

**PEMBUATAN NANO PARTIKEL MAGNETITE (Fe_3O_4) UNTUK
PENGOLAHAN LIMBAH PIGMEN TEKSTIL DENGAN METODE
ELEKTROFENTON**



Disusun oleh :

MOCHAMAD ADITYA WIBISANA 3335190052

MUHAMMAD RAJA NAJAHTAMA 3335190086

**JURUSAN TEKNIK KIMIA – FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA
CILEGON – BANTEN**

2023

LAPORAN PENELITIAN

PEMBUATAN NANO PARTIKEL MAGNETITE (Fe_3O_4) UNTUK PENGOLAHAN LIMBAH PIGMEN TEKSTIL DENGAN METODE ELEKTROFENTON

Diajukan Oleh:

Mochamad Aditya Wibisana 3335190052

Muhammad Raja Najahtama 3335190086

Telah disetujui oleh Dosen Pembimbing dan telah dipertahankan di hadapan Tim

Penguji

Dosen Pembimbing

Dr. Widya Ernavati K., S.Si., M. SiNIP.
197910132009122001

Dosen Penguji I

Dr. Javanudin, S.T., M.Eng.
NIP. 197808112005011003

Dosen Penguji II

Heravati, S.Si., M.Si
NIP. 201912022149

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Kimia

Dr. Javanudin, S.T., M.Eng.
NIP. 197808112005011003

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

NAMA : MUHAMMAD RAJA NAJAHTAMA

NIM : 3335190086

JURUSAN : TEKNIK KIMIA

JUDUL : PEMBUATAN NANO PARTIKEL MAGNETITE
(Fe₃O₄) UNTUK PENGOLAHAN LIMBAH PIGMEN
TEKSTIL DENGAN METODE ELEKTROFENTON

Bersedia

Dengan ini menyatakan bahwa penelitian dengan judul tersebut di atas adalah benar karya saya sendiri dengan arahan dari pembimbing dan tidak ada duplikasi dengan karya orang lain kecuali yang telah disebutkan sumbernya.

Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam penelitian ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan perundang-undangan yang berlaku.

Cilegon, 27 Mei 2024



Muhammad Raja Najahtama

ABSTRAK**PEMBUATAN NANO PARTIKEL MAGNETITE (Fe₃O₄) UNTUK
PENGOLAHAN LIMBAH PIGMEN TEKSTIL DENGAN METODE
ELEKTROFENTON**

Oleh:

Mochamad Aditya Wibisana 3335190052

Muhammad Raja Najahtama 3335190086

Electro-Fenton technology holds promising potential as an alternative technology for efficient and effective wastewater treatment. Electro-Fenton utilizes the principle of electrochemistry involving cathodic reduction. In this research, the treatment of textile pigment wastewater will employ the Electro-Fenton technique. The catalyst used in this study is magnetite nanoparticles (Fe₃O₄). Magnetite nanoparticles are synthesized through the electrodeposition process, where the cathode is carbon felt in a solution of iron (II) sulfate (FeSO₄) and iron (III) nitrate Fe(NO₃)₃ with variations in current, electrode position, and time. This study has two objectives: to synthesize Fe₃O₄ (magnetite) nanoparticles using the electrodeposition method and to use magnetite nanoparticle catalysts in the Electro-Fenton process for textile pigment wastewater and determine the efficiency of wastewater treatment. The results obtained from the synthesis of Fe₃O₄ nanoparticles using the electrodeposition method showed that the mass deposit of Fe₃O₄ consisted of nanoparticles, with a particle size distribution of 27% of the sample measurements having a particle diameter size of < 100 nm, and the remaining 73% having a size distribution between 107.4 nm and 201.3 nm. In the degradation of Methyl Orange solution using Electro-Fenton catalyzed by Fe₃O₄, the highest efficiency and effectiveness were achieved with carbon felt electrodeposited at a current of 0.3 A for 30 minutes, resulting in a 74.8946% degradation of the MO textile pigment wastewater solution.

