

Pelindian Fe_2O_3 dari Limbah Karat Besi Menggunakan HCl dan $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$

Asiyah Nurrahmajanti

Jurusan Kimia Tekstil, Politeknik STTT Bandung, Indonesia

Email: asiyah.janti@gmail.com

Abstract

This study aims to extract iron(III) oxide (Fe_2O_3) from iron rust waste using a leaching method with hydrochloric acid (HCl) and oxalic acid ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$). After the leaching process with acids, precipitation was carried out using sodium hydroxide (NaOH) solution. The variation in acid type was conducted to evaluate the leaching effectiveness based on the Fe_2O_3 yield obtained. The results showed that HCl was more effective in dissolving Fe_2O_3 compared to $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$. The yields obtained from each acid type were 64.44% for HCl and 24.39% for $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$. The precipitation process was performed at a pH of 5–7 to ensure the formation of a stable $\text{Fe}(\text{OH})_3$ precipitate before being dried into Fe_2O_3 . Qualitative analysis using potassium hexacyanoferrate(III) ($\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$) confirmed the presence of Fe^{3+} ions in the final product from both acid treatments. This method has proven to be effective in obtaining high-quality Fe_2O_3 that can be used in various industrial and research applications. Additionally, this study contributes to the utilization of iron rust waste as a valuable precursor material for direct use or further processing while also reducing environmental pollution.

Keywords: Fe_2O_3 , Leaching, Precipitation, HCl, $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$, Iron Rust Waste.

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengekstraksi besi(III) oksida (Fe_2O_3) dari limbah karat besi menggunakan metode pelindian dengan larutan asam klorida (HCl) dan asam oksalat ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$). Setelah proses pelindian dengan asam, dilanjutkan dengan melakukan proses presipitasi menggunakan larutan natrium hidroksida (NaOH). Variasi jenis asam dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas pelindian berdasarkan rendemen Fe_2O_3 yang diperoleh. Hasil penelitian menunjukkan bahwa HCl lebih efektif dalam melarutkan Fe_2O_3 dibandingkan $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$. Perolehan rendemen dari masing-masing jenis asam yaitu sebesar 64,44% (HCl) dan 24,39% ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$). Proses presipitasi dilakukan pada pH 5–7 untuk memastikan terbentuknya endapan $\text{Fe}(\text{OH})_3$ yang stabil sebelum dikeringkan menjadi Fe_2O_3 . Analisis kualitatif menggunakan kalium heksasianoferat(III) ($\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$) mengonfirmasi keberadaan ion Fe^{3+} dalam produk akhir dari kedua jenis asam. Metode ini terbukti efektif dalam memperoleh Fe_2O_3 berkualitas tinggi yang dapat digunakan dalam berbagai aplikasi industri dan penelitian. Selain itu, penelitian ini berkontribusi terhadap pengolahan limbah karat besi sebagai bahan baku bernilai guna sebagai pre cursor untuk digunakan langsung maupun untuk proses selanjutnya serta mengurangi dampak pencemaran lingkungan.

Kata Kunci: Fe_2O_3 , Pelindian, Presipitasi, HCl, $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$, Limbah Karat Besi.

1. PENDAHULUAN

Limbah karat besi merupakan salah satu bentuk pencemaran lingkungan yang umum dijumpai di industri maupun rumah tangga. Pencemaran tersebut dapat merugikan dari sisi ekonomi maupun dari sisi kesehatan (Febrina & Ayuna, 2015). Prof. Rini Riastuti dalam pidato pengukuhan guru besarnya menyatakan kerugian korosi dari sisi ekonomi, peralatan yang berkarat akan menyebabkan kebocoran pada container, tangki, dan perpipaan sehingga industri harus mengalami *plant downtime* atau waktu henti pabrik.

Hal tersebut tentunya akan menurunkan efisiensi yang akan berdampak pada biaya langsung yang lebih besar yang harus dikeluarkan oleh industri (Publik, 2023). Selain itu ada komponen biaya tidak langsung yakni terganggunya kelancaran bisnis dari sisi produktivitas dan transportasi yang biayanya lebih besar dari biaya langsung (Saugi, 2021). Antara, 2013 melakukan penelitian mengenai karat besi diindustri perhotelan di Bali yang menggunakan fasilitas Boiler sebagai sumber panas untuk mandi, memasak, mengerjakan cucian, dan sebagainya. Ditemukan bahwa permasalahan utama pada Boiler ialah timbulnya karat besi (Antara, 2013).

