

Pengaruh Perbandingan Organik/Air dan Temperatur Terhadap Proses Kristalisasi Nikel Sulfat

Muhammad Ridwan Septiawan

Program Studi Teknik Kimia Mineral, Politeknik Industri Logam Morowali

septiawanridwan732@gmail.com

Informasi Artikel

Vol: 1 No : 3 2024
Halaman : 85-95

Abstract

Li-NMC battery cathode raw material. The nickel compound used in NMC cathode materials is usually in the form of nickel sulfate hexahydrate ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). To obtain high-purity nickel sulfate, hydrometallurgical processing of primary sources such as nickel laterite ore and nickel sulfide minerals or secondary sources such as spent lithium-ion batteries containing nickel is often used. Typical hydrometallurgical processing involves pretreatment, acid leaching, separation/refining, and crystallization. In this research, a solid nickel sulfate crystallization study will be carried out using the organic solvent isopropanol as a crystallization agent. The principle of this crystallization process is that adding the right organic solvent (type and concentration) at a low temperature ($10\text{-}15^\circ\text{C}$), will make the solution super saturated, thereby reducing the solubility of the metal-sulfate in the solution. As a result, the process of crystallization of metal solids occurs. This research was conducted to see the influence of several parameters such as the influence of the organic/water ratio and temperature on the crystallization process. This research carried out a series of experiments consisting of dissolution, crystallization and characterization. The research results showed that the organic water (OA) ratio of 2:1 and room temperature were the best parameters with a settling percent of 99% and a recovery percent of 96%. The type of compound in the precipitate obtained was nickel sulfate hexahydrate ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) in accordance with the type of compound found in the initial pro-analysis nickel sulfate solid sample with an irregular precipitate grain shape.

Keywords:

nickel sulfate
crystallization
isopropanol
low temperature

Abstrak

bahan baku katode baterai Li-NMC. Senyawa nikel yang digunakan dalam bahan katode NMC biasanya dalam bentuk nikel sulfat heksahidrat ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Untuk memperoleh nikel sulfat dengan kemurnian tinggi, pemrosesan hidrometalurgi dari sumber primer seperti bijih nikel laterit dan mineral nikel sulfide atau sumber sekunder seperti baterai bekas lithium-ion yang mengandung nikel sering digunakan. Pemrosesan hidrometalurgi umum melibatkan praperlakuan, pelindian asam, pemisahan/pemurnian, dan kristalisasi. Pada penelitian ini akan dilakukan studi kristalisasi padatan nikel sulfat menggunakan pelarut organik isopropanol sebagai agen kristalisasi. Prinsip proses kristalisasi ini adalah penambahan pelarut organik yang tepat (jenis dan konsentrasi) pada temperatur rendah ($10\text{-}15^\circ\text{C}$), akan membuat larutan menjadi super jenuh sehingga menurunkan kelarutan logam-sulfat dalam larutan. Akibatnya, proses kristalisasi padatan logam terjadi. Penelitian ini dilakukan untuk melihat pengaruh beberapa parameter seperti pengaruh perbandingan organik/air dan temperatur mempengaruhi proses kristalisasi. Penelitian ini melalui serangkaian percobaan yang terdiri dari pelarutan, kristalisasi dan karakterisasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perbandingan organik air (OA) 2:1 dan temperatur ruang adalah parameter terbaik dengan persen pengendapan 99% dan persen perolehan 96%. Jenis senyawa pada endapan yang diperoleh adalah nikel sulfat heksahidrat ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) sesuai dengan jenis senyawa yang terdapat pada sampel awal padatan nikel sulfat pro-analisis dengan bentuk butiran endapan tidak teratur.

Kata Kunci: nikel sulfat, kristalisasi, isopropanol, temperatur rendah.

