

Sintesis Tembaga (II) Sulfat Pentahidrat ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) Dari Limbah Kabel Tembaga (Cu) Dengan Proses Kristalisasi Dingin

Febby Nur Izza Vania^{1*}, Pujangga Tirta Kusuma², Ni Ketut Sari³

^{1,2,3} Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur

Jl. Raya Rungkut Madya No. 1, Gunung Anyar, Surabaya 60294, Indonesia.

*Email: febbyzzav19@gmail.com

Abstrak

Limbah kabel tembaga merupakan limbah elektronik dengan kandungan tembaga tinggi sehingga berpotensi dimanfaatkan kembali sebagai bahan baku produk bernilai ekonomi. Penelitian ini bertujuan mensintesis tembaga(II) sulfat pentahidrat ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) dari limbah kabel tembaga melalui proses kristalisasi dingin serta menentukan kondisi optimum proses. Tembaga dilarutkan menggunakan HNO_3 65% untuk membentuk ion Cu^{2+} , kemudian ditambahkan H_2SO_4 dengan variasi konsentrasi 16–24% dan dipanaskan hingga larutan jenuh. Kristalisasi dilakukan pada suhu 8–24 °C selama 48 jam. Kristal yang diperoleh dipisahkan, dikeringkan, dan dianalisis menggunakan XRF, XRD, serta analisis hidrasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi H_2SO_4 dan penurunan suhu kristalisasi meningkatkan yield kristal. Yield tertinggi sebesar 89,43% diperoleh pada konsentrasi H_2SO_4 22% dan suhu 8 °C. XRD menunjukkan fase dominan $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ berstruktur triklinik, sedangkan analisis hidrasi menunjukkan rasio mol $\text{CuSO}_4:\text{H}_2\text{O}$ sebesar 1:5. Optimasi Response Surface Methodology dengan desain CCD menghasilkan model yang sangat baik, dengan R^2 0,997 untuk yield dan 0,9959 untuk kadar Cu. Kondisi optimum diperoleh pada H_2SO_4 23,003% dan suhu 12,106 °C.

Kata kunci: Limbah Kabel Tembaga, Tembaga Sulfat Pentahidrat, Kristalisasi Dingin.

Abstrak

Copper cable waste is a type of electronic waste with high copper content and potential for reuse as a raw material for value-added products. This study synthesized copper(II) sulfate pentahydrate ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) from copper cable waste through cold crystallization and determined the optimum process conditions. Copper was dissolved in 65% nitric acid (HNO_3) to form Cu^{2+} ions, followed by the addition of sulfuric acid (H_2SO_4) at concentrations of 16–24% and heating until saturation. Crystallization was conducted at 8–24°C for 48 h. The crystals were separated, dried, and analyzed using XRF, XRD, and hydration analysis. The highest yield, 89.43%, was obtained at 22% H_2SO_4 and 8°C. XRD confirmed the dominant triclinic $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ phase, while hydration analysis showed a $\text{CuSO}_4:\text{H}_2\text{O}$ molar ratio of 1:5. Response Surface Methodology with CCD showed strong model fitness, with R^2 values of 0.997 for yield and 0.9959 for Cu content.

Kata kunci: Copper Cable Waste, Copper Sulfate Pentahydrate, Cold Crystallization..

1. PENDAHULUAN

Timbunan limbah yang signifikan terjadi akibat peningkatan penggunaan perangkat elektronik dan infrastruktur listrik, termasuk limbah kabel yang mengandung tembaga (Cu). Di Indonesia, pengelolaan limbah elektronik masih menjadi tantangan besar akibat keterbatasan fasilitas daur ulang yang memadai. Berdasarkan data Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan jumlah limbah elektronik mencapai 2,2 juta ton per tahun, dan limbah kabel merupakan salah satu kontributor utama (KLHK, 2021). Kandungan tembaga pada kabel mencapai 86,64–96,32% sehingga berpotensi besar dimanfaatkan

sebagai bahan baku untuk menghasilkan produk bernilai ekonomi tinggi (Ali & Sultoni, 2019).

