



Efektivitas Proses Fenton Katalitik Berbasis Fe_3O_4 dalam Degradasi Zat Warna Sintetik pada Limbah Batik

Inaeya Putri Ramadhani, Naora Muthia Aisyah Rahman, Aziqoh Putri Al Zahra, Adelia Agustina

Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Negeri Islam Sunan Kalijaga Yogyakarta, 55281
Email: 23106030071@student.uin-suka.ac.id

Abstrak. Industri batik menghasilkan limbah cair yang mengandung zat warna sintetis kompleks seperti naphthol, remazol, dan indigosol, yang sulit terurai secara alami. Proses fenton katalitik berbasis Fe_3O_4 menawarkan solusi efektif dengan menghasilkan radikal hidroksil ($\bullet OH$) sebagai oksidator kuat. Fe_3O_4 sebagai katalis heterogen bersifat magnetik, mudah dipisahkan, dan dapat digunakan ulang. Kajian ini menganalisis efektivitas degradasi zat warna berdasarkan parameter pH, konsentrasi H_2O_2 , waktu reaksi, dan dosis katalis. Hasil studi menunjukkan kondisi optimal berada pada pH asam dan waktu retensi sekitar 4 jam. Kombinasi metode seperti foto-fenton, ozonasi, dan fitoremediasi juga meningkatkan efisiensi. Metode ini dinilai ramah lingkungan dan potensial diterapkan pada industri batik skala kecil hingga menengah.

Kata kunci: fenton katalitik, Fe_3O_4 , katalis, limbah batik, zat warna sintetis.

Abstract. The batik industry produces liquid waste containing complex synthetic dyes such as naphthol, remazol, and indigosol, which are difficult to decompose naturally. The Fe_3O_4 -based catalytic fenton process offers an effective solution by producing hydroxyl radicals ($\bullet OH$) as strong oxidants. Fe_3O_4 as a heterogeneous catalyst is magnetic, easy to separate, and can be reused. This study analyzed the effectiveness of dye degradation based on pH parameters, H_2O_2 concentration, reaction time, and catalyst dosage. The results of the study showed that the optimal conditions were at acidic pH and a retention time of around 4 hours. A combination of methods such as photo-fenton, ozonation, and phytoremediation also increased efficiency. This method is considered environmentally friendly and has the potential to be applied to small to medium-scale batik industries

Keywords: Fenton catalyst, Fe_3O_4 , catalyst, batik waste, synthetic dye.

This publication is licensed under a



Pendahuluan

Seiring dengan perkembangan teknologi, pabrik industri juga ikut berkembang pesat. Tidak terkecuali industri batik yang semakin populer dan merupakan salah satu sektor unggul yang menjadi ciri khas di Indonesia. Disamping itu, semakin banyaknya industri yang berkembang maka semakin banyak pula limbah yang dihasilkan. Industri batik merupakan warisan seni budaya Indonesia yang telah dilestarikan secara turun-temurun. Dalam aktivitas produksinya, tahap pewarnaan menjadi proses yang paling krusial dan tidak dapat dihindari dalam proses pembuatannya.

Proses pewarnaan ini menggunakan zat warna tekstil dimana berpotensi menghasilkan limbah cair, yang jika tidak diolah terlebih dahulu akan dapat mencemari lingkungan (Apriyani, 2018). Industri batik di Indonesia menempati skala besar produksinya karena kebutuhan konsumen, perlakuan tersebut dapat menghasilkan limbah cair dengan kandungan zat warna sintetis yang sangat tinggi. Limbah ini bersifat toksik dan sulit terdegradasi secara biologi atau alamiah, yang dapat menyebabkan mencemari lingkungan perairan jika tidak diolah dengan baik (Andriani *et al.*, 2025). Zat warna yang digunakan dalam pembuatan batik yaitu naphthol, remazol, dan indigosol, yang memiliki struktur aromatik yang kompleks dan menyebabkan tingginya kadar Chemical Oxygen Demand (COD) serta warna pada limbah (kharisma, 2021). Pencemaran yang disebabkan oleh limbah batik ini dapat menurunkan kualitas air dan membahayakan organisme perairan dan berdampak buruk bagi kesehatan manusia. (Seni, 2011).

Berbagai metode telah dilakukan dan dikembangkan dalam upaya untuk mengatasi masalah limbah industri batik, baik secara fisika, kimia, dan biologi seperti metode dengan menggunakan lumpur aktif, adsorpsi dan absorpsi, oksidasi lanjutan, elektrodegradasi, fotodegradasi, elektrokoagulasi, dan phytotreatment (Apriyani, 2018). Metode alternatif yang menjanjikan salah satunya metode oksidasi lanjutan, khususnya proses penggunaan fenton yang mampu menghasilkan radikal hidroksil ($\bullet OH$) sebagai oksidator kuat untuk menguraikan senyawa organik kompleks (Oturani & Aaron, 2014). Meskipun demikian, proses fenton homogen menyebabkan terjadinya pembentukan lumpur besi, sehingga akan sulit memisahkan katalis dari limbahnya (Ganiyu *et al.*, 2018). Untuk mengatasi hal tersebut, beberapa penelitian telah mengembangkan metode ini menggunakan fenton heterogen menggunakan katalis padat, seperti Fe_3O_4 yang bersifat magnetik, sehingga dapat dipisahkan dengan mudah dari larutan reaksi, agar lebih ramah lingkungan dan ekonomis (Komariah *et al.*, 2022).