Dari sisi Kesehatan, karat besi yang terjadi pada peralatan rumah tangga bisa secara tidak sengaja masuk atau terkonsumsi. Ketika kadar besi berlebih maka akan menyebabkan infeksi, keracunan, dan berbagai macam gangguan kesehatan lainnya seperti sakit kepala, hipertensi, liver, dan rematik (Riskawati, Amir, & Muin, 2019).

Karat besi sebenarnya merupakan fenomena alami yang sulit dihindari akibat degradasi logam besi yang mengalami reaksi redoks antara logam dengan berbagai zat di lingkungannya. Pada prosesnya, logam besi mengalami oksidasi, sedangkan oksigen dari udara mengalami reduksi menghasilkan suatu zat padat berwarna merah kecokelatan dengan rumus kimia Fe_2O_3 (Lopez, 2023).

Sebetulnya, Oksida besi (Fe_2O_3) tersebut memiliki banyak manfaat yakni sebagai bahan baku dalam berbagai aplikasi industri dan penelitian. Khalamudillah, 2017 dan Khoiroh, 2013 memanfaatkan oksida besi hasil sintesis menjadi pigmen merah (Khalamudilah, Suhendar, & Supriadin, 2017) (Khoiroh, Mardiana, Sabarudin, & Ismuyanto, 2013). Penggunaan oksida besi lainnya yaitu sebagai katalis dalam proses pengolahan air limbah tekstil berbasis ozonisasi katalitik (Rame, Purwanto, & Budiarto, 2017). Berbeda halnya dengan Priyambudi dan Amrullah, 2017 yang membuat Fe_2O_3 sebagai precursor katalis heterogen pada pembuatan biodiesel dari minyak kelapa sawit (Priyambudi, Amrullah, Poerwadi, & Oktavian, 2017). Selain itu Fe_2O_3 juga dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku baterai lithium (Prasetyo, Prasetyo, & Matahari, 2014).

Namun, Pemanfaatan limbah karat besi masih terbatas sehingga diperlukan metode ekstraksi yang efisien agar memperoleh Fe_2O_3 dengan kemurnian tinggi. Oleh karena itu, pemanfaatan limbah karat besi menjadi Fe_2O_3 berkualitas tinggi dapat menjadi solusi yang efektif dalam mengurangi dampak pencemaran lingkungan sekaligus memenuhi kebutuhan bahan baku industri.

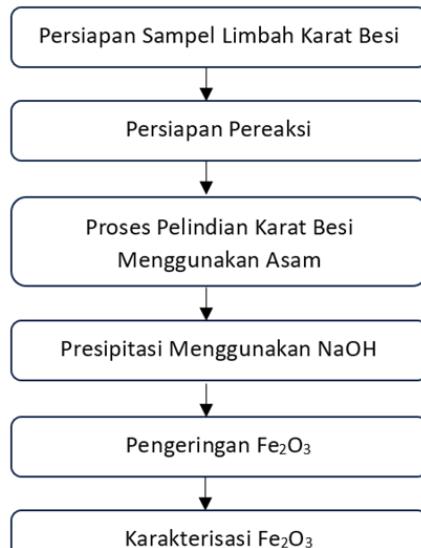
Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengekstraksi Fe_2O_3 dari limbah karat besi adalah metode pelindian dengan asam kuat diantaranya HCl , H_2SO_4 , dan HNO_3 . Asam-asam tersebut telah digunakan secara luas dalam proses pelindian karena efektivitasnya dalam melarutkan senyawa besi (Kheloufi, Berbar, Kefaifi, Medjahed, & Kerkar, 2011) (Setyo, Sulistyaningsih, Prasetya, & Kusumastuti, 2021). Setelah proses pelindian, Fe_2O_3 dapat diperoleh kembali melalui metode presipitasi menggunakan natrium hidroksida (NaOH) (Novia, Rukmananda, Juwairi, & Anugrah, 2021).