Tembaga(II) sulfat pentahidrat ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) merupakan senyawa anorganik berwarna biru yang banyak digunakan dalam industri sebagai katalis pada sintesis organik, agen pengawet kayu karena sifat antimikrobanya, serta bahan aktif campuran *bordeaux* pada sektor pertanian (Bakshi & Kumar, 2021; Lasota et al., 2019). Senyawa ini berbentuk kristal biru terang dengan struktur kristal triklinik dan memiliki kelarutan tinggi dalam air yang sangat dipengaruhi oleh suhu (Perry & Green, 2008).

Proses sintesis $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ dari logam tembaga dapat dilakukan melalui pelarutan menggunakan asam kuat, seperti asam nitrat atau asam sulfat yang menghasilkan ion Cu^{2+} dalam larutan. Selanjutnya, pembentukan kristal dilakukan melalui proses kristalisasi. Secara teoritis, kristalisasi berlangsung melalui dua tahap utama yaitu nukleasi dan pertumbuhan kristal yang digerakkan oleh kondisi supersaturasi (Mullin, 2001). Metode kristalisasi dingin memanfaatkan penurunan suhu untuk menurunkan kelarutan $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Kelarutan CuSO_4 sangat bergantung pada suhu yaitu sebesar 64,2 g/100 g H_2O pada 90°C dan 20,7 g/100 g H_2O pada 20°C (Mullin, 2001). Perbedaan kelarutan ini memungkinkan pembentukan kristal dengan konsumsi energi yang lebih rendah serta kontrol morfologi kristal yang lebih baik dibandingkan kristalisasi panas (Alimohammadzadeh et al., 2018).

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa parameter proses berpengaruh signifikan terhadap hasil dan kualitas kristal. Variasi suhu reaksi antara $34\text{--}90^\circ\text{C}$ untuk mencapai kondisi jenuh yang cenderung membutuhkan konsumsi energi lebih besar (Fitrony et al., 2013). Sementara itu, peningkatan konsentrasi H_2SO_4 10–18% dapat meningkatkan yield produk sebesar 76% (Wardhani, 2024). Penelitian ini menawarkan kebaruan melalui tiga aspek utama, yaitu pemanfaatan limbah kabel tembaga sebagai bahan baku alternatif bernilai tambah, penerapan metode kristalisasi dingin sebagai proses lebih hemat energi dan berpotensi meningkatkan kemurnian produk, serta penggunaan Response Surface Methodology (RSM) dengan desain Central Composite Design (CCD) untuk mengoptimalkan interaksi variabel proses secara simultan terhadap *yield*.

2. METODOLOGI

2.1. Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi limbah kabel tembaga (Cu) sebagai bahan baku utama yang telah dipisahkan dari isolator plastik dan dipotong $\pm 0,1$ cm untuk memperbesar luas permukaan kontak, asam nitrat (HNO_3) 65% yang digunakan pada tahap pelarutan logam tembaga untuk menghasilkan ion Cu^{2+} dalam larutan, serta asam sulfat (H_2SO_4) yang digunakan dalam proses pembentukan dan kristalisasi tembaga(II) sulfat pentahidrat

($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) dengan variasi konsentrasi 16%, 18%, 20%, 22% dan 24%.

2.2. Metode

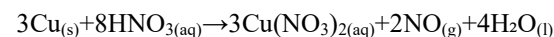
Metode penelitian ini dilakukan secara eksperimental di laboratorium melalui beberapa tahapan utama, yaitu preparasi bahan baku, pelarutan, kristalisasi dingin, pemisahan dan pengeringan produk, serta analisis karakterisasi.