Keywords: textile pigment wastewater, electrodeposition, Electro-Fenton, magnetite nanoparticles.

ABSTRAK**PEMBUATAN NANO PARTIKEL MAGNETITE (Fe₃O₄) UNTUK
PENGOLAHAN LIMBAH PIGMEN TEKSTIL DENGAN METODE
ELEKTROFENTON**

Oleh:

Mochamad Aditya Wibisana 3335190052

Muhammad Raja Najahtama 3335190086

Teknologi elektrofenton memiliki peluang yang menjanjikan sebagai teknologi alternatif dalam pengolahan limbah yang efektif dan efisien. Elektrofenton menggunakan prinsip elektrokimia yang melibatkan reduksi katodik, dalam penelitian ini, pengolahan limbah pigmen tekstil akan menggunakan teknik elektrofenton. Katalis yang digunakan dalam penelitian ini adalah nanopartikel magnetit (Fe₃O₄). Nanopartikel magnetit disintesis melalui proses electrodeposition dimana katoda berupa karbon felt dalam larutan prekursor besi (II) sulfat (FeSO₄) dan besi (III) nitrat Fe(NO₃)₃ dengan variasi arus, variasi posisi elektroda, dan variasi waktu. Pada penelitian ini terdapat 2 tujuan yaitu mensintesis nanopartikel Fe₃O₄ (magnetit) dengan metode electrodeposisi dan menggunakan katalis nanopartikel magnetit dalam proses elektro-fenton terhadap limbah pigmen tekstil beserta mengetahui efisiensi pengolahan limbah. Hasil yang didapat pada sintesis nanopartikel Fe₃O₄ diketahui dengan menggunakan metode electrodeposisi, deposit massa Fe₃O₄ merupakan nanopartikel, dimana distribusi ukuran partikel yang didapat adalah 27% dari sampel pengukuran diameter partikel, memiliki ukuran < 100 nm, dan 73% lainnya memiliki tebaran ukuran antara 107,4 nm – 201,3 nm, dan pada penguraian atau degradasi warna larutan Methyl Orange dengan elektrofenton berkatalis Fe₃O₄ didapatkan nilai efisiensi dan efektivitas tertinggi dengan karbon felt yang telah dielektrodeposisi dengan arus 0,3 A selama 30 menit yaitu sebesar 74.8946% penguraian larutan limbah pigmen tekstil MO.

Kata kunci: limbah pigmen tekstil, electrodeposition, elektrofenton, nanopartikel magnetit.

KATA PENGANTAR

Puji syukur Kami panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa yang telah melimpahkan karunia beserta rahmat-Nya, sehingga dapat menyelesaikan proposal penelitian dengan judul “Pembuatan Nanopartikel Magnetit (Fe_3O_4) untuk Pengolahan Limbah Pigmen Tekstil dengan Metode Elektrofenton”.

Penyusunan proposal penelitian ini merupakan bagian dari salah satu syarat yang harus dipenuhi oleh mahasiswa Program Studi Teknik Kimia Universitas Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Kami selaku penyusun menyadari bahwa, tanpa adanya bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari semasa awal perkuliahan hingga pada penyusunan proposal penelitian ini akan sangatlah sulit bagi kami untuk menyusun dan menyelesaikan proposal penelitian ini. Oleh karena itu, kami mengucapkan terima kasih kepada:

- 1, Allah SWT, karena-Nya kami dimudahkan segala urusan untuk menyelesaikan proposal penelitian ini.
- 2, Orang tua yang tak henti-hentinya selalu mendoakan dan memotivasi untuk senantiasa bersemangat dan tak mengenal kata putus asa. Terima kasih atas segala dukungannya, baik secara material maupun spiritual hingga terselesaikannya proposal ini.
- 3, Sosok Orang tua yang senantiasa selalu mendoakan dan memotivasi kami untuk selalu berusaha, bersemangat dan berjuang tak mengenal kata putus asa.
- 4, Ibu Dr. Widya Ernayati K., S.Si., M.Si. selaku Dosen Pembimbing Penelitian kami yang telah memberikan waktu, tenaga, dan pikiran untuk membimbing dan mengarahkan kami dengan sebaik mungkin hingga Proposal Penelitian ini dapat terselesaikan.
- 5, Seluruh Dosen Program Studi Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
- 6, Teman-teman Teknik Kimia, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, angkatan 2019 yang telah banyak membantu kami dalam menyusun proposal penelitian hingga dapat terselesaikan.