Katalis Fe_3O_4 merupakan agen utama yang digunakan dalam sistem fenton heterogen untuk mendekomposisi H_2O_2 menjadi radikal hidroksil ($\bullet OH$), dimana sangat reaktif dalam mengoksidasi senyawa organik kompleks seperti zat warna sintesis dalam limbah batik (Zhang *et al.*, 2020). Sebagai katalis heterogen, Fe_3O_4 dapat meminimalkan pembentukan lumpur karena tidak larut dalam air dan dapat dengan mudah dipisahkan secara magnetik dari campuran reaksi (Nguyen *et al.*, 2023). Selain itu, Fe_3O_4 menunjukkan potensi reusabilitas yang baik, sehingga dapat digunakan kembali dalam beberapa siklus (Liu *et al.*,

2023). Proses fenton melibatkan reaksi antara ion Fe^{2+} dan H_2O_2 untuk menghasilkan radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$), yaitu zat oksidator kuat yang mampu mendegradasi senyawa organik berbahaya. Reaksi ini berlangsung optimal pada kondisi asam dan dapat mengubah polutan menjadi air (H_2O) dan karbon dioksida (CO_2). Selain itu, terdapat siklus regenerasi antara ion Fe^{2+} dan Fe^+ yang menjaga keberlanjutan proses. Meskipun efektif, reaksi ini kompleks karena juga menghasilkan radikal lain yang kurang efektif seperti HO_2 (Rahmat & Agung, 2018).

Hasil penelitian terdahulu oleh Dewi dan Wardiyati (2016) menyatakan bahwa penggunaan katalis heterogen $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ pada metode foto-fenton mampu meningkatkan efektivitas degradasi limbah warna merah dari industri batik secara signifikan, dengan efektivitas degradasi mencapai 94,5% pada kondisi optimum pH 5 – 7, waktu iradiasi 150 menit, dan dosis katalis 50 mg/50 mL. Efektivitas ini lebih tinggi dibandingkan dengan penggunaan katalis Fe_3O_4 saja yang hanya mencapai 78%. Peningkatan kinerja ini disebabkan oleh pelapisan Fe_3O_4 dengan SiO_2 yang mampu menstabilkan katalis dalam kondisi netral, meningkatkan adsorpsi zat warna, dan mempermudah pemisahan serta penggunaan ulang katalis karena sifat magnetiknya.

Penelitian serupa dilakukan oleh Komariah *et al.* (2022) yang menyatakan bahwa penggunaan katalis heterogen Fe_3O_4 -kitosan beads pada sistem foto-fenton dibawah sinar UV efektif dalam mendegradasi zat warna methylene blue (MB), dengan efektivitas degradasi mencapai 72,14% pada kondisi optimum serta nilai total degradasi mencapai 98,93% melalui kombinasi mekanisme adsorpsi dan aktivitas fotokatalitik. Kondisi optimum diperoleh pada massa katalis 0,5gram, volume H_2O_2 1% sebanyak 0,4 mL, dan waktu penyinaran selama 4 jam. Hasil ini menunjukkan bahwa modifikasi Fe_3O_4 dengan kitosan tidak hanya meningkatkan kestabilan dan kemampuan adsorpsi, tetapi juga menghasilkan sistem katalis yang dapat digunakan kembali dan ramah lingkungan dalam pengolahan limbah tekstil berwarna.

Penelitian selanjutnya oleh JAR & Priyadi (2019) yang menyatakan bahwa metode elektro-fenton efektif dalam menurunkan kadar COD dan warna limbah industri tekstil yang mengandung senyawa azo dengan efisiensi penurunan COD mencapai 94,1% dan warna hingga 99,2% pada kondisi optimum berupa perbandingan molaritas $\text{H}_2\text{O}_2:\text{Fe}_3\text{O}_4$ sebesar 10:1, dengan tegangan listrik 7 volt, dan jarak elektroda sejauh 4 cm selama 180 menit. Proses ini menggabungkan metode elektrokoagulasi dan reaksi fenton yang menghasilkan radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) sebagai oksidator kuat untuk menghancurkan ikatan azo dan cincin aromatik dalam molekul pewarna, sehingga mampu mereduksi senyawa kompleks menjadi senyawa sederhana dan meningkatkan biodegradabilitas limbah. Meskipun metode ini terbukti dalam menurunkan kadar COD dan warna limbah tekstil, terdapat keterbatasan seperti, sangat sensitif terhadap perubahan pH, membuat efektivitas menurun pada pembentukan radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) dan ketergantungan terhadap waktu kontak serta kestabilan aliran dalam reaktor secara kontinyu apabila aliran turbulen yang terlalu dekat dapat

mengurangi waktu tinggal limbah dalam reaktor, sehingga zat warna belum terdegradasi sepenuhnya saat keluar dari sistem. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun metode ini sepenuhnya efisien, namun diperlukan kontrol proses yang ketat serta optimasi desain reaktor agar hasil yang didapatkan konsisten dan efisien dalam skala lebih besar.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis efektivitas proses fenton katalitik berbasis Fe_3O_4 dalam mendegradasi zat warna sintesis naphthol, remazol, dan indigosol yang terdapat dalam limbah cair industri batik, khususnya metode fenton heterogen. Penelitian ini juga mengidentifikasi pengaruh parameter operasional seperti pH, konsentrasi H_2O_2 , waktu reaksi, dan dosis katalis terhadap efisiensi degradasi warna dan penurunan nilai COD, serta membandingkan kinerja katalis Fe_3O_4 dengan metode pengolahan limbah lain dalam konteks efisiensi, kelayakan ekonomi dan penerapannya pada skala industri kecil-menengah (IKM). Keterbaharuan dari studi ini terletak pada penggunaan limbah batik yang memiliki karakteristik kompleks dan fluktuatif, bukan sekedar limbah sintesis tunggal di laboratorium saja. Selain itu, penggunaan katalis Fe_3O_4 dalam bentuk heterogen memberikan keunggulan dalam hal kemudahan pemisahan dan potensi penggunaan ulang, sehingga diharapkan mampu memberikan pendekatan yang relevan, efisien, dan berkelanjutan untuk pengolahan limbah cair batik di Indonesia.