2.2.1. Preparasi Bahan Baku

Limbah kabel tembaga dipisahkan dari isolator plastik dan pengotor lainnya, kemudian dicuci dan dikeringkan. Tembaga dipotong berukuran $\pm 0,1$ cm untuk memperbesar luas permukaan sehingga mempercepat proses pelarutan.

2.2.2. Proses Pelarutan

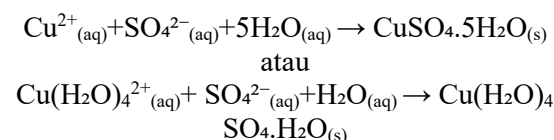
Sebanyak 1,25 gram tembaga dilarutkan menggunakan asam nitrat (HNO_3) 65% selama ± 30 menit hingga terbentuk larutan berwarna biru yang menunjukkan terbentuknya ion Cu^{2+} . Proses dilakukan pada suhu kamar hingga seluruh logam larut sempurna.



Setelah tembaga larut sempurna, larutan kemudian disaring untuk menghilangkan pengotor.

2.2.3. Pembentukan Larutan Tembaga Sulfat

Larutan hasil pelarutan kemudian ditambahkan larutan asam sulfat (H_2SO_4) sebanyak 100 mL dengan variasi konsentrasi 16%, 18%, 20%, 22% dan 24%. Larutan dipanaskan pada suhu 90°C selama 15 menit dengan kecepatan pengadukan 500 rpm untuk meningkatkan kelarutan dan mencapai kondisi jenuh/supersaturasi.



2.2.4. Proses Kristalisasi Dingin

Larutan jenuh didinginkan secara terkontrol pada variasi suhu 8°C , 12°C , 16°C , 20°C , dan 24°C selama 48 jam untuk menginduksi proses nukleasi dan

pertumbuhan kristal hingga terbentuk kristal berwarna biru. Hidrat $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ tepatnya adalah $\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_4\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$; empat molekul air terikat pada ion Cu^{2+} , sedangkan yang satunya lagi terikat pada gugus SO_4^{2-} (Fitrony et al., 2013).

2.2.5. Pemisahan dan Pengeringan Kristal

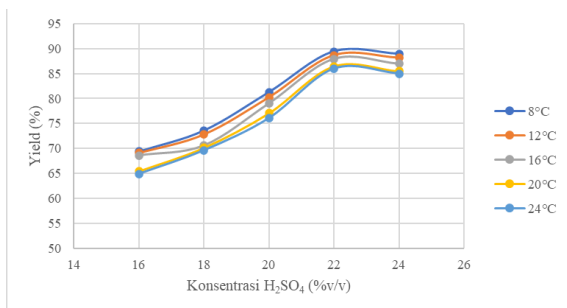
Kristal yang terbentuk dipisahkan dari larutan induk (*mother liquor*) menggunakan filtrasi, kemudian dicuci dengan *aquades* untuk menghilangkan sisa pengotor dan dikeringkan pada suhu kamar hingga berat konstan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Sintesis Tembaga(II) Sulfat Pentahidrat

a) Pengaruh Konsentrasi H_2SO_4 Terhadap Yield Kristal

Berdasarkan penelitian, terlihat bahwa peningkatan konsentrasi H_2SO_4 dari 16% hingga 22% memberikan pengaruh yang signifikan terhadap jumlah kristal $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ yang terbentuk. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi asam memperkuat efek ion senama (*common ion effect*) sehingga menurunkan kelarutan CuSO_4 dan mendorong presipitasi ion Cu^{2+} sehingga *yield* meningkat (Justel et al., 2015).