7, Seluruh pihak yang telah memberikan dukungan sehingga terselesaikannya proposal ini.

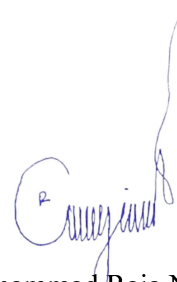
Kami menyadari adanya keterbatasan di dalam penyusunan proposal penelitian ini. Besar harapan kami selaku penyusun akan saran dan kritik yang bersifat membangun dari seluruh pihak yang berkenan. Terakhir besar harapan Kami agar proposal ini dapat bermanfaat.

Cilegon, 12 Januari 2023.

Penulis,



Mochamad Aditya Wibisana.
NPM. 3335190052



Muhammad Raja Najahtama
NPM. 3335190086

DAFTAR ISI

	halaman
ABSTRAK.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR TABEL.....	ix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Ruang lingkup.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Limbah.....	5
2.1.1 Limbah Industri.....	6
2.2 <i>Magnetite</i> (Fe_3O_4).....	6
2.3 Nano Partikel.....	7
2.3.1 Aplikasi Nano Partikel.....	8
2.4 Elektrokimia.....	9
2.5 Sel Elektrolisis.....	10
2.6 Reaksi Reduksi-Oksidasi (Redoks).....	11
2.7 Elektrodeposisi.....	13
2.8 Reaksi Fenton.....	14
BAB III METODOLOGI PERCOBAAN	
3.1 Tahapan Penelitian.....	18
3.1.1 Preparasi Bahan Pendukung.....	18
3.1.2 Elektrodeposisi Nanopartikel Fe_3O_4	19
3.1.3 Proses Elektrofenton.....	21
3.2 Prosedur Penelitian.....	23
3.2.1 Preparasi Bahan Pendukung.....	23
3.2.2 Elektrodeposisi nanopartikel Fe_3O_4	23

3.2.3 Proses Elektro-Fenton Dengan Nanopartikel Fe_3O_4	24
3.2.4 Karakterisasi.....	24
3.3.1 Bahan.....	25
3.3.2 Alat.....	25
3.3.3 Gambar alat.....	25
3.4 Variabel Percobaan.....	26
3.5 Metode pengumpulan data dan Analisa data.....	27
3.5.1 Penentuan Massa Teoritis Nanopartikel Fe_3O_4 yang Terdeposit pada Permukaan Karbon Felt.....	27
3.5.2 .Penentuan Efisiensi Arus.....	27
3.5.3 Efisiensi Elektrofenton / Degradasi Limbah Pigmen.....	28
BAB IV PEMBAHASAN	
4.1 Proses Elektodeposisi Nanopartikel.....	29
4.1.1 Pengaruh Arus Terhadap Massa Magnetit (Besi Oksida) Terdeposisi	29
4.1.2 Pengaruh Posisi Terhadap Massa Magnetit (Besi Oksida) Terdeposisi	33
4.2 Proses Elektrofenton	36
4.2.1 Pengaruh Arus Terhadap Efisiensi Elektrofenton.....	37
4.2.2 Pengaruh Posisi Terhadap Efisiensi Elektrofenton.....	38
4.2.3 Pengaruh waktu Terhadap Efisiensi Elektrofenton.....	40
4.3 Analisa Morfologi.....	42
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan.....	44
5.2 Saran.....	44
DAFTAR PUSTAKA.....	45
LAMPIRAN.....	50