Metode

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode kajian literatur dengan menelusuri referensi teoritis yang relevan terhadap kasus atau permasalahan yang diteliti. Menurut Creswell (2014), kajian literatur merupakan ringkasan tertulis yang memuat informasi dari berbagai sumber seperti jurnal, buku, dan dokumen lainnya, baik dalam bentuk fisik maupun digital yang berkaitan dengan topik penelitian.

Jenis data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder yang diperoleh melalui studi literatur. Studi literatur dilakukan dengan mengumpulkan dan menghimpun informasi dari berbagai sumber yang relevan dengan fokus penelitian. Data yang telah dikumpulkan kemudian dianalisis menggunakan analisis deskriptif, yaitu dengan mendeskripsikan fakta-fakta yang ditemukan, menganalisisnya, serta memberikan pemahaman dan penjelasan yang sesuai terhadap isu yang dikaji.

Hasil dan Pembahasan

Karakteristik Limbah Batik dan Tantangan Pengolahannya

Limbah batik memiliki karakteristik yang kompleks, seperti kaya akan zat warna sintesis (azo, indigosol, naphthol, remazol) yang sulit terurai, dimana zat-zat ini umumnya mengandung logam berat seperti seng (Zn), tembaga (Cu), timbal (Pb), krom (Cr), kadmium (Cd), dan arsen (As). Bahan kimia tambahan, seperti soda api (NaOH), garam pengoksidasi, dan pelarut organik. pH bervariasi, yang mana dapat bersifat asam, basa, padatan tersuspensi, serta memiliki nilai COD (Chemical Oxygen Demand) dan BOD (Biological Oxygen Demand) tinggi,

tergantung pada proses pewarnaan dan bahan kimia yang digunakan. Tingkat toksisitas yang tinggi, dimana limbah batik dapat bersifat toksik terhadap organisme air dan berpotensi menimbulkan masalah kesehatan jika masuk ke rantai makanan (Dewi & Wardiyati, 2016). Berdasarkan beberapa penelitian, parameter kualitas air limbah industri batik cukup tinggi dari baku mutu yang telah disyaratkan. Hal ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Beberapa Karakteristik Limbah Cair Industri Batik

No.	Peneliti, Tahun	Sumber limbah	Karakteristik Limbah	Keterangan
1.	Aryani dkk, 2004		BOD 869 mg/1 COD 2200 mg/1 TSS 243 mg/1 TDS 1857 mg/1	Baku mutu limbah cair untuk kegiatan industri batik
2.	Muljadi, 2009		Warna keruh dan berbusa pH 9,7 BOD 129,47 mg/1 Diduga mengandung logam berat: krom (Cr), Timbal (Pb), Nikel (Ni), tembaga (Cu), dan mangan (Mn)	menurut Peraturan Badan Lingkungan Hidup Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta (2010): pH 6-9 BOD 50 mg/1 COD 100 mg/1 TSS 200 mg/1 TDS
3.	Tuty dan Herni, 2009	Limbah pabrik batik khas Palembang	COD 4230,366 mg/1 Amoniak total 5,47 mg/1 Fenol total 0,008 mg/1 TSS 535 mg/1 Sulfida 0,04 mg/1 Krom total 0,1385 mg/1 Besi 2,0587 mg/1	Baku mutu: pH 6-9 COD 150 mg/1 Amoniak total 8 mg/1 Fenol total 0,5 mg/1 TSS 50 mg/1 Sulfida 0,3 mg/1 Krom total 1 mg/1

			Tembaga 0,2696 mg/1 Seng 54,7175 mg/1 Cadmium 0,0063 mg/1 Timbal 0,2349 mg/1	
4.	Octarina, 2015		pH 8,77 BOD 261,25 mg/1 COD 1066 mg/1 warna 3050 Pt-Co	Baku mutu kualitas air limbah tekstil Peraturan Gubernur Jawa Timur No. 72 tahun 2013: pH 6-9 BOD 60 mg/1 COD 150 mg/1 warna 50 Pt-Co (Berdasarkan KepMen LH No. 51 Tahun 1995)

Beberapa metode telah dikembangkan untuk mengatasi permasalahan akibat industri batik, baik secara fisika, kimia, biologi, seperti sistem lumpur aktif, adsorpsi, proses oksidasi lanjutan, elektrodegradasi, fotodegradasi, elektrokoagulasi, phytotreatment. Berikut beberapa penelitian yang telah dilakukan.

Tabel 2. Metode Pengolahan Limbah Industri Batik

No	Metode	Penelitian yang sudah dilakukan
1	Sistem lumpur aktif Penghilangan bahan organik terlarut oleh mikroorganisme / biomassa yang ditumbuhkan secara aerob dalam jumlah dan jenis yang beragam (Grady dkk, 1999).	Ratnani, 2008 Jenis mikrobia yang biasa terdapat dalam lumpur umumnya adalah Pseudomonas, Zooglea, Achromobacter, Flavobacterium, Nocardia, Bdellovobrio, Mycobacterium, Nitrosomonas, dan Nitrobacter.
2	Adsorpsi dan absorpsi Menempelnnya suatu molekul (adsorbat) pada permukaan suatu padatan penyerap (adsorben) atau pada seluruh bagian	Suprihatin dan N. S. Indrasti, 2010 Tingkat penyisihan Cr sekitar 97% dapat dicapai pada pH 10, dan tingkat penyisihan Hg dan Ag 97-99% pada