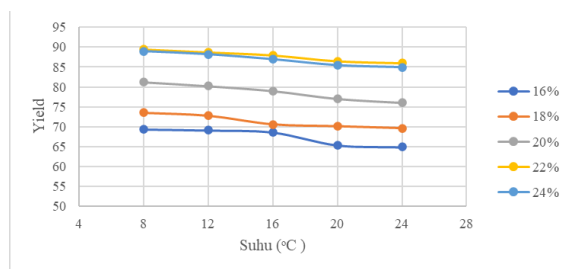
Gambar 1 Grafik Pengaruh Konsentrasi H_2SO_4 Terhadap Yield

Pada Gambar 1 massa produk meningkat dari 28 g (16% v/v) menjadi 36,1 g (22% v/v) yang sejalan dengan kenaikan *yield* dari 69,36% menjadi 89,43%. Jika dibandingkan dengan massa teoritis sebesar 40,37 g, massa aktual yang diperoleh menunjukkan bahwa proses kristalisasi cukup efisien, dimana peningkatan jumlah ion H^+ dari H_2SO_4 menurunkan kelarutan CuSO_4 sehingga mendorong terbentuknya kristal lebih cepat

dan dalam jumlah yang lebih besar (Wardhani, 2024).

b) Pengaruh Suhu Kristalisasi Terhadap Yield Kristal

Kelarutan $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ sekitar 114 g/100 g H_2O pada 90°C dan 23 g/100 g H_2O pada 20°C (Linke, 1958; Mullin, 2001). Keadaan ini mendorong terbentuknya kristal $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ dalam jumlah lebih besar.



Gambar 2 Grafik Pengaruh Suhu Kristalisasi Terhadap Yield

Grafik pada Gambar 2 menunjukkan bahwa menurunnya suhu kristalisasi dari 24°C ke 8°C secara bertahap meningkatkan *yield* kristal $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ yang terbentuk. Pada kondisi optimum dengan konsentrasi asam sulfat 22%, proses kristalisasi pada suhu 8 °C menghasilkan *yield* sebesar 89,43%, lebih tinggi dibandingkan pada suhu 24 °C yang hanya mencapai 85,96%.

Tren ini sejalan dengan grafik kelarutan yang dikemukakan oleh (Stern et al., 2017), di mana penurunan suhu dari 318 K (45 °C) menuju 293 K (20 °C) menyebabkan molalitas CuSO_4 dalam larutan menurun, berbanding lurus dengan meningkatnya fraksi kristal yang mengendap. Penurunan suhu memperkuat kondisi supersaturasi pada sistem H_2SO_4 – CuSO_4 , sehingga meningkatkan pembentukan kristal (Casas et al., 2000).

3.2. Analisis dan Karakterisasi Produk

a) Analisis Instrumentasi XRF

Analisis XRF digunakan untuk menentukan komposisi unsur dalam sampel. Hasil XRF menunjukkan bahwa unsur Cu merupakan komponen dominan yang mengindikasikan bahwa tembaga dari bahan baku limbah telah berhasil terinkorporasi ke dalam produk. Hasil uji didapatkan unsur dan komponen yang terkandung dalam kristal tembaga sulfat pentahidrat.

Tabel 1. Hasil Uji Analisis XRF

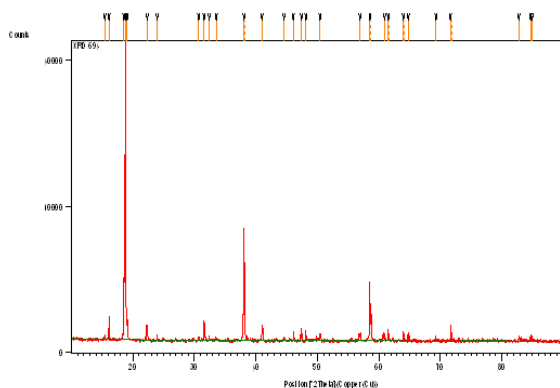
Komponen Unsur	S	Ca	Cr	Fe	Cu	Mo	Os
Komposisi (%)	11	0,21	0,05	0,14	79,64	7,7	1,2
Komponen Oksida	SO₃	CaO	Cr₂O₃	Fe₂O₃	CuO	MoO₃	OsO₄
Komposisi (%)	21	0,22	0,054	0,14	68,87	8,81	1,1