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Skema teknik deposisi elektrokimia.....	14
Gambar 2.2 Presentase pembuangan COD setelah 75 menit treatment 200ml larutan pembuangan ($COD_0=500\text{mg/L}$) dengan metode AO, Fenton dan Fered-Fenton (Brillas, 2009).....	17
Gambar 3.1 Preparasi Bahan Pendukung.....	18
Gambar 3.2 Pembuatan Larutan Prekursor.....	19
Gambar 3.3 Proses Elektrodeposisi.....	20
Gambar 3.4 Pembuatan Larutan Sampel Limbah Dari Methyl Orange Dan Na_2SO_4	21
Gambar 3. 5 Proses Elektrofenton.....	22
Gambar 3.6 Karaterisasi SEM (Scanning Electron Microscope).....	22
Gambar 3.7 Skema Alat Sintesis Nanopartikel Magnetit.....	25
Gambar 3.8 Skema Alat Aplikasi Nanopartikel Pada Penguraian Limbah Pigmen Tekstil, Dengan Metode Elektro Fenton.....	26
Gambar 4.1 Grafik Pengaruh Arus Elektrodeposisi Karbon felt terhadap Massa Terdeposisi.....	30
Gambar 4.2 Grafik Pengaruh Posisi Elektrodeposisi Karbon felt terhadap Massa Terdeposisi.....	33
Gambar 4.3 Grafik Pengaruh Waktu Elektrodeposisi Karbon felt terhadap Massa Terdeposisi.....	34
Gambar 4.4 Pengaruh Arus Elektrodeposisi Karbon felt terhadap Efisiensi Degradasi Warna.....	37
Gambar 4.5 Pengaruh Posisi Elektroda pada Elektrodeposisi Karbon felt terhadap Efisiensi Degradasi Warna.....	38
Gambar 4.6 Pengaruh Arus Elektrodeposisi Karbon felt terhadap Efisiensi Degradasi Warna.....	40
Gambar 4.7 Hasil Gambar Uji SEM (Scanning Electron Microscope) Magnetit Fe_3O_4 Terdeposisi (a) Perbesaran 10.000 X (b) Perbesaran 20.000 X (c) Perbesaran 30.000 X.....	42

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan Ukuran Partikel.....	8
Tabel 2.2 Pengertian Reaksi Reduksi Oksidasi.....	12
Tabel 4.1 Perbandingan Pengaruh Arus Antara Logam Yang Terdeposisi Dalam Segi Praktik dan Teori.....	31
Tabel 4.2 Perbandingan Pengaruh Arus Antara Logam Yang Terdeposisi Dalam Segi Praktik dan Teori.....	33

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Limbah merupakan masalah dari setiap industri, dimana limbah bila tidak diproses atau ditangani sebelum dibuang dapat menyebabkan dampak yang sangat berbahaya terhadap lingkungan. Dengan dampak yang beragam juga tergantung jenis-jenis limbah yang berpaparan dengan ruang lingkungannya. Salah satu jenis limbah tersebut adalah Limbah B3 atau Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun.

Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun atau sering disingkat dengan B3 adalah zat, energi, dan/atau komponen lain yang karena sifat, konsentrasi dan/atau jumlahnya baik secara langsung maupun tidak langsung dapat mencemarkan dan/atau merusak lingkungan hidup, membahayakan lingkungan hidup, kesehatan serta kelangsungan hidup manusia dan makhluk hidup lain. Definisi ini tercantum dalam Undang – Undang RI Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup dan peraturan – peraturan lain di bawahnya.