PENDAHULUAN

Nikel merupakan salah satu unsur logam transisi yang bermanfaat dalam industri kimia. Unsur ini memiliki beberapa karakteristik penting yang dimanfaatkan dalam pengaplikasiannya, seperti tahan terhadap korosi dan panas, konduktivitas panas dan listrik yang cukup rendah, kekuatan impak dan keuletan yang tinggi serta dapat membentuk alloy dengan unsur logam lain. Dalam bidang industri, nikel banyak diaplikasikan dalam produksi stainless dan alloy steel, nonferrous alloys dan superalloys, katalis, serta industri electroplating serta baterai [1]. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Roskill [2], disebutkan bahwa penggunaan nikel sebagai bahan baku baterai akan meningkat. Pada tahun 2020, penggunaan nikel dunia untuk dijadikan bahan baku baterai hanya mencapai 6%, tahun 2030 mencapai 26%, dan pada tahun 2040 mencapai 36%. Baterai tersebut nantinya akan dipakai sebagai bahan bakar mobil listrik. Adanya fenomena trend kenaikan penggunaan kendaraan berbasis bahan bakar listrik. Pada tahun 2022, penjualan kendaraan listrik dunia mencapai 10.5 juta, di mana penjualan tersebut naik 55% dibandingkan tahun 2021. Kemudian, Di tahun 2040 diperkirakan permintaan kendaraan listrik akan meningkat sekitar 55 juta. Trend meningkatnya penggunaan kendaraan listrik merupakan salah satu kampanye global untuk memerangi perubahan iklim. Negara-negara dunia kini mulai beralih menggunakan kendaraan listrik sebagai bentuk kepeduliannya [3].

Dari beberapa bahan katode baterai yang telah dikembangkan dalam tiga dekade terakhir, lithium nikel mangan kobalt oksida (Li-NMC) telah menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam hal kapasitas spesifik, karena menghasilkan kapasitas spesifik 180–200 mA h g⁻¹ dibandingkan dengan yang diperoleh dari LiCoO₂ 150 mA h g⁻¹. Keunggulan ini menyebabkan dominasinya dalam pemanfaatan kendaraan listrik (EV), perkakas listrik, serta perangkat medis dan portabel meskipun komersialisasinya relatif terlambat pada tahun 2004. Senyawa nikel yang digunakan dalam bahan katode NMC biasanya dalam bentuk nikel sulfat heksahidrat (NiSO₄·6H₂O). Untuk memperoleh nikel sulfat dengan kemurnian tinggi, pemrosesan hidrometalurgi dari sumber primer seperti bijih nikel laterit dan mineral nikel sulfide atau sumber sekunder seperti baterai bekas lithium-ion yang mengandung nikel sering digunakan. Pemrosesan hidrometalurgi umum melibatkan praperlakuan, pelindian asam, pemisahan/pemurnian, dan kristalisasi [4].

Moldoveanu dan Demopoulos [5], [6] telah mengembangkan metode kristalisasi baru dalam menghasilkan nikel sulfat berkadar tinggi dari hasil samping proses electro-refining tembaga. Metode tersebut adalah metode pengendapan Solvent Displacement Crystallization (SDC). Prinsip dari SDC adalah penambahan pelarut organik yang tepat (jenis dan konsentrasi) pada temperatur rendah (10–15°C), akan membuat larutan menjadi super jenuh dan menurunkan kelarutan logam-sulfat dalam larutan sehingga terjadi pengendapan atau kristalisasi padatan logam-sulfat. Metode pengendapan solvent displacement crystallization (SDC) dapat menghasilkan padatan nikel sulfat yang memiliki kemurnian tinggi dengan biaya operasional yang lebih murah. Hal ini disebabkan karena metode ini menggunakan pelarut organik sehingga dapat mengontrol proses pengendapan dengan lebih baik. Selain itu, pelarut organik tidak korosif, harganya lebih murah dibandingkan metode kristalisasi konvensional yang menggunakan pelarut anorganik seperti NaOH dan dapat digunakan kembali.