(Sumber: Lab UM, 2025)

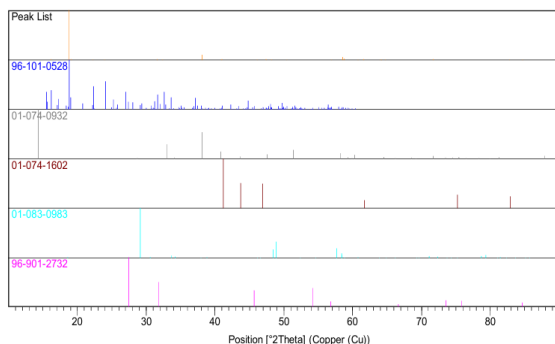
Berdasarkan hasil XRF yang disajikan pada Tabel 1 komposisi tembaga (Cu) pada sampel mencapai 79,64% dan 68,87% dalam bentuk oksida (CuO) menunjukkan dominasi unsur Cu dalam struktur padatan CuSO₄.5H₂O. Jika dibandingkan dengan standar bahan kimia komersial (Merck) dengan kemurnian Cu sebesar 98–99%, nilai Cu yang diperoleh dalam penelitian ini lebih rendah. Hal ini mengindikasikan bahwa produk yang dihasilkan masih mengandung pengotor, yang kemungkinan berasal dari bahan baku limbah atau proses sintesis.

b) Analisis Instrumentasi XRD

Analisis XRD dilakukan untuk mengonfirmasi bahwa kristal yang dihasilkan adalah CuSO₄.5H₂O serta mengidentifikasi struktur kristalnya.



Gambar 3 Grafik Analisis XRD (Sumber: Lab UM, 2025)



Gambar 4 JCDPS Hasil Uji XRD

Hasil analisis XRD pada sampel tembaga(II) sulfat pentahidrat (CuSO₄.5H₂O) menunjukkan pola difraksi yang konsisten dengan standar JCPDS 01-074-1602 yang mengindikasikan bahwa fase dominan dalam sampel merupakan CuSO₄.5H₂O dengan struktur kristal anorthik atau triklinik (Justel et al., 2019). Selain itu, teridentifikasi pula beberapa puncak minor yang sesuai dengan JCPDS 01-074-0932 (CuO) dan JCPDS 01-083-0983 (Cu₂O) menandakan adanya sedikit fase oksida tembaga yang kemungkinan terbentuk akibat proses dehidrasi parsial CuSO₄.5H₂O menjadi CuSO₄ anhidrat selama pemanasan atau penyimpanan (Greenwood & Earnshaw, 2012; Housecroft & Sharpe, 2018).

c) Analisis Hidrasi Kristal

Pengujian hidrasi dilakukan dengan memanaskan kristal untuk menguapkan kandungan air kristalnya, kemudian membandingkan massa sebelum dan sesudah proses pemanasan. Perubahan warna dari biru cerah menjadi putih menjadi indikator visual hilangnya air kristal, yang selanjutnya diverifikasi melalui perhitungan rasio mol CuSO₄ terhadap mol H₂O (Perry & Green, 2008).

Tabel 2 Data Hasil Pengecekan Jumlah Air Kristal

Sampel	Massa (gr)			mol CuSO ₄ : mol H ₂ O
	CuSO ₄ .5H ₂ O	CuSO ₄	H ₂ O	
1	10,2169	6,1377	4,0832	1: 5,09
2	2,0345	1,3064	0,7281	1: 4,94
Rata - rata				5 mol H ₂ O

Pengecekan kandungan air kristal dilakukan melalui proses pengovenan kristal CuSO₄.5H₂O pada suhu 155 °C dengan tujuan menghilangkan seluruh molekul air kristal yang terikat dalam struktur kristal tersebut (Fitrony et al., 2013).