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dan membandingkan efektivitas pelindian limbah karat besi menggunakan HCl dan $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ serta menentukan metode terbaik dalam memperoleh Fe_2O_3 dengan kemurnian tinggi. Penelitian ini juga mengkaji pengaruh perbedaan jenis asam terhadap rendemen yang diperoleh serta analisis kualitatif hasil sintesis menggunakan uji sederhana yaitu pengujian kalium heksasianoferat(III) ($\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$) untuk memastikan keberadaan Fe^{3+} dalam produk akhir. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengolahan limbah karat besi serta mendukung penggunaan kembali limbah menjadi bahan baku yang bernilai guna tinggi.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Alur Penelitian

Alur penelitian sesuai dengan diagram alir pada Gambar 1 berikut ini.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.2 Alat Gelas

1. Gelas kimia
2. Corong
3. Labu Erlenmeyer
4. Batang Pengaduk
5. Spatula Stainless Steel
6. Kertas Saring
7. Indikator pH Universal
8. Lumpang Alu
9. Tabung Reaksi
10. Pipet Tetes
11. Rak Tabung Reaksi

2.3 Instrumen

1. Oven
2. Neraca Analitik

2.4 Bahan

1. Limbah karat besi
2. HCl
3. $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$
4. NaOH
5. Aquades

2.5 Prosedur

Persiapan sampel: Limbah karat besi diperoleh dari peralatan besi dilaboratorium yang telah berkarat. Proses pengambilannya ialah menggunakan bantuan spatula stainless steel dengan cara dikerik. Karat besi yang telah terkumpul kemudian digerus menggunakan lumpang alu sehingga ukuran partikel seragam.

Persiapan pereaksi: HCl yang digunakan memiliki konsentrasi 0,1 N. Dibuat dengan cara melarutkan sebanyak 10 mL HCl pekat ke dalam 1 L aquades. Sedangkan untuk memperoleh $H_2C_2O_4$ 0,1 N diperoleh dengan cara melarutkan 0,6300 g $H_2C_2O_4$ didalam labu ukur 100 mL. Setelah itu ditandabataskan dengan aquades. NaOH 4 N dibuat dengan melarutkan padatan NaOH sebanyak 160 g dilarutkan dengan 1 L aquades.

Pelindian karat besi: limbah karat besi ditimbang sebanyak 5 gram menggunakan neraca analitik di dalam gelas kimia 100 mL. Selanjutnya ditambahkan dengan HCl dan $H_2C_2O_4$ masing-masing sebanyak 50 mL. Diaduk secara berkala dan didiamkan selama 5 jam. Setelah itu disaring menggunakan kertas saring. Filtrat yang diperoleh kemudian ditambahkan NaOH 4 N per tetes sambil diaduk perlahan. Proses dijaga agar konstan pada pH 5-7 menggunakan indikator universal. Setelah tidak terbentuk endapan kembali, lalu disaring. Filtratnya dites endapan sempurna. Jika saat ditetesi NaOH masih terbentuk endapan merah kecokelatan, maka ditambahkan kembali NaOH lalu disaring. Sebaliknya, jika saat ditetesi NaOH tidak terbentuk endapan, maka spesi yang diinginkan telah mengendap semuanya. Selanjutnya, endapan yang diperoleh dikeringkan menggunakan oven selama 3 jam pada suhu 100°C.

Karakterisasi kualitatif: padatan Besi (III) Oksida yang telah diperoleh baik dari pelindian asam klorida (HCl) maupun asam oksalat ($H_2C_2O_4$), dicuplik sebanyak 0,5000 gram. Setelah itu sampel dilarutkan menggunakan HCl pekat sebanyak 5 mL didalam gelas kimia dan diaduk sampai larut. Sebanyak 1 mL larutan dimasukkan kedalam tabung reaksi dan ditetesi dengan $K_4[Fe(SCN)_6]$ sampai berubah warna dan muncul endapan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Sintesis Fe_2O_3 Dari Limbah Karat Besi

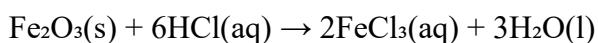
Proses pelindian merupakan proses pelarutan karat besi menggunakan larutan asam. Tujuan dari proses ini ialah untuk melarutkan besi yang terdapat dalam limbah karat besi. Pelindian limbah karat besi menggunakan asam klorida (HCl) dan asam oksalat ($H_2C_2O_4$) bertujuan untuk melarutkan besi dari limbah dan mengendapkannya kembali sebagai besi(III) oksida (Fe_2O_3) dengan metode presipitasi (Novia, Rukmananda, Juwairi, & Anugrah, 2021).