Berdasarkan hal tersebut, pada penelitian ini akan dilakukan studi pendahuluan terkait proses kristalisasi nikel sulfat menggunakan pelarut organik isopropanol. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh perbandingan organik/air dan temperatur terhadap proses kristalisasi nikel sulfat. Diharapkan bahwa temuan dari penelitian ini akan berfungsi sebagai studi pendahuluan dan referensi untuk proses pengendapan nikel sulfat yang nantinya akan dihasilkan dari proses hidrometalurgi bijih nikel laterit sebagai bahan baku untuk baterai ion litium.

METODE

Penelitian ini untuk mengevaluasi proses pelarutan, kristalisasi, dan karakterisasi padatan nikel sulfat menggunakan bahan kimia pro-analisis, yaitu padatan nikel sulfat, pelarut isopropanol, asam

sulfat, dan asam klorida. Metode penelitian dibagi menjadi tiga tahapan utama: pembuatan larutan, percobaan kristalisasi, dan karakterisasi produk.

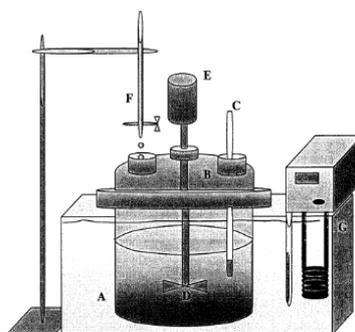
Penelitian ini menggunakan padatan nikel sulfat, pelarut isopropanol, asam sulfat, dan asam klorida. Semua bahan yang digunakan adalah pro-analisis. Tahapan pada penelitian ini meliputi pelarutan, kristalisasi dan karakterisasi.

Pembuatan Larutan Nikel Sulfat Awal

Larutan nikel sulfat awal dibuat dengan melarutkan padatan nikel sulfat pro-analisis dalam media gelas. Konsentrasi larutan nikel sulfat awal yang digunakan adalah 1 M. Untuk menyiapkan larutan nikel sulfat awal 1 M, sekitar 12,8612 g padatan nikel sulfat pro-analisis dilarutkan dalam media gelas kimia 40 mL dengan air suling kemudian diaduk hingga larut.

Percobaan Kristalisasi

Percobaan kristalisasi dilakukan dengan memvariasikan rasio organik/air dan temperatur. Percobaan variasi organik/air dilakukan dengan menambahkan larutan isopropanol ke dalam gelas kimia yang berisi 40 mL larutan nikel sulfat awal 1 M dengan rasio organik/air 0-2 dengan interval 0,4 dan diaduk selama 6 jam pada suhu 10°C.



Details :

A. Waterbath

E. Mixer motor

B. Glass reactor

F. Burette B. Cover

Gambar 1. Rangkaian peralatan percobaan kristalisasi (Moldoveanu, 2005)

Karakterisasi

Padatan nikel sulfat pro-analisis dan endapan hasil kristalisasi dikarakterisasi menggunakan XRD (X-Ray Diffraction) untuk mendeteksi jenis senyawa yang terbentuk, XRF (X-ray Fluorescence) untuk menentukan komposisi kimia, dan SEM (Scanning Electron Microscope) untuk memeriksa morfologi butiran endapan yang terbentuk. Konsentrasi nikel yang tersisa dalam larutan filtrat ditentukan menggunakan AAS (Atomic Absorption Spectroscopy).