Gambar 5 (a) Sebelum pengovenan, (b) Setelah pengovenan

Hasil perhitungan perbandingan mol CuSO₄ terhadap mol H₂O menunjukkan rasio 1:5 sehingga membuktikan bahwa setiap molekul CuSO₄ mengandung lima molekul air kristal.

3.3. Optimasi Hasil Analisis

Optimasi peningkatan yield kristal tembaga sulfat pentahidrat menggunakan 2 faktor, yakni konsentrasi asam sulfat (H₂SO₄) dan suhu kristalisasi. Metode yang digunakan yaitu CCD (*Central Composite Design*) dengan *center point* 1. Berdasarkan hasil analisis dengan metode CCD menggunakan 9 data eksperimen.

Tabel 3. Data Faktor dan Response dengan RSM

Std	Run	Factor 1 Konsentrasi H ₂ SO ₄ (%)	Factor 2 Suhu Kristalisasi (°C)	Response 1 Yield (%)	Response 2 Kadar Cu (%)
1	1	16	8	69,36	74,98
2	2		12	69,11	75,74
3	3		16	68,62	74,72
4	4		20	65,39	73,96
5	5		24	64,90	73,71
6	6	18	8	73,57	75,99
7	7		12	72,83	76,25
8	8		16	70,60	75,23
9	9		20	70,11	74,72
10	10	20	24	69,61	74,21
11	11		8	81,25	76,75
12	12		12	80,26	78,79
13	13		16	79,02	78,28
14	14		20	77,04	77,52
15	15	24	76,05	77,26	
16	16	22	8	89,43	77,52
17	17		12	88,69	79,55
18	18		16	87,94	79,04
19	19		20	86,46	78,53
20	20	24	85,96	78,03	
21	21	24	8	88,93	77,01
22	22		12	88,19	79,29
23	23		16	86,95	78,79
24	24		20	85,46	78,28
25	25		24	84,97	77,77

Tabel 4 digunakan untuk mengevaluasi dan memilih model terbaik berdasarkan parameter statistik seperti *Adjusted R²*, *Predicted R²*, serta signifikansi *lack of fit*,

sehingga diperoleh model kubik sebagai model yang paling sesuai (Myers et al., 2016).

Tabel 4 Perbandingan Model Persamaan Response Yield yang Disarankan oleh Software

Source	Sequential p-value	Lack of Fit p-value	Adjusted R ²	Predicted R ²
Linear	< 0.0001	0,2699	0,9233	0,9105
2FI	0,8569	0,2587	0,9197	0,9017
Quadratic	0,2230	0,2699	0,9242	0,9007
Cubic	< 0.0001	0,7733	0,9829	0,9746
Quartic	0,4247	0,7797	0,9834	0,9321
Fifth	0,2322	0,9164	0,9877	0,8779

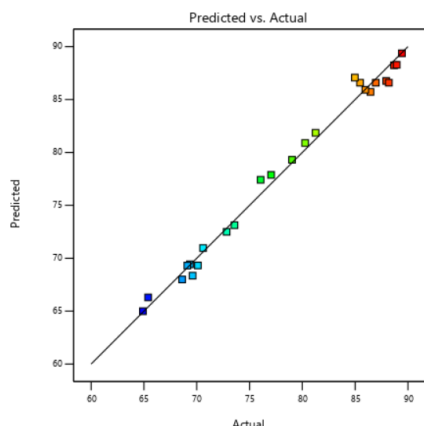
Tabel 5. Hasil Optimasi Yield dengan Metode ANOVA