	<p>padatan penjerap yang disebut adsorben.</p>	<p>pH 12 menggunakan karbon aktif. Ghomri, dkk., 2013 Bentonit dapat menurunkan kadar Cu²⁺, Zn²⁺, Ni²⁺ dan Co²⁺ dalam larutan. Putra, dkk., 2014 Nanopartikel Fe₃O₄ dapat menyerap besi dalam pH basa. Absorpsi maksimum Fe terjadi pada pH 12 yaitu sebesar 0,03 ppm dan 0,06 ppm dengan waktu pengadukan yang lama.</p>		<p>Kondisi optimum elektrodegradasi zat warna Acid Green menggunakan elektroda PbO₂ dan Ti adalah kuat arus sebesar 15 mA cm⁻² dengan suhu 30°C dan waktu elektrolisis 10 menit, pH 2, konsentrasi NaCl 2 g l⁻¹, menghasilkan larutan konsentrasi untuk zat warna 0 mg l⁻¹ dan COD berkisar antara 0-22 mg.</p>
<p>3</p>	<p>Proses oksidasi lanjutan Proses oksidasi menggunakan oksidator kuat seperti ozon dan hidrogen peroksida, yang lebih dikenal dengan proses Advance Oxidation Processes (AOPs).</p>	<p>Nugroho dan Ikbal, 2005 Teknologi AOPs menggunakan ozon dan hidrogen peroksida dapat menghilangkan warna pada air limbah industry tekstil pada suhu optimum 70°C dan pH 12. Agustina, dkk., 2011 sebagai katoda dapat menghilangkan warna sebesar 80% setelah 25 menit dengan kuat arus 60 mA cm⁻² dengan konsentrasi Cl⁻ 1,2g dm⁻³, serta menurunkan COD mendekati 0 mg setelah 200 menit. Rajkumar dan Kim, 2006 Penggunaan elektroda titanium untuk katoda dan stainless steel sebagai anoda mampu menghilangkan COD 39,5 sampai 82,8% dan TOC 11,3 sampai 44,7%, pada kondisi optimum konsentrasi NaCl 1,5 g/L dan kuat arus 36,1 mA cm⁻². Ghalwa dan Latif, 2005</p>	<p>4</p> <p>Elektrodegradasi Proses degradasi kontinyu menggunakan arus listrik searah melalui peristiwa elektrolisis, yaitu gejala dekomposisi elektrolit. Prinsip kerja elektrodegradasi yaitu pemanfaatan reaksi redoks pada kedua elektroda.</p>	<p>Sigit Nugroho, 2013 Kondisi optimum elektroda grafit (C) dari baterai bekas adalah pH 4, kuat arus 1 A dan konsentrasi elektrolit 0,5 M. Aplikasi kondisi ini mampu menurunkan konsentrasi zat warna indigosol golden yellow IRK sebesar 90%. Data GC-MS setelah elektrolisis menunjukkan Indigosol Golden Yellow IRK terdegradasi menjadi senyawa karbon rantai pendek. Panizza, dkk., 2006 Penggunaan dua anoda boron-doped diamond dan TiRuO₂ dengan stainless steel sebagai katoda dapat menghilangkan warna sebesar 80% setelah 25 menit dengan kuat arus 60 mA cm⁻² dengan konsentrasi Cl⁻ 1,2g dm⁻³, serta menurunkan COD mendekati 0 mg setelah 200 menit. Rajkumar dan Kim, 2006 Penggunaan elektroda titanium untuk katoda dan stainless steel sebagai anoda mampu menghilangkan COD 39,5 sampai 82,8% dan TOC</p>

		<p>11,3 sampai 44,7%, pada kondisi optimum konsentrasi NaCl 1,5 g/L dan kuat arus 36,1 mA cm⁻².</p> <p>Ghalwa dan Latif, 2005 Kondisi optimum elektrodegradasi zat warna Acid Green menggunakan elektroda PbO₂ dan Ti adalah kuat arus sebesar 15 mA cm⁻² dengan suhu 30°C dan waktu elektrolisis 10 menit, pH 2, konsentrasi NaCl 2 g l⁻¹, menghasilkan larutan konsentrasi untuk zat warna 0 mg l⁻¹ dan COD berkisar antara 0-22 mg.</p>
5	<p>Elektrokoagulasi Proses destabilisasi suspensi, emulsi dan larutan yang mengandung kontaminan dengan cara mengalirkan arus listrik searah (DC).</p>	<p>Lestari dan Agung Persentase penyisihan COD tertinggi mencapai 83,33% terjadi pada menit ke 180 dengan kuat arus 2,5 A dan persentase penyisihan TSS mencapai 90% serta zat warna mencapai 88,51% dengan waktu kontak 180 menit dan kuat arus 2,5 A.</p> <p>Rahmawati, dkk., 2009 Potensial aplikasi seng bekas sebagai elektroda sebesar 7 volt dengan pH 12 dan waktu elektrolisis selama 20 menit. Pada temperatur kamar, elektrokoagulasi limbah cair batik memberikan penurunan absorbansi sebesar 97,64%, sedangkan penurunan kandungan COD, TSS dan kekeruhan masing-masing adalah 80,38%, 96,38% dan 97,61%.</p>
6	<p>Phytotreatment Pemanfaatan tumbuhan untuk membersihkan kontaminan yang terkandung di dalam air atau tanah (Valderrama</p>	<p>Puspita, dkk., 2011 Tumbuhan air mampu menjadi agen fitoremediator logam berat kromium. Di antara 3 tumbuhan air yang</p>