HASIL DAN PEMBAHASAN

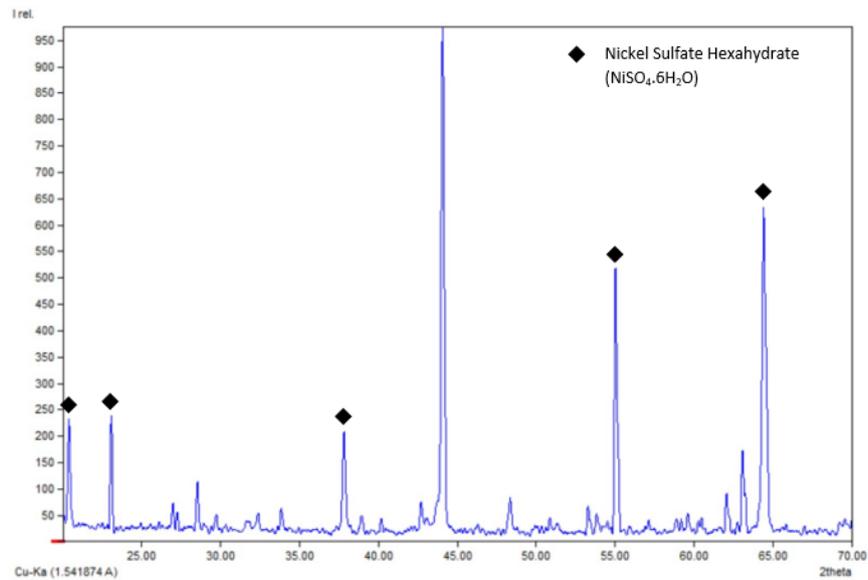
Sampel padatan nikel sulfat pro-analisis dikarakterisasi dengan pengujian XRF, XRD, dan SEM. Hasil pengujian komposisi kimia (XRF) sampel nikel sulfat pro-analisis menunjukkan adanya komponen penting dalam sampel. Berdasarkan data XRF, diketahui bahwa sampel memiliki konsentrasi unsur utama seperti nikel (Ni) sebesar 43,95% dan unsur sulfur (S) sebesar 17,38% sedangkan untuk unsur minor ditemukan memiliki jumlah yang terbatas.

Hasil ini menunjukkan bahwa sampel padatan nikel sulfat pro-analisis yang digunakan memiliki kemurniannya yang tinggi sehingga sangat sesuai untuk digunakan sebagai bahan baku dalam penelitian ini. Selain komposisi unsur, hasil pengujian XRF juga menunjukkan nilai LOI sebesar 38,43% yang mengindikasikan bahwa sampel tersebut mengandung sejumlah besar material yang hilang ketika dipanaskan pada suhu tinggi. Hasil LOI yang cukup besar ini menunjukkan adanya konsentrasi air dan bahan kimia volatil lainnya yang tinggi dalam sampel padatan nikel sulfat pro-analisis.

Tabel 1. Hasil pengujian komposisi kimia (XRF) pada sampel padatan nikel sulfat pro-analisis.

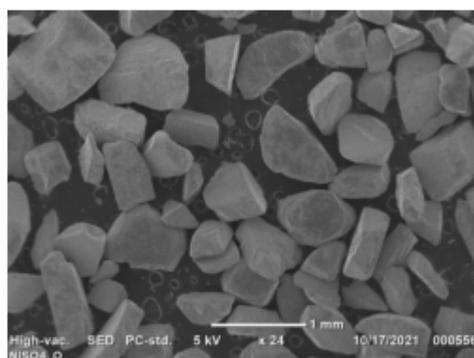
Parameter	Satuan	Hasil
Ni	m/m%	43,95
Sx	m/m%	17,38
Px	m/m%	0,10
Ca	m/m%	0,09
Nb	m/m%	0,01
Mo	m/m%	0,02
Ru	m/m%	0,01
In	m/m%	0,00
Pd	m/m%	0,01
LOI	m/m%	38.43

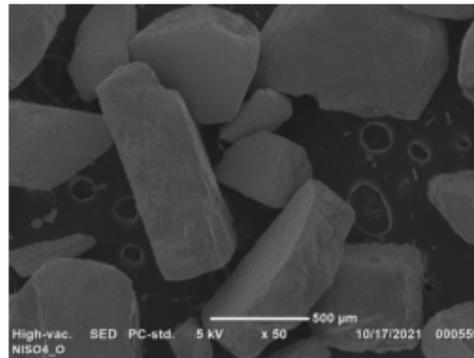
Hasil pengujian XRD menunjukkan bahwa senyawa nikel sulfat heksahidrat ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) adalah senyawa yang ditemukan pada sampel awal padatan nikel sulfat pro-analisis. Puncak-puncak yang ditemukan merupakan refleksi sinar-X dari struktur kristal senyawa nikel sulfat heksahidrat ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), menunjukkan bahwa struktur kristal nikel sulfat heksahidrat ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) terkristalisasi dengan baik. Intensitas puncak yang tinggi pada grafik XRD juga dapat menunjukkan bahwa sampel awal mengandung konsentrasi atom yang signifikan yang jika dihubungkan dengan hasil pengujian komposisi XRF, atom-atom tersebut merupakan atom-atom yang berasal dari unsur nikel dan sulfur. Hasil LOI dari pengujian XRF juga terkonfirmasi melalui pengujian XRD ini dimana hasil uji XRD ini memungkinkan untuk mengidentifikasi air kristal yang menguap dalam uji komposisi sebagai senyawa heksahidrat.