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	1690,51	9	187,83	154,5	< 0.0001
A- Konsentrasi H ₂ SO ₄	321,68	1	321,68	264,58	< 0.0001
B-Suhu Kristalisasi	10,66	1	10,66	8,77	0,0097
AB	1,44	1	1,44	1,18	0,2942
A ²	10,80	1	10,80	8,88	0,0093
B ²	0,3374	1	0,3374	0,2775	0,6060
A ² B	0,5854	1	0,5854	0,4815	0,4983
AB ²	1,47	1	1,47	1,21	0,2890
A ³	71,56	1	71,56	58,86	< 0.0001
B ³	1,10	1	1,10	0,9046	0,3566
Residual	18,24	15	1,22		
Lack of Fit	14,51	13	1,12	0,5997	0,7733
Pure Error	3,72	2	1,86		

Hasil analisis ANOVA pada Tabel 5 nilai *Model F-value* sebesar 154,5 menunjukkan bahwa model signifikan, dengan probabilitas hanya 0,01% bahwa nilai tersebut terjadi akibat noise. Parameter A, B, AB, A², B², A²B, A³, dan B³ memiliki *p-value* <0,05, sehingga berpengaruh signifikan terhadap respons yang mengindikasikan adanya hubungan non-linear dan interaksi antar variable (Montgomery, 2017; Myers et al., 2016).

Nilai *Lack of Fit F-value* sebesar 0,5997 dengan *p-value* probabilitas 0,7733 menunjukkan bahwa ketidaksesuaian model tidak signifikan dan kemungkinan disebabkan oleh variasi acak. Dengan demikian, model dinilai cukup baik dalam merepresentasikan data eksperimen dan dapat digunakan untuk analisis serta prediksi (Bezerra et al., 2008).

Berdasarkan optimasi kondisi parameter yang telah dilakukan menggunakan metode CCD didapatkan persamaan aktual untuk menentukan *response yield*.



Gambar 6. Grafik perbandingan response Yield dalam bentuk Predicted vs Actual

Grafik *Predicted vs Actual* pada Gambar 6 menunjukkan hubungan antara nilai aktual dan nilai prediksi. Semakin dekat titik data ke garis kenormalan, semakin baik kesesuaian prediksi dan nilai R^2 mendekati 1. Grafik ini terdiri dari 25 titik data dari respons aktual.

Hasil pengolahan data menggunakan Software Design Expert 13 menghasilkan solusi nilai optimum yang disajikan dalam Tabel 5.

Tabel 6. Hasil Optimalisasi Response

Number	konsentrasi	suhu	kadar	yield	Desirability	
1	23,003	12,106	79,569	89,559	1	Selected

Hasil response yang paling optimal didapatkan setelah memenuhi batasan batasan yang sudah ditentukan. Pada faktor konsentrasi asam sulfat (H_2SO_4) sebesar 23,03% dan suhu kristalisasi sebesar 12,11°C didapatkan titik paling optimal dengan. Nilai response optimal kadar tembaga sebesar 79,569 dan yield sebesar 89,559. Pada hasil tersebut diperoleh nilai desirability 0,953. Nilai desirability merupakan nilai yang menunjukkan sejauh mana program dapat memenuhi kriteria yang ditetapkan pada response. Nilai desirability berada dalam rentang 0-1, dimana semakin tinggi nilai desirability menunjukkan hasil optimasi tersebut semakin akurat terhadap hasil yang ingin dicapai.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, limbah kabel tembaga dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku untuk

sintesis tembaga(II) sulfat pentahidrat ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$) melalui metode kristalisasi dingin. Peningkatan konsentrasi asam sulfat dan penurunan suhu kristalisasi dapat meningkatkan yield kristal yang dihasilkan. Yield tertinggi diperoleh sebesar 89,43% pada konsentrasi H_2SO_4 22% dengan suhu 8 °C. Hasil karakterisasi XRF menunjukkan dominasi unsur tembaga 79,64% dalam produk, sedangkan analisis XRD menunjukkan fase triklinik dan fase utama yang terbentuk $CuSO_4 \cdot 5H_2O$. Analisis hidrasi juga menunjukkan rasio mol $CuSO_4$ terhadap H_2O sebesar 1:5 yang sesuai dengan struktur tembaga sulfat pentahidrat. Optimasi menggunakan metode RSM diperoleh kondisi optimum pada konsentrasi H_2SO_4 23,00% dan suhu kristalisasi 12,11°C menghasilkan prediksi yield 89,56% dan kadar Cu 79,57% dengan nilai desirability yang mendekati 1.

