh dapat menghasilkan nilai prediksi efisiensi arus.
2. Faktor yang paling berpengaruh pada sintesis serbuk tembaga dengan metode elektrolisis adalah konsentrasi ion Cu, disusul dengan rapat arus dan waktu elektrolisis.
3. Model efisiensi arus yang dihasilkan dengan faktorial desain  $2^k$  adalah model efisiensi arus yang tergolong baik dalam eksperimen desain dengan menggunakan pengaruh dari 3 parameter yakni: rapat arus (A), waktu elektrolisis (B) dan konsentrasi ion Cu (C). Model efisiensi arus ditampilkan pada persamaan regresi berikut ini:

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

4. Hasil uji T berupa  $|t_0| < t_{0,025,3}$  menunjukkan bahwa model efisiensi arus sudah sesuai dengan hasil percobaan dengan rentang nilai

efisiensi arus adalah 16 - 87% model prediksi dengan metode elektrolisis serbuk tembaga.

5. Karakteristik serbuk tembaga yang dihasilkan pada sampel:
  - a) Efisiensi terendah (9%) adalah memiliki morfologi yang berstruktur dendritik dan rata-rata ukuran partikel 74,93  $\mu\text{m}$ .
  - b) Efisiensi tertinggi (96%) adalah memiliki morfologi yang berstruktur kubik dan rata-rata ukuran partikel 114,9  $\mu\text{m}$ .

## V. DAFTAR PUSTAKA

- ASM Handbook. (1998). *Powder Metal Technologies and Applications*. Volume 7, ASM
- Damisih, D., Fidyarningsih, R., Pravitasari, R. D., Agustanhakri, Aprilia, L., & Purwati, H. (2015). *Pembuatan Serbuk Tembaga Berukuran Di Bawah 1 Mikron Dengan Metode Elektrolisis*. Prosiding Seminar Nasional Fisika, IV(Oktober), 127–132.
- Firka, D. (2011). 'Statistical, Technical and Sociological Dimensions of Design of Experiments', The TQM Journal, Vol. 23 No. 4, 2011, pp. 435-445.
- Hadijah, H. (2013). *Peramalan Operasional Reservasi dengan Program Minitab menggunakan Pendekatan Arima PT Surindo Andalan*. The Winners, 14(1), 13.  
<https://doi.org/10.21512/tw.v14i1.640>
- Hribernik, A., Bauman, M., & Lobnik, A. (2009). *Application of 2k factorial design in wastewater decolorization research*. 19th IMEKO World Congress 2009, 2(May 2014), 1132–1136.
- Hurin, F. R., (2019). Laporan Tugas Akhir. *Pengaruh penambahan aditif tiourea terhadap komposisi oksigen pada sintesis serbuk tembaga dengan metode elektrolisis*. Program Studi Teknik Metalurgi dan Material, Institut Teknologi Sains Bandung
- Montgomery, D. C. (2013). *Design and Analysis of Experiments Eighth Edition*. Arizona State University. In Copyright (Vol. 2009, Issue 2005).
- Mubarok, M. Z., Nugroho, L., & Wahyudi, S. (2017). *Sintesis Serbuk Tembaga dengan Metode Elektrolisis : Studi Perilaku Elektrokimia dan Karakterisasi Serbuk*. Jurnal Teknik, November, 623–632.
- 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>
- 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.