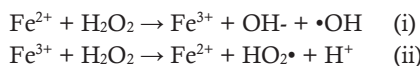
	<p>dkk., 2013). Proses phytotreatment menggunakan sistem phytostabilization, rhizofiltration, rhizodegradation, phytoextraction, phytodegradation dan phytovolatilization (Erakhrumen dan Agbontalor (2007).</p>	<p>dicobakan, Eichornia crassipes merupakan tumbuhan yang paling mampu menurunkan kadar Cr air limbah batik, diikuti Pistia stratiotes dan Hydrilla verticillata dengan persentase penurunan secara berturut-turut : 49,56%, 33,61% dan 10,84%.</p> <p>Octarina, 2015 Scirpus grossus memiliki kemampuan lebih baik daripada Egeria densa dengan efisiensi penurunan BOD dan COD mencapai 90%.</p> <p>Ningsih, 2017 Scirpus grossus dan Iris pseudacorus dalam reaktor mixed dengan sistem pemaparan intermittent F/D 2:1 mampu menyisihkan COD sebesar 89%, BOD sebesar 97% dan warna sebesar 99%.</p>
7	<p>Fotodegradasi Proses peruraian suatu senyawa organik dengan bantuan energi foton atau cahaya.</p>	<p>Riyani, dkk., 2012 Uji aktivitas fotokatalis dilakukan menggunakan sinar matahari sebagai sumber energi dengan lama penyinaran 5 jam. Penambahan Urea pada fotokatalis TiO₂ dapat meningkatkan aktivitas fotokatalis, perbandingan molar TiO₂ : Urea optimum pada perbandingan 90:10, dengan persen penurunan BOD dan COD berturut-turut sebesar 48,4% dan 72,73%.</p> <p>Aditya dan Sutanto, 2014 Lapisan bilayer ZnO/TiO₂ mampu mendegradasi methylene blue sebesar 99,85%, methyl orange 50,86% dan pewarna batik 47,87%.</p>

Pengelolaan limbah batik masih menghadapi berbagai tantangan teknis, terutama karena kandungan limbahnya yang kompleks, seperti zat warna sintesis (misalnya azo, indigo, dan antrakuinon), surfaktan, serta logam berat yang sulit diuraikan secara biologis (Wardiyati *et al.*, 2023). Zat warna ini memerlukan metode pengolahan yang lebih kuat, seperti proses oksidasi lanjutan menggunakan katalis heterogen berbasis $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ untuk mencapai efisiensi degradasi yang optimal (Dewi & Wardiyati, 2016). Efektivitas proses ini juga sangat bergantung pada parameter seperti suhu, pH, dan dosis katalis, serta berisiko menghasilkan lumpur sekunder apabila menggunakan katalis logam terlarut (Wardiyati *et al.*, 2023). Namun, penggunaan Fe_3O_4 sebagai katalis heterogen dapat mengurangi limbah padat karena bersifat magnetik dan dapat dipisahkan serta digunakan kembali, sehingga mendukung prinsip keberlanjutan (Dewi & Wardiyati, 2016).

Keterbatasan finansial juga menjadi hambatan utama bagi pelaku UKM batik dalam menerapkan teknologi pengolahan limbah, karena biaya investasi dan operasional relatif tinggi serta minimnya dukungan teknis dan insentif dari pemerintah (Suprayitno & Suharti, 2024). Implementasi IPAL komunal juga masih terbatas, mengakibatkan rendahnya pemanfaatan teknologi pengolahan lanjutan seperti Fenton heterogen, khususnya di daerah sentra batik (Wardiyati *et al.*, 2023). Oleh karena itu, keberhasilan penerapan teknologi Fenton katalitik berbasis Fe_3O_4 memerlukan dukungan kebijakan, pelatihan teknis, serta peningkatan kesadaran dan edukasi lingkungan agar dapat diterapkan secara luas dan berkelanjutan.

Prinsip Dasar Proses Fenton dan Fenton Katalitik

Proses fenton merupakan salah satu metode *Advance Oxidation Process* (AOPs) yang memanfaatkan reaksi antara ion besi (Fe^{2+}) dan hidrogen peroksida (H_2O_2) dengan suasana asam, menghasilkan radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) (Lai, dkk., 2021; Rueda-Márquez, *et al.*, 2020). Radikal hidroksil adalah agen pengoksidasi yang sensitif dan efektif untuk menguraikan senyawa organik kompleks, seperti zat warna sintesis pada limbah industri batik (Zhang, *et al.*, 2019; Wang & Tang, 2020). Reaksi fenton homogen berbentuk larutan, yaitu Fe^{2+} dan H_2O_2 dalam fase cair, menyebabkan regenerasi Fe^{2+} melalui reduksi Fe^{3+} , serta membentuk *sludge* logam dengan rentang pH asam kuat (2-4) (Wang & Tang, 2020; Zhang, *et al.*, 2019; Fischbacher, *et al.*, 2017).



Tahap ini menghasilkan radikal hidroksil, sementara tahap regenerasi Fe^{2+} memungkinkan siklus reaksi yang berlanjut. Reaksi katalitik fenton terdiri dari oksidasi Fe^{2+} menjadi Fe^{3+} dengan pembentukan $\bullet\text{OH}$, dan reduksi Fe^{3+} menjadi Fe^{2+} . Kecepatan regenerasi Fe^{2+} jauh lebih rendah daripada kecepatan pembentukan $\bullet\text{OH}$, sehingga terjadi penumpukan Fe^{3+} dan pembentukan endapan Fe^{3+} ketika pH berada di atas 3 dalam bentuk oksihidroksida (*sludge* logam). *Sludge* logam sulit untuk

dipisahkan, menyebabkan hilangnya kadar besi dan mengurangnya aktivitas katalitik serta menimbulkan limbah baru pada lingkungan (Martínez-Huitle, *et al.*, 2016; Xue, *et al.*, 2018; Fischbacher, *et al.*, 2017).