Tabel 1. Rendemen Hasil Pelindian

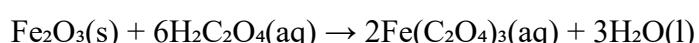
Asam	Massa (g)	Perolehan (g)	Rendemen (%)
HCl	5,0015	3,2230	64,44
$H_2C_2O_4$	5,0018	1,2200	24,39

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan HCl menghasilkan perolehan Fe_2O_3 yang lebih tinggi (64,44%) dibandingkan dengan $H_2C_2O_4$ (24,39%) seperti tertera pada Tabel 1. Hal tersebut sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa penggunaan HCl menghasilkan ekstraksi Fe_2O_3 yang lebih tinggi dibandingkan asam organik lainnya (Yoon & Bae, 2018). Hal tersebut sesuai dengan sifat HCl sebagai asam kuat yang lebih efektif dalam melarutkan Fe_2O_3 dibandingkan $H_2C_2O_4$ yang merupakan asam organik lemah.

Mekanisme reaksi pelindian Fe_2O_3 dengan HCl berlangsung melalui reaksi berikut:

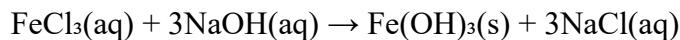


Sedangkan pelindian menggunakan $H_2C_2O_4$ berlangsung sebagai berikut:



Namun, kompleks $\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3$ yang terbentuk kurang stabil dalam kondisi asam dan dapat menghambat pemisahan Fe_2O_3 yang diinginkan, yang menjelaskan rendemen yang lebih rendah pada penggunaan $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ (Rosbiono, 2020).

Terbentuknya endapan ini mengonfirmasi keberadaan ion Fe^{3+} dalam produk hasil sintesis, yang menunjukkan bahwa Fe_2O_3 telah berhasil diperoleh melalui proses presipitasi dengan NaOH (Shen, Qiao, Guo, & Tan, 2013). Persamaan reaksi yang terjadi seperti berikut ini:



Proses presipitasi ini dilakukan pada kondisi $\text{pH} < 9$ berkisar pada $\text{pH} 5-8$ sehingga pada saat proses sintesis kondisi pH benar-benar dijaga tidak melebihi 8. Hal tersebut dikarenakan pada pH diatas 8 endapan Fe_2O_3 hasil sintesis yang telah terbentuk, dapat terlarut kembali membentuk $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$. Spesies tersebut sangat dominan muncul pada suasana alkali (Khoiroh, Mardiana, Sabarudin, & Ismuyanto, 2013). Selain itu, pada saat proses penyaringan filtrat yang dilakukan proses endapan sempurna dengan ditambahkan NaOH 4N. hal tersebut dilakukan untuk memastikan bahwa Fe_2O_3 telah sepenuhnya mengendap. Tujuan dari proses uji endapan sempurna ini ialah bahwa oksida besi telah sempurna terendapkan dan memaksimalkan rendemen. Jika masih terbentuk endapan maka penambahan basa terus dilakukan tetes demi tetes dan diulangi kembali tes endapan sempurna (Darmawan, Herawati, & Wibawa, Januari 2025).

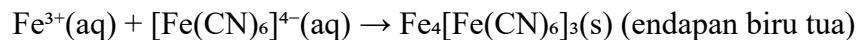
Endapan $\text{Fe}(\text{OH})_3$ yang terbentuk kemudian dikeringkan dan dikalsinasi pada suhu 100°C , menghasilkan Fe_2O_3 sesuai dengan reaksi:



Hasil ini menunjukkan bahwa metode yang digunakan berhasil mengisolasi Fe_2O_3 dari limbah karat besi dengan tingkat kemurnian yang baik. Efektivitas proses ini bergantung pada pemilihan pelindian yang optimal dan pengaturan pH selama presipitasi. Hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Shen, 2012 menyatakan bahwa selain pH , cara penambahan agen pengendap dan waktu reaksi ternyata sangat mempengaruhi hasil secara visual. Oksida besi yang diperoleh dari hasil ekstraksi menghasilkan warna kristal merah kecokelatan (Shen, Qiao, Guo, & Tan, 2013).