DAFTAR PUSTAKA

Ali, M. M., & Sultoni, A. I. (2019). *Casting Process Of Electrical Cable Conductor Material From Copper Deposit And Scrap*. 63–68.

Alimohammadzadeh, H., Behrad-vakylabad, A., & Ghader, S. (2018). On the optimization of the crystallization related to an aqueous copper sulfate ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$). *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 0(0), 1–9. <https://doi.org/10.1080/25726641.2018.1521575>

Bakshi, M., & Kumar, A. (2021). Chemosphere Copper-based nanoparticles in the soil-plant environment: Assessing their applications, interactions, fate and toxicity. *Chemosphere*, 281(February), 130940. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130940>

Bezerra, M. A., Santelli, R. E., Oliveira, E. P., Villar, L. S., & Escalera, L. A. (2008). Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta*, 76(5), 965–977. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.05.019>

Casas, J. M., Alvarez, F., & Cifuentes, L. (2000). *Aqueous speciation of sulfuric acid } cupric sulfate solutions*. 55, 6223–6234.

Fitrony, Fauzi, R., & Qadariyah, L. (2013).

- Pembuatan Kristal Tembaga Sulfat Pentahidrat (CuSO₄.5H₂O) dari Tembaga Bekas Kumparan*. 2(1), 2–6.
- Greenwood, N. N., & Earnshaw, A. (2012). *Chemistry of the Elements*. Butterworth-Heinemann.
<https://books.google.co.id/books?id=EvTI-ouH3SsC>
- Housecroft, C. E., & Sharpe, A. G. (2018). *Inorganic Chemistry*. Pearson.
<https://books.google.co.id/books?id=8VyjtAEACAAJ>
- Justel, F. J., Camacho, D. M., Taboada, M. E., & Roberts, K. J. (2019). Crystallisation of copper sulphate pentahydrate from aqueous solution in absence and presence of sodium chloride. *Journal of Crystal Growth*, 525(July), 125204.
<https://doi.org/10.1016/j.jcrysro.2019.125204>
- Justel, F. J., Claros, M., & Taboada, M. E. (2015). *Solubilities And Physical Properties Of Saturated Solutions In The Copper Sulfate + Sulfuric Acid + Seawater System At Different Temperatures*. 32(03), 629–635.
- Lasota, S., Stephan, I., Horn, M. A., & Otto, W. (2019). *crossm Copper in Wood Preservatives Delayed Wood Decomposition Composition*. 85(4), 1–13.
- Linke, W. F. (1958). *Solubilities, Inorganic and Metal Organic Compounds: A Compilation of Solubility Data from the Periodical Literature* (Issue v. 1). Van Nostrand.
<https://books.google.co.id/books?id=cgoLAQAAMAAJ>
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, Incorporated.
<https://books.google.co.id/books?id=Py7bDgAAQBAJ>
- Mullin, J. W. (2001). *Crystallization*. Butterworth-Heinemann.
<https://books.google.co.id/books?id=Et0EtojQmvsC>
- Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016). *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. Wiley.
<https://books.google.co.id/books?id=T-BbCwAAQBAJ>
- Perry, R. H., & Green, D. W. (2008). *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. McGraw-Hill.
https://books.google.co.id/books?id=b_bQjwEACAAJ
- Stern, H. A. G., Sadoway, D. R., & Tester, J. W. (2017). Copper sulfate reference electrode Copper sulfate reference electrode. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 659(2), 143–150.
<https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2011.05.014>
- Wardhani, L. (2024). G-Tech : Jurnal Teknologi Terapan. *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, 8(3), 1931–1939.