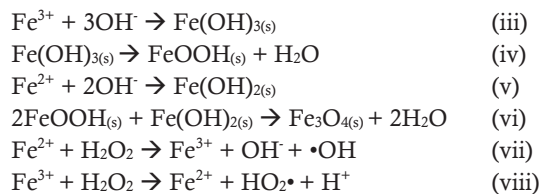
Untuk mengatasi kelemahan tersebut, dikembangkan proses fenton heterogen katalitik dengan memanfaatkan Fe_3O_4 (magnetit) sebagai katalis dalam bentuk padat yang tidak larut dalam air. Metode heterogen dapat mempermudah dekomposisi H_2O_2 menjadi radikal $\bullet\text{OH}$ pada katalis, sehingga katalis dapat dipisahkan dan digunakan kembali dengan mudah menggunakan magnet, serta meminimalisir produksi limbah *sludge* logam (Wang & Tang, 2021). Santhanaraj, *et al.*, (2020), menyatakan dampak matriks pada katalis Fe_3O_4 AC untuk mengurangi zat warna organik pada limbah cair dengan kombinasi proses adsorpsi dan fenton untuk menghilangkan metilen biru, menghasilkan reaksi yang meningkat dalam pemecahan metilen biru dengan katalis Fe_3O_4 AC sebesar 25 wt%. Chatterjee, *et al.*, (2020) meneliti material baru Fe_3O_4 dengan penggunaan 1,2,4,5-Benzenetetracarboxylic (BTCA) pada partikel nano Fe_3O_4 sebagai control. Percobaan ini menghasilkan penghilangan zat warna kongo merah dengan cepat dan memiliki adsorpsi tinggi sebesar 63 mg/g. Keunggulan proses ini meliputi kemudahan dalam pemisahan katalis dengan magnet, minimnya terbentuk *sludge*, dapat digunakan kembali, serta rentang pH yang lebih besar (Zhang, *et al.*, 2019; Wang & tang, 2021).

Perbedaan utama antara proses fenton homogen dan heterogen terletak pada bentuk katalis serta fase reaksi yang terjadi. Sistem fenton homogen memanfaatkan ion Fe^{2+} dalam bentuk pelarut, memerlukan kondisi pH dengan rentang pH yang sedikit dan cenderung menghasilkan *sludge* logam (Wang & Tang, 2020; Zhang, *et al.*, 2019). Perbedaan utama antara proses fenton homogen dan heterogen terletak pada bentuk katalis serta fase reaksi yang terjadi. Sistem fenton homogen memanfaatkan ion Fe dalam bentuk pelarut, memerlukan kondisi pH dengan rentang pH yang sedikit dan cenderung menghasilkan *sludge* logam (Wang & Tang, 2020; Zhang, *et al.*, 2019). Sebaliknya, sistem fenton heterogen menggunakan FeO , sebagai katalis dalam bentuk padatan yang stabil. Sehingga hasilnya mudah untuk dipisahkan melalui sifat magnetiknya, dan lebih rjunah lingkungan karena dapat didaur ulang secara efisien tanpa menghasilkan limbah tambahan (Wang & Tang 2020, Lai, *et al.* 2021).

Fe_3O_4 sebagai Katalis Heterogen

Fe_3O_4 (magnetit) menjadi katalis heterogen yang sangat efektif dalam sistem fenton, karena karakteristik magnetiknya memungkinkan pemisahan katalis dari larutan dengan mudah melalui aplikasi medan magnet, sehingga meningkatkan efisiensi penggunaan ulang katalis (Wang, *et al.*, 2013; Ayadi, *et al.*, 2022). Material ini umumnya disintesis menggunakan metode *co-precipitation*, yaitu dengan mereaksikan FeCl_3 dan FeSO_4 dalam kondisi basa (pH 9-11) dengan rasio perbandingan $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ yaitu 2:1 menghasilkan partikel nano dengan luas permukaan tinggi (Ghasemi, *et al.*, 2021; Rifaqat, *et al.*, 2022). Struktur Fe_3O_4 memiliki spinel terbalik yang terdiri dari ion Fe^{2+} dan Fe^{3+} dalam

posisi aktif pada oktahedral, sehingga memungkinkan transfer elektron antar jenis besi yang penting untuk reaksi fenton (Prasetyo, *et al.*, 2019; Xu & Wang, 2012). Mekanisme reaksi utama fenton heterogen pada permukaan padat katalis Fe₃O₄ sebagai berikut (Fatimah, *et al.*, 2021).



Reaksi tersebut menghasilkan radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$), yang merupakan pengoksidasi sangat kuat sehingga mampu memutuskan ikatan dalam molekul zat warna (Zhao, *et al.*, 2020). Reaksi berlangsung di permukaan katalis, sehingga meminimalkan pelepasan ion logam terlarut membentuk *sludge* logam seperti pada fenton homogen (Kastanek, *et al.*, 2023). Stabilitas termal Fe₃O₄ termasuk tinggi, serta memiliki kemampuan degradasi stabil saat pemakaian tanpa adanya penurunan signifikan (Keshta, *et al.*, 2024).