3.2 Karakterisasi Fe_2O_3

Hasil sintesis dianalisis secara kualitatif dengan pengujian yang sederhana yaitu menggunakan larutan kalium heksasianoferat(III) ($\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$). Pengujian ini memiliki akurasi yang tinggi karena kalium heksasianoferat(III) ($\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$) sangat sensitif terhadap Fe^{3+} . Pada saat direaksikan menghasilkan endapan biru tua (*Prussian Blue*) (Vogel, 1979). Reaksi yang terjadi sebagai berikut:



yang dihasilkan baik dari HCl maupun $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ memiliki keberhasilan yang sama. Yakni menghasilkan endapan biru tua (*Prussian Blue*). Hal tersebut menandakan bahwa pelindian Fe_2O_3 dari limbah karat besi efektif menggunakan kedua asam tersebut. Namun berdasarkan hasil rendemen, penggunaan HCl lebih efektif dalam mengekstraksi Fe_2O_3 dari karat besi dibuktikan dengan diperolehnya rendemen yang lebih tinggi sebesar 64,44% dibandingkan menggunakan asam oksalat ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$).

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa metode pelindian menggunakan HCl dan $H_2C_2O_4$ dengan metode presipitasi berhasil menghasilkan Fe_2O_3 dengan kemurnian yang tinggi. Penggunaan HCl menunjukkan efisiensi pelindian yang lebih baik dibandingkan $H_2C_2O_4$, dengan rendemen Fe_2O_3 sebesar 64,44% untuk HCl dan 24,39% untuk $H_2C_2O_4$. Proses presipitasi yang dilakukan pada pH 5-7 berhasil menghasilkan $Fe(OH)_3$ yang stabil sebelum dikeringkan menjadi Fe_2O_3 dengan kemurnian yang baik. Analisis kualitatif menggunakan kalium heksasianoferat(III), $K_4[Fe(CN)_6]$ mengonfirmasi keberadaan ion Fe^{3+} dalam produk akhir dari kedua jenis asam. hasil sintesis, yang menunjukkan bahwa Fe_2O_3 telah berhasil diekstraksi. Proses ini dapat menjadi alternatif yang efektif dalam pemanfaatan limbah karat besi sebagai sumber bahan baku Fe_2O_3 berkualitas tinggi, sekaligus mengurangi dampak pencemaran lingkungan.

Saran

Pada penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan karakterisasi lebih lanjut terhadap produk Fe_2O_3 hasil ekstraksi, diantaranya analisis struktur kristal, komposisi, dan morfologinya menggunakan teknik instrumental. Analisis struktur kristal menggunakan instrumen XRD. Untuk komposisi menggunakan XRD. Sedangkan untuk morfologi dari oksida besi menggunakan instrumen SEM. Selain itu, analisis mengenai optimalisasi parameter proses pelindian dan presipitasi juga dapat dilakukan guna meningkatkan proses serta kualitas produk akhir sehingga diperoleh hasil yang maksimal.