Jenis – jenis Bahan Berbahaya dan Beracun diatur dalam Peraturan Pemerintah Nomor 74 Tahun 2001 tentang Pengelolaan Bahan Berbahaya dan Beracun. Peraturan ini selain mengatur tata laksana pengelolaan B3, juga mengklasifikasikan B3 dalam tiga kategori yaitu B3 yang dapat dipergunakan, B3 yang dilarang dipergunakan dan B3 yang terbatas dipergunakan. Beberapa jenis B3 yang mudah dikenali dan boleh dipergunakan antara lain adalah bahan – bahan kimia seperti amonia, asam asetat, asam sulfat, asam klorida, asetilena, formalin, metanol, natrium hidroksida, termasuk juga gas nitrogen. Lebih lengkapnya daftar B3 yang boleh dipergunakan dapat dilihat pada Lampiran 1 Peraturan Pemerintah No. 74 Tahun 2001. Sedangkan B3 yang dilarang dipergunakan antara lain adalah *aldrin, chlordane, ddt, dieldrin, endrin, heptachlor, mirex, toxaphene, hexachlorobenzene dan PCBS*. Daftar tersebut dapat dilihat pada Lampiran 2. Sedangkan Lampiran 3 berisi daftar B3 yang dipergunakan secara terbatas, antarlain Merkuri, Senyawa merkuri, *lindane, parathion*, dan beberapa jenis CFC.

(*Mengenal Limbah B3 | Dinas Lingkungan Hidup, n.d.*)

Berdasarkan sifatnya, B3 dapat diklasifikasikan menjadi B3 yang mudah meledak, pengoksidasi, sangat mudah sekali menyala, beracun, berbahaya, korosif, bersifat iritasi, berbahaya bagi lingkungan dan karsinogenik (*Mengenal B3 Dan Limbah B3 | Dinas Lingkungan Hidup Dan Kehutanan DIY, n.d., p. 3*).

Salah satu contoh limbah yang sangat berbahaya bagi lingkungan jika tidak diproses atau dimanfaatkan adalah limbah kimia seperti senyawa yang telah disebutkan diatas, dimana limbah kimia ini dapat merusak keseimbangan lingkungan tempat limbah dibuang maupun meracuni makhluk hidup disekitarnya. Contoh dari limbah kimia yang banyak dijumpai adalah limbah cair asam dan basa, limbah ini dapat ditemukan dari skala kecil seperti lab sampai industri besar, oleh karena itu salah satu proses pemanfaatan dari limbah ini dapat dilakukan elektrolisis sehingga didapat hidrogen dan *by-product* nya (Chaurasia and Mondal, 2021).

Salah satu contoh pencemaran lingkungan oleh limbah industri adalah limbah pigmen tekstil, pigmen sendiri dasarnya adalah zat pemberi atau pembawa warna yang akan memberikan warna tertentu bila zat ini ditambahkan atau diberikan, pigmen bukan merupakan zat terlarut melainkan partikel padatan yang sangat kecil yang kemudian dicampurkan dengan cairan. Pigmen dapat berupa zat organik (mengandung karbon) maupun anorganik, umumnya pigmen sintesis akan jauh lebih terang dan tahan lama dibandingkan pigmen organik. Komponen penyusun pigmen anorganik atau sintesis memiliki berbagai variasi salah satu contohnya adalah penggunaan oksida besi sebagai bahan dasar dari pigmen dengan warna *Ochres* seperti kuning kecoklatan, dan oranye kecoklatan (*Pigment | Chemistry | Britannica, n.d.*).

Limbah pigmen ini terutama dari industri tekstil memiliki dampak yang buruk, jika dibuang ke badan air maka dapat menyebabkan penurunan kualitas estetik badan air, meningkatkan kadar biokimia, dan peningkatan nilai COD dan BOD, menghalangi kemampuan fotosintesis makhluk hidup pada badan air (Lellis et al., 2019).

Treatment umum yang digunakan dalam menanggulangi limbah pigmen ini adalah dengan menggunakan filter pada buangan air limbah, dan juga

pengkoagulasian limbah pigmen pada suatu tangki, namun dalam percobaan kali ini kami terdorong untuk melakukan treatment dengan teknologi elektrofenton.