Karmanto (2013) melakukan pengujian dengan menggunakan sumber medan magnet luar. Gaya magnetik pada Fe₃O₄ terletak pada sisi aktifnya. Semakin banyak sisi aktif maka gaya magnetiknya akan semakin besar. Interaksi yang terjadi antara adsorben dan adsorbet melibatkan gaya van der Waals, mengakibatkan adsorbet dapat tertarik pada molekul adsorben. Adsorpsi akan mengalami penurunan bahkan konstan dalam presentase logam berat karena telah terjadi kejenuhan pada material penyerap akibat interaksi Fe₃O₄ sebagai adsorben dengan larutan-larutan yang mengandung Co(II) dan Fe(II) sebagai adsorbat yang telah mengalami kesetimbangan (Sartika, 2016). Sifat magnetik ini menjadikan Fe₃O₄ sebagai katalis heterogen dari proses magnetik yang dilakukan sederhana, efisien, ekonomis, dan tidak beracun (Tatinting *et al.*, 2021). Kelebihan lain dari Fe₃O₄ adalah bahan bakunya tersedia di alam seperti pasir besi, dapat disintesis dengan mudah, dan bersifat reusabilitas sehingga bisa digunakan berulang kali (Dewi & Wardiyati, 2016).

Penanganan limbah batik menggunakan Fe₃O₄ memiliki kemampuan yang sangat baik untuk menguraikan pewarna sintesis seperti Rhodamin B dan Methyl Orange, dengan tingkat efektivitas mencapai lebih dari 95% dalam waktu retensi relatif singkat (Prasetyo, *et al.*, 2019). Katalis menggunakan Fe₃O₄ dapat digunakan kembali dalam beberapa siklus, sehingga lebih ekonomis bagi pelaku UMKM batik (Dewi & Wardiyati, 2016). Proses fenton katalitik berbasis Fe₃O₄ dinilai lebih ramah lingkungan serta layak digunakan untuk skala industri kecil hingga menengah, karena tidak menghasilkan *sludge* dan tidak meninggalkan logam berat terlarut (Martínez- Huitle, *et al.*, 2016; Xue, *et al.*, 2018; Fischbacher, *et al.*, 2017).

Efektivitas Degradasi Zat Warna Menggunakan Fe₃O₄

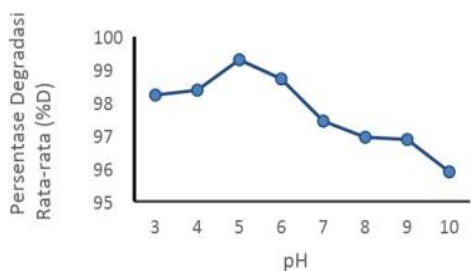
Fe₃O₄ telah banyak digunakan dalam proses degradasi zat warna karena kemampuannya yang menghasilkan radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) melalui reaksi fenton. Radikal ini terbukti efektif dalam mengatasi pencemaran zat warna dari limbah cair terhadap senyawa organik kompleks, yang dapat mempercepat proses dekolorisasi dan mineralisasi (Ou *et al.*, 2022). Dalam penelitian oleh Freire *et al.* (2020), dikembangkan nanostruktur magnetik Fe₃O₄-kitosan yang mampu menghilangkan lebih dari 90% zat warna azo melalui kombinasi adsorpsi dan reaksi katalitik. Berdasarkan penelitian ini dapat disimpulkan bahwa struktur berpori dan sifat nanokomposit memberikan kemampuan dekolorisasi yang tinggi sekaligus mudah untuk dipisahkan dari larutan limbah. Hal ini diperkuat oleh penelitian yang dilakukan oleh Prasetyo *et al.* (2019) yang menunjukkan bahwa Fe₃O₄ yang berperan sebagai katalis mampu mendegradasi rhodamine B sebesar 98,96% pada suhu 90 °C dan konsentrasi katalis 2 g/L, sehingga dapat dinyatakan bahwa reaksi fenton heterogen tidak hanya efisien namun juga praktis digunakan kembali karena sifat magnetiknya.

Penelitian yang dilakukan oleh Dewi & Wardiyati (2015) menunjukkan bahwa pH, waktu reaksi, dosis katalis, dan konsentrasi H₂O₂ (Yusuf *et al.*, 2012), merupakan parameter yang dapat dijadikan sebagai acuan untuk mengetahui efektivitas katalitik Fe₃O₄ terhadap limbah batik. Beberapa peneliti menunjukkan adanya parameter kualitas dari limbah industri pabrik batik yang melebihi baku mutu. Salah satu penelitian yang dilakukan oleh Suprihatin *et al.* (2021) menunjukkan pengaruh terhadap pH, konsentrasi H₂O₂, waktu reaksi, dan dosis katalis.

Tabel 3. Perbandingan Data Degradasi Warna dan COD

Penelitian	Katalis	Zat warna	Persentase Degradasi	Waktu retensi (menit)
Suprihatin <i>et al.</i> (2021)	Bentonit-Fe ₃ O ₄	Naptho 1 Blue Black	98,95%	30 menit
Diatariani <i>et al.</i> (2017)	ZnO-Bentonit	Acid Yellow 11	90%	-
Dewi <i>et al.</i> (2016)	Bentonit-Fe ₃ O ₄	Remazol Brilliant blue	90-95%	-
Fatimah <i>et al.</i> (2010)	ZnO-Montmorillonite	Methylene blue	85-95%	60 menit
Xu <i>et al.</i> (2014)	Bentonite + H ₂ O ₂	Azocarmine B	70-80% (COD removal)	60 menit

Dengan persentase pH pada reaksi fotodegradasi Napthol blue black oleh fotokatalisis bentonit-Fe₃O₄ ditunjukkan pada grafik berikut :



Gambar 1. Pengaruh pH terhadap persentase degradasi rata-rata (%D)(Suprihatin *et al.*, 2021).