Gambar 2. Hasil pengujian jenis senyawa (XRD) padatan nikel sulfat pro-analisis

Hasil pengujian morfologi butiran padatan nikel sulfat pro-analisis menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM) menunjukkan bahwa butiran padatan nikel sulfat pro-analisis memiliki bentuk yang teratur dan distribusi ukuran butiran yang bervariasi, dengan ukuran yang diamati berkisar hingga 1 mm. Pemeriksaan SEM terhadap struktur mikro butiran nikel sulfat pro-analisis menunjukkan struktur kristal karakteristik yang sesuai dengan hasil pengujian XRD sebelumnya sehingga mengkonfirmasi nikel sulfat heksahidrat ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) sebagai komponen utama. Tampilan kontinu dan simetris dari struktur kristal pada gambar SEM menunjukkan bahwa butiran padatan nikel sulfat pro-analisis ini dihasilkan dari proses kristalisasi yang baik.





Gambar 3

Hasil pengujian morfologi (SEM) butiran sampel padatan nikel sulfat pro-analisis Tabel 2 menampilkan berat sampel awal padatan nikel sulfat pro-analisis yang digunakan untuk percobaan kristalisasi dan endapan hasil percobaan kristalisasi untuk variasi rasio pelarut organik/air (O/A). Pada percobaan ini, rasio pelarut O/A divariasikan dari 0:1 menjadi 2:1 yang menghasilkan berat endapan bervariasi secara signifikan.

Tabel tersebut menunjukkan bahwa berat endapan yang dihasilkan meningkat seiring dengan meningkatnya rasio pelarut organik terhadap air. Misalnya, berat endapan yang terbentuk pada rasio 2:1 adalah 12,8610 g sedangkan berat yang diperoleh pada rasio 0:1 adalah 0,2247 g. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan pelarut organik seperti isopropanol meningkatkan pengendapan nikel sulfat.

Secara teoritis, pelarut organik mengurangi kelarutan ion logam dan sulfat dalam larutan, yang terlihat dari peningkatan berat endapan. Isopropanol membantu proses dehidrasi dengan menarik molekul air dari senyawa sulfat, yang mendorong pengendapan. Dengan kata lain, makin tinggi rasio O/A, makin efektif proses dehidrasi, sehingga makin tinggi pula laju pembentukan endapan.

Tabel 2. Berat sampel awal dan endapan hasil percobaan kristalisasi variasi organik/air (O/A).

Ratio (O/A)	Sampel Awal	Endapan Kristal
	g	g
0,0 : 1	12,8699	0,2247
0,4 : 1	12,8699	7,6813
0,8 : 1	12,8699	10,2327
1,2 : 1	12,8699	12,6638
1,6 : 1	12,8699	12,6195
2,0 : 1	12,8699	12,8610

Dalam percobaan kristalisasi dengan variasi rasio organik/air (O/A), data menunjukkan hubungan yang signifikan antara rasio O/A dan berat nikel dalam sampel larutan awal, berat nikel dalam filtrat, dan persentase pengendapan. Pada rasio O/A 0:1, berat awal nikel adalah 5,6550 g, dan berat nikel dalam filtrat adalah 5,05139 g, sehingga menghasilkan persentase pengendapan yang rendah, yaitu 10,67%. Ketika rasio O/A ditingkatkan menjadi 1,2:1, berat nikel dalam filtrat menurun menjadi 0,0050 g, sedangkan persentase pengendapan meningkat menjadi 99,91%.