Teknologi elektrofenton memiliki peluang yang menjanjikan sebagai teknologi alternatif dalam pengolahan limbah yang efektif dan efisien. Elektrofenton menggunakan prinsip elektrokimia yang melibatkan reduksi katodik. Reduksi pada katoda adalah reduksi oksigen dari udara untuk menghasilkan hidrogen peroksida yang selanjutnya terurai menjadi radikal hidroksida dengan katalis fenton (Fe^{2+}). Radikal hidroksida merupakan oksidator sangat kuat yang dapat mendegradasi berbagai senyawa organik bahkan senyawa organik persisten yang tidak dapat diurai oleh mikroorganisme. Keunggulan utama teknologi elektrofenton adalah proses mineralisasi senyawa organik menjadi karbon dioksida dan air tanpa menyisakan lumpur/*sludge*. Hal ini akan memberikan kontribusi pada pengurangan biaya dalam penanganan *sludge* (Da Pozzo et al. 2005). Proses elektrofenton melibatkan sedikit pereaksi dan energi yang cukup rendah. Oleh karena itu, teknologi elektrofenton memenuhi kriteria sebagai *green process* (Rajendran et al. 2016).

Proses elektrofenton memerlukan material aktif sebagai katalis untuk reduksi oksigen menjadi hidrogen peroksida dan pemecahan hidrogen peroksida menjadi radikal hidroksil untuk degradasi limbah organik. Material yang sangat berpotensi sebagai katalis dalam elektrofenton adalah material magnetit (Fe_3O_4). Magnetit (Fe_3O_4) merupakan mineral besi oksida yang memiliki sifat kemagnetan, kelistrikan, dan katalisis yang khas.

Sintesis nanopartikel magnetit (Fe_3O_4) atau disebut pula sebagai nanopartikel magnetic menggunakan metode elektrodeposisi/*electroplating* pada permukaan karbon felt, Selanjutnya, karbon felt termodifikasi nanopartikel magnetite nanopartikel tersebut akan Digunakan sebagai elektroda dalam proses elektrofenton untuk mendegradasi limbah pigmen menjadi karbon dioksida dan air tanpa menyisakan *sludge*.

Oleh karena itu kami terdorong untuk melakukan penelitian pemanfaatan limbah untuk dilakukan treatment nanopartikel yang disintesis dengan elektrolisis, terhadap limbah sehingga limbah yang dibuang tersebut aman bagi lingkungan dan makhluk hidup, dan juga didapat hasil limbah dengan post-treatment yang minim

karena zat organik dalam limbah terurai dengan sempurna.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah mengetahui bagaimana metode dan cara mensintesis nanopartikel Fe_3O_4 (magnetit), bagaimana penggunaan katalis magnetit nanopartikel dalam reaksi elektrofenton terhadap limbah pigmen tekstil, dan mengetahui bagaimana efektivitas metode pengolahan limbah pigmen tekstil dengan reaksi elektrofenton.

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dilakukannya penelitian ini, yaitu:

1. Mensintesis nanopartikel Fe_3O_4 (magnetit) dengan metode elektrodposisi.
2. Menggunakan katalis nanopartikel magnetit dalam proses elektro-fenton terhadap limbah pigmen tekstil dan mengetahui efisiensi pengolahan limbah.

1.4 Ruang lingkup

Penelitian ini menggunakan sampel limbah pigmen tekstil sintetis yang terdapat pada Laboratorium Kimia Dasar Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Proses pengolahan limbah pigmen tekstil ini dilakukan di Laboratorium Kimia Dasar dan Analisis Terpadu, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Banten.