REFERENSI

- Antara, N. L. (2013). Pencegahan Akibat Terjadinya Karat Pada Pipa Boiler. *Jurnal Logic*, Vol. 3, No. 3.
- Darmawan, P., Herawati, D. A., & Wibawa, D. A. (Januari 2025). Penentuan Kadar Garam Halogenida pada Larutan Dua Garamnya dengan Metode Gravimetri. *Jurnal Kimia dan Rekayasa*, Volume 5 Nomor 2.
- Febrina, L., & Ayuna, A. (2015). Studi Penurunan Kadar Besi (Fe) dan Mangan (Mn) dalam Air Tanah Menggunakan Saringan Keramik. *Jurnal Teknologi*, Volume 7 No.1.
- Khalamudilah, F. A., Suhendar, D., & Supriadin, A. (2017). Sintesis dan Karakterisasi Pigmen Merah Besi(III) Oksida dari Serbuk Besi Limbah Bubut Logam. *Jurnal al-Kimiya*, 45-50.
- Kheloufi, A., Berbar, Y., Kefaifi, A., Medjahed, S. A., & Kerkar, F. (2011). Improvement of Impurities Removal from Silica Sand by Using a Leaching Process. *Chemical Engineering Transactions*, 1513-1537.
- Khoiroh, L. M., Mardiana, D., Sabarudin, A., & Ismuyanto, B. (2013). Synthesis of Hematit Pigments (α - Fe_2O_3) by Thermal Transformation of $FeOOH$. *Journal of Pure Applied Chemistry*, 27-34.
- Lopez, Y. F. (2023). *Elektrokimia: Korosi dan Pencegahannya*. Kupang: Politeknik Pertanian Negeri Kupang.
- Novia, F. A., Rukmananda, B. W., Juwairi, & Anugrah, R. P. (2021). Pra Rancangan Pabrik Pigmen Merah dengan Metode Presipitasi. *Journal of Fundamentals and Application of Chemical Engineering*, Vol. 02, No. 01.
- Prasetyo, A. B., Prasetyo, P., & Matahari, I. (2014). Pembuatan α - Fe_2O_3 dari Hasil Pengolahan Bijih Besi Primer Jenis Hematit untuk Bahan Baku Baterai Lithium. *Majalah Metalurgi*, 179-190.

- Priyambudi, I. Y., Amrullah, M. R., Poerwadi, B., & Oktavian, R. (2017). Aplikasi Katalis Heterogen Fe₂O₃-CaO pada Pembuatan Biodiesel dari Minyak Kelapa Sawit. *Jurnal Mahasiswa Teknik Kimia*, Vol. 2 No. 4.
- Publik, B. K. (2023, Juli 12). Retrieved from Fakultas Teknik Universitas Indonesia: https://eng.ui.ac.id/korosi-sebabkan-kerugian-ekonomi-dan-kesehatan-guru-besar-ftui-prof-rini-riastuti-telaah-upaya-pencegahannya/?utm_source=chatgpt.com
- Rame, Purwanto, A., & Budiarto, A. (2017). Pengolahan air limbah tekstil berbasis ozonisasi katalitik dengan katalis besi(III) oksida (Fe₂O₃) dan aluminium oksida (Al₂O₃) menggunakan difuser mikro. *Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri*, 67-75.
- Riskawati, Amir, R., & Muin, H. (2019). Efektivitas Arang Sekam Padi Dalam Menurunkan Kadar Besi (Fe) Pada Air Sumus Bor di Desa Padangloang Kabupaten Pinrang. *Jurnal Ilmiah Manusia dan Kesehatan*, Vol. 2, No. 1.
- Rosbiono, M. (2020). Terminologi-Karakteristik-Metode Pendektsian-Aplikasi, Klasifikasi, Tatanama dan Isomerisasi Senyawa Koordinasi. In *Kimia Koordinasi 3*. Universitas Terbuka.
- Saugi, W. (2021). Pengaruh Faktor Fisik, Kimia, dan Biologi Medium Terhadap Laju Korosi Besi. *Borneo Journal of Science and Mathematics Education*, Vol. 1 No.1.
- Setyo, S. B., Sulistyaningsih, T., Prasetya, A. T., & Kusumastuti, E. (2021). Iron Extraction from Coal Fly Ash Using HCl Solution. *Indonesian Journal of Chemical Science*.
- Shen, L., Qiao, Y., Guo, Y., & Tan, J. (2013). Preparation and Formation mechanism of nano-iron oxide black pigment from blast furnace flue dust. *Ceramics International*, 39, 737-744.
- Vogel, A. (1979). *Textbook Macro and Semimicro Qualitative Inorganic Analysis*. New York: Longman Inc.
- Yoon, S., & Bae, S. (2018). Novel synthesis of nanoscale zerovalent iron from coal fly ash and its application in oxidative degradation of methyl orange by Fenton reaction. *Journal of Hazardous Materials*.