Hasil ini menunjukkan bahwa lebih banyak nikel yang diendapkan secara efektif dari larutan, seperti yang ditunjukkan oleh persentase pengendapan yang tinggi pada rasio O/A yang lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa rasio O/A yang lebih tinggi meningkatkan efektivitas pengendapan nikel, yang menunjukkan bahwa dalam kondisi ini, metode kristalisasi sangat efektif dalam pengendapan nikel sulfat. Hal ini dijelaskan oleh mekanisme pengendapan, yang menyatakan bahwa menambahkan lebih banyak isopropanol, pelarut organik ke dalam campuran dapat meningkatkan interaksi antara pelarut dan nikel sulfat dan mempercepat proses pengendapan.

Tabel 3. Persentase pengendapan nikel sulfat pada percobaan kristalisasi variasi organik/air (O/A).

Ratio (O/A)	Berat Nikel		Persentase Pengendapan
	Sampel Awal	Filtrat	
	g	g	%
0,0 : 1	5,6550	5,0513	10,67
0,4 : 1	5,6550	1,9494	65,52
0,8 : 1	5,6550	1,2993	77,02
1,2 : 1	5,6550	0,0050	99,91
1,6 : 1	5,6550	0,0021	99,96
2,0 : 1	5,6550	0,0017	99,97

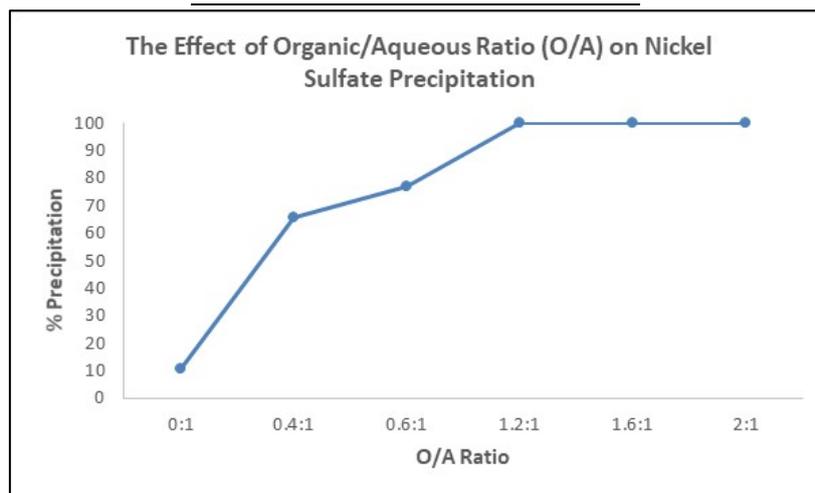
Hasil uji komposisi kimia (XRF) dalam percobaan perbandingan organik/air (O/A) 2:1, yang disajikan dalam Tabel 4, menunjukkan informasi penting tentang kandungan unsur kristal nikel sulfat yang dihasilkan. Tabel tersebut memuat data tentang persentase unsur dan senyawa yang terkandung dalam sampel endapan kristal hasil proses kristalisasi.