DAFTAR PUSTAKA

- 23.9: Electrolysis of Water. (2016, June 27). Chemistry LibreTexts. [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Introductory_Chemistry/Introductory_Chemistry_\(CK-12\)/23%3A_Electrochemistry/23.09%3A_Electrolysis_of_Water](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Introductory_Chemistry/Introductory_Chemistry_(CK-12)/23%3A_Electrochemistry/23.09%3A_Electrolysis_of_Water)
- Abdurrahman, U., 2006. Kinerja Sistem Lumpur Aktif pada Pengolahan Limbah Cair. Surabaya.
- Al-Bat'hi, S. A. M., 2015. *Electrodeposition of Nanostructure Materials. In Electroplating of Nanostructures.* IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/61389>
- Astutik T.P., Fariati, Herunata,. 2017. "Identifikasi Konsep Sukar dan Kesalahan Konsep Reaksi Redoks". (Malang: Jurnal Zarah Universitas Negeri Malang, 2017), hlm. 23.
- Bockris, J. O., & Oldfield, L. F., 1955. The oxidation-reduction reactions of hydrogen peroxide at inert metal electrodes and mercury cathodes. *Transactions of the Faraday Society*, 51(0), 249–259. <https://doi.org/10.1039/TF9555100249>
- Brillas, E., Sires, I., Oturan, M.A., 2009. Electro-Fenton process and related electrochemical technologies based on Fenton's reaction chemistry. *Chem.*
- Cabrera, L., Gutierrez, S., Menendez, N., Morales, M. P., & Herrasti, P. 2008. Magnetite nanoparticles: Electrochemical synthesis and characterization. *Electrochimica Acta*, 53(8), 3436–3441. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2007.12.006Rev.109,6570e6631>.
- Chaurasia, Amit & Mondal, Prasenjit., 2021. Hydrogen Production From Waste

and Renewable Resources. 10.4018/978-1-7998-4945-2.ch002.

Chen, J.X., Zhu, L.Z., 2006. Catalytic degradation of Orange II by UV-Fenton with hydroxyl-Fe-pillared bentonite in water. *Chemosphere* 65, 1249e1255.

CHM 112 finding reduction potential of Fe³⁺ to Fe²⁺ in base. (n.d.). Retrieved January 18, 2023, from https://www.chm.uri.edu/weuler/chm112/lectures/iron_reduction_base.htm

Da Pozzo, A., Merli, C., Sirés, I. et al. 2005. Removal of the herbicide amitrole from water by anodic oxidation and electro-Fenton. *Environ Chem Lett* 3, 7–11. <https://doi.org/10.1007/s10311-005-0104-0>

Dobson, J., *Gene therapy progress and prospects: magnetic nanoparticle-based gene delivery*. *Gene therapy*, 2006. 13(4): p. 283.

Dyes and Pigments | Land Disposal Restrictions | Wastes | US EPA. (n.d.). Retrieved January 6, 2022, from <https://archive.epa.gov/epawaste/hazard/web/html/dyes.html>

European Commission of HEALTH & CONSUMER PROTECTION DIRECTORATE-GENERAL, 2010. *Nanomaterials: 3. What are the key criteria for defining nanomaterials?* (n.d.). Retrieved January 4, 2023, from https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/opinions_layman/nanomaterials2012/en/1-2/3.htm#1

Fenton, H.J.H., 1894. LXXIII. oxidation of tartaric acid in presence of iron. *J. Chem. Soc. Trans.* 65, 899e911.

Frarid, R dkk. 2012. “Perancangan dan Pembuatan Alat Pemproduksi Gas Brown dengan Metode Elektrolisis Berskala Laboratorium” *Jurnal Teknik Pomits* Vol. 1, No.1, (2012) 1-4, diakses tanggal 2 April 2014

- Guangwei S., Lixuan M., and Wensheng S., 2009. Electrodeposition of one-dimensional nanostructures, *Recent Patents Nanotechnol*, 3, 182-191.
- Harahap, M. R. (2016). Sel Elektrokimia: Karakteristik dan Aplikasi. *CIRCUIT: Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik Elektro*, 2(1).
- Haber, F., Weiss, J., 1934. The catalytic decomposition of hydrogen peroxide by iron salts. *Proc. Royal Soc. Lond. Ser. A* 147, 332e351
- Haw, C., et al. 2010., Hydrothermal synthesis of magnetite nanoparticles as MRI contrastagents. *Ceramics International*, 36(4): p. 1417-1422.
- Khan, I., Saeed, K., & Khan, I. (2019). Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(7), 908–931.
<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.05.011>
- Lakshmanan, R., 2013. Application of magnetic nanoparticles and reactive filter materialsfor wastewater treatment. KTH Royal Institute of Technology.
- Lellis, B., Fávaro-Polonio, C. Z., Pamphile, J. A., & Polonio, J. C. (2019). *Effects of textiledyes on health and the environment and bioremediation potential of living organisms. Biotechnology Research and Innovation*, 3(2), 275–290.
<https://doi.org/10.1016/j.biori.2019.09.001>
- Mancy, K. H., Okun, D. A., & Reilley, C. N. (1962). A galvanic cell oxygen analyzer. *Journal of Electroanalytical Chemistry* (1959), 4(2), 65-92.
- Mengenal B3 dan Limbah B3 | Dinas Lingkungan Hidup dan Kehutanan DIY. (n.d.). Retrieved September 17, 2021, from <https://dlhk.jogjaprovo.go.id/mengenal-b3-dan-limbah-b3>
- Mengenal Limbah B3 | Dinas Lingkungan Hidup. (n.d.). Retrieved January 6, 2022, from <https://dlh.karanganyarkab.go.id/2014/02/24/mengenal-limbah-b3/>