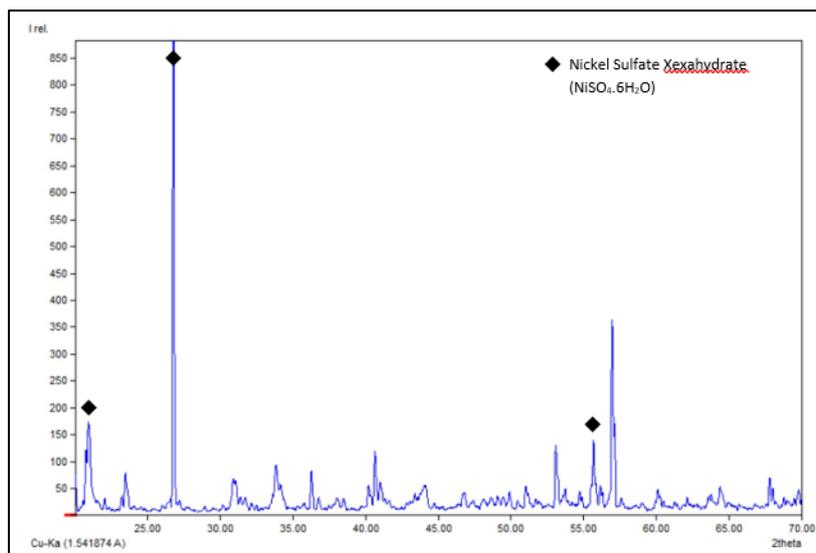
Hasil uji menunjukkan sedikit peningkatan persentase nikel dalam endapan kristal, baik sebagai unsur maupun jika dibandingkan dengan sampel awal padatan nikel sulfat pro-analisis. Lebih jauh, konsentrasi sulfur endapan kristal sedikit menurun jika dibandingkan dengan sampel awal.

Temuan ini menunjukkan kecocokan kimia yang signifikan antara padatan endapan kristalisasi dan sampel awal karena hanya sedikit perubahan yang terjadi pada padatan endapan hasil kristalisasi jika dibandingkan dengan sampel awal padatan nikel sulfat pro-analisis.

Tabel 4. Hasil Uji Komposisi Kimia (XRF) Endapan Hasil Percobaan Perbandingan Organik/Air (O/A) 2:1.

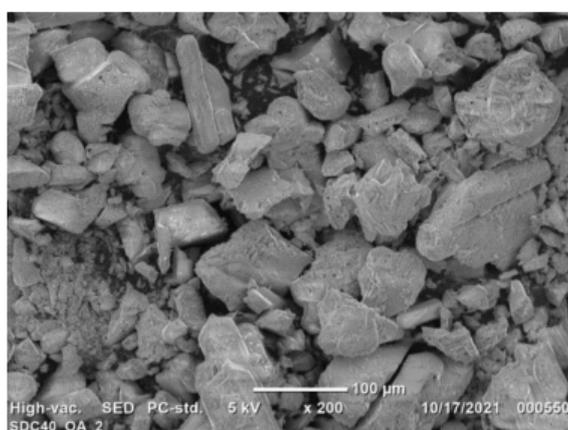
Parameter	Satuan	Hasil
Ni	m/m%	43.95
Sx	m/m%	17.38
Px	m/m%	0.10
Ca	m/m%	0.09
Nb	m/m%	0.01
Mo	m/m%	0.02
Ru	m/m%	0.01
In	m/m%	0.00
Pd	m/m%	0.01
LOI	m/m%	38.43

**Gambar 4.** Pengaruh Rasio Organik/Air (O/A) terhadap Deposisi Nikel Sulfat



Gambar 5. Hasil uji jenis senyawa (XRD) dari percobaan perbandingan organik/air 2:1

Data XRF mendukung identifikasi endapan kristal sebagai nikel sulfat heksahidrat ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) melalui uji XRD. Meningkatnya kandungan nikel yang ditemukan dalam endapan kristal menunjukkan bahwa metode pengendapan berhasil memisahkan nikel dalam larutan awal nikel sulfat pro-analisis. Metode ini juga mempertahankan komposisi kimia senyawa yang diinginkan.



Gambar 6. Results of the particle morphology test (SEM) from the organic/aqueous ratio experiment 2:1

Analisis mikroskop pemindaian elektron (SEM) dari percobaan rasio O/A 2:1 mengungkapkan bahwa endapan kristal nikel sulfat heksahidrat ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) memiliki bentuk yang tidak teratur dan ukuran yang bervariasi, tidak seperti tampilan sampel awal padatan nikel sulfat pro-analisis yang lebih teratur. Teknik pengendapan yang digunakan dalam percobaan dapat menjelaskan perbedaan morfologi yang diamati. Butiran yang teratur dalam sampel awal kemungkinan besar merupakan hasil dari proses kristalisasi yang konstan. Namun, keberadaan isopropanol dalam percobaan O/A 2:1 mungkin telah mengubah proses pembentukan butiran. Pelarut organik dapat memengaruhi interaksi ion logam dan sulfat, mempercepat dehidrasi dan menghasilkan bentuk butiran yang lebih tidak teratur.

Pada percobaan variasi temperatur diperoleh peningkatan berat endapan kristal seiring meningkatnya temperatur. Peningkatan yang terjadi tidak terlalu signifikan disebabkan persen pengendapan nikel yang sudah tinggi yaitu 99,97% pada percobaan variasi organik/air (OA) 2:1 yang dilakukan pada temperatur 10°C. Pada percobaan variasi temperatur diperoleh berat endapan kristal tertinggi terdapat pada percobaan variasi temperatur ruang. Meningkatnya berat endapan kristal diikuti oleh penurunan konsentrasi nikel pada filtrat larutan sisa pengendapan seiring meningkatnya temperatur sehingga persen pengendapan nikel yang diperoleh juga semakin tinggi dibandingkan persen pengendapan nikel hasil percobaan variasi organik/air (OA) yang menggunakan temperatur 10°C. Persen pengendapan nikel pada percobaan variasi temperatur ruang diperoleh sebesar 99,96%.

Tabel 5. Berat sampel awal dan endapan hasil percobaan kristalisasi variasi temperatur.

Temperatur (°C)	Sampel Awal	Endapan Kristal
	G	g
10	12,8667	12,8610
15	12,8619	12,8718
20	12,8609	12,8740
25	12,8618	12,9107
Ruang	12,8613	12,9764

Tabel 6. Persentase pengendapan nikel sulfat pada percobaan kristalisasi variasi temperatur.

T (°C)	Berat Nikel		Persentase Pengendapan
	Sampel Awal	Filtrat	
	g	g	%
10	5,6536	0,00173	99,969
15	5,6515	0,00036	99,994
20	5,6511	0,00039	99,993
25	5,6515	0,00023	99,996
Ruang	5,6513	0,00024	99,996

KESIMPULAN

Proses kristalisasi larutan nikel sulfat pro-analisis dengan memanfaatkan pelarut isopropanol efektif memulihkan padatan kristal nikel sulfat heksahidrat ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) dengan persen pengendapan 99%.

Ucapan Terima Kasih

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Industri Logam Morowali yang telah memberikan dukungan dana penelitian kepada penulis.

REFERENCES

- K. C. Wanta *et al.*, "Pengaruh Derajat Keasaman (pH) dalam Proses Presipitasi Hidroksida Selektif Ion Logam dari Larutan Ekstrak Spent Catalyst," *Jurnal Rekayasa Proses*, vol. 13, no. 2, p. 94, Dec. 2019, doi: 10.22146/jrekpros.44007.
- Roskill, "Study on Future Demand and Supply Security of Nickel for Electric Vehicle Batteries," Luxembourg, 2021. doi: 10.2760/212807.
- D. D. Radhica and R. A. A. Wibisana, "Proteksionisme Nikel Indonesia dalam Perdagangan Dunia," *Cendekia Niaga. Journal of Trade Development and Studies.*, vol. 7, no. 1, pp. 74–84, 2023.
- K. H. Choi and G. Azimi, "Crystallization of nickel sulfate and its purification process: towards efficient production of nickel-rich cathode materials for lithium-ion batteries," *RSC Adv*, vol. 13, no. 41, pp. 28501–28512, Sep. 2023, doi: 10.1039/d3ra04280d.
- G. A. . Moldoveanu, *Crystallisation of inorganic compounds with alcohols*. Library and Archives Canada = Bibliothèque et Archives Canada, 2005.
- G. A. Moldoveanu and G. P. Demopoulos, "Producing high-grade nickel sulfate with solvent displacement crystallization," *JOM*, vol. 54, no. 1, pp. 49–53, 2002, doi: 10.1007/BF02822606.