- Ni, M. (2010). Modeling of a solid oxide electrolysis cell for carbon dioxide electrolysis. *Chemical Engineering Journal*, 164(1), 246-254.
- Pigment | chemistry | Britannica. (n.d.). Retrieved January 6, 2022, from <https://www.britannica.com/technology/pigment>.
- Rieger, P. H. (1993). *Electrochemistry*. Springer Science & Business Media.
- Nanoparticle | Definition, Size Range, & Applications | Britannica. (n.d.). Retrieved November 30, 2021, from <https://www.britannica.com/science/nanoparticle>
- Pigment | chemistry | Britannica. (n.d.). Retrieved January 6, 2022, from <https://www.britannica.com/technology/pigment/>
- Pignatello, J.J., Oliveros, E., MacKay, A., 2006. *Advanced oxidation processes for organiccontaminant destruction based on the Fenton reaction and related chemistry*. Crit. Rev. Environ. Sci. Technol. 36, 1e84.
- Pozzo, Anna Da, Paola Ferrantelli, Carlo Merli, and Elisabetta Petrucci. 2005. "Oxidation Efficiency in the Electro-Fenton Process." *Journal of Applied Electrochemistry* 35 (4): 391–98. <https://doi.org/10.1007/s10800-005-0801-1>.
- Rajendran, S, R J Rathish, S S Prabha, and A Anandan. 2016. "Green Electrochemistry - A Versatile Tool in Green Synthesis: An Overview." *Portugaliae Electrochimica Acta* 34 (5): 321–42. <https://doi.org/10.4152/pea.201605321>
- Simamora, P., Manullang, M., Munthe, J., & Rajagukguk, J. (2018). The Structural and Morphology Properties of Fe₃O₄/Ppy Nanocomposite. *Journal of Physics: Conference Series*, 1120, 012063. <https://doi.org/10.1088/1742->

6596/1120/1/012063

- Thiesen, B. and A. Jordan, Clinical applications of magnetic nanoparticles for hyperthermia. *International journal of hyperthermia*, 2008. 24(6): p. 467-474.
- Waluyo, L. 2010. *Teknik dan Metode Dasar dalam Mikrobiologi*. UMM Press
- Wang, J.L., Bai, Z.Y., 2017. Fe-based catalysts for heterogeneous catalytic ozonation of emerging contaminants in water and wastewater. *Chem. Eng. J.* 312, 79e98
- Wang, J.L., Zhuang, S., 2017. Removal of various pollutants from water and wastewater by modified chitosan adsorbents. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 47, 2331e2386.
- Wang, J.L., Zhuang, S., 2019. Covalent organic frameworks (COFs) for environmental applications. *Coord. Chem. Rev.* 400, 213046.
- Wang, J.L., Xu, L.J., 2012. Advanced oxidation processes for wastewater treatment: formation of hydroxyl radical and application. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 42, 251e325.
- Zheng, Y.F., Gu, X.N., Witte, F., 2014. Biodegradable metals. *Mater. Sci. Eng. R* 77, 1e34.