Tabel 4. Pengaruh terhadap parameter

No	Peneliti, Tahun	Parameter	Hasil
1	Dewi & Wardiyati, 2016	pH	Efisiensi degradasi rendah dikarenakan Fe_3O_4 tidak stabil dan tereduksi pada larutan pH netral 5-7. Efisiensi degradasi mengalami penurunan, karena H_2O_2 pada suasana basa akan terdekomposisi membentuk H^+ dan HOO^{\cdot} yang akan bereaksi dengan Fe^{2+} membentuk ferric hydroxide.
		Jumlah katalis	Penggunaan katalis Fe_3O_4 sebanyak 20 mg diperoleh efisiensi degradasi sebesar 55,5%. Jumlah katalis 30 mg, efisiensi degradasi menjadi 71,5%. Jumlah katalis 50 mg, efisiensi degradasi sebesar 94,5%.
2	Yusuf, <i>et al.</i> , 2012	Konsentrasi H_2O_2	Penambahan konsentrasi H_2O_2 dari

			0,050 mL sampai 0,900 mL tidak dapat mempengaruhi degradasi MB. Efisiensi degradasi 0%.
3	Komaria h, et al., 2022	Waktu reaksi (waktu optimum)	Pada jam ke-4 nilai degradasi sebesar 72,14%, nilai degradasi menurun pada jam ke-5. Nilai degradasi terus meningkat hingga mencapai 98,93% pada jam ke-4.

Berdasarkan berbagai penelitian yang telah dilakukan, metode fotokatalisis menggunakan Fe_3O_4 terutama dalam bentuk nanokomposit seperti bentonit- Fe_3O_4 terbukti efektif dalam mendegradasi zat warna kompleks dari limbah cair, dengan efisiensi degradasi yang tinggi dan kemampuan pemisahan yang praktis (Freire *et al.*, 2020 & Prasetyo *et al.*, 2019). Efektivitas degradasi sangat dipengaruhi oleh parameter (Dewi & Wardiyati, 2016; Yusuf, *et al.*, 2012; & Komaria h, *et al.*, 2022) dengan kondisi optimum yang pada umumnya ditemukan adalah pH asam, dosis katalis yang mencukupi, dan waktu retensi sekitar 4 jam, seperti yang ditunjukkan dalam penelitian Suprihatin *et al.* (2021) dan Komaria h *et al.* (2022). Dengan demikian, metode degradasi dengan menggunakan fenton heterogen katalitik berbasis Fe_3O_4 merupakan teknik yang efisien untuk dilakukan dalam penanganan zat warna pada limbah batik, karena ramah lingkungan dan dapat digunakan berkelanjutan karena tidak larut dalam reaksi.

Potensi Pengembangan

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Setyaningtyas *et al.*, (2018). penggunaan fenton lebih efektif dengan bantuan radiasi sinar UV dibandingkan tanpa radiasi sinar UV. Metode foto fenton dengan katalis heterogen Fe_3O_4 dan SiO_2 dapat meningkatkan efisiensi dan mempercepat proses degradasi (Dewi & Wardiyati, 2016). Dengan menggabungkan metode foto fenton dengan katalis Fe_3O_4 dan SiO_2 disertai dengan proses penyinaran sinar UV bisa menjadi kajian penelitian yang lebih lanjut karena prospek dan peluang yang besar. Perlu diperhatikan juga sifat mengenai penyerapan sinar uv pada katalis, Fe_3O_4 dapat menyerap radiasi UV dan mengalami fotokatalisis, dan SiO_2 merupakan inert terhadap radiasi UV, tetapi dapat digunakan sebagai pendukung untuk fotokatalisis.

Menurut penelitian oleh Reyes-Perez *et al.* (2025) dalam jurnal Catalysts, metode fenton dapat ditingkatkan efektivitasnya melalui integrasi dengan proses ozonasi dan fitoremediasi, membentuk

sistem terintegrasi ozon/fenton-like/fitoremediasi. Penelitian ini menggunakan kombinasi ozonasi dan reaksi fenton-like dengan batuan batu apung yang dimodifikasi tembaga (PMPCu) pada kondisi asam (pH 3), yang berhasil menghilangkan warna hingga 86,79% dan menurunkan kadar COD sebesar 76,19% dari limbah cair industri tekstil denim. Fitoremediasi menggunakan tanaman *Myriophyllum aquaticum* untuk menguraikan sisa polutan dan produk sampingan dari proses kimia sebelumnya. Diperoleh hasil, adanya interaksi sinergis, dimana ozon mempercepat pembentukan radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) yang sangat reaktif dalam reaksi fenton. Adapun tanaman akuatik membantu menghilangkan kontaminan secara biologis tanpa menimbulkan dampak lingkungan tambahan.

Menurut Mao *et al.* (2023), metode fenton dapat ditingkatkan efektivitasnya melalui penggabungan dengan proses adsorpsi dan fotokatalisis, menggunakan material komposit berbasis grafena oksida dan karbon nitrida grafitik (g-C₃N₄) yang didoping besi. Sistem ini bekerja secara sinergis melalui foto-fenton terkoordinasi, dimana memanfaatkan kemampuan adsorpsi cepat, pengayaan polutan pada permukaan katalis, dan aktivasi fotokatalik. Sistem katalis GO/Fe-GCN mampu mencapai efisiensi degradasi polutan organik hingga 96,5% dengan kesetimbangan 83,6% untuk Rhodamin B. keberhasilan ini dicapai melalui peningkatan transfer elektron, pemisahan muatan fotogenik yang lebih efisien, serta optimalisasi regenerasi Fe²⁺/Fe³⁺ dalam reaksi fenton. Material GO juga memberikan keuntungan berupa kestabilan struktural, kemudahan pemisahan pasca-reaksi, dan potensi penggunaan ulang menjadi solusi menjanjikan untuk pengolahan air limbah kompleks secara berkelanjutan.

Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan :

1. Proses fenton dengan katalis FeO₄ terbukti efektif dalam mendegradasi zat warna sintetis dari limbah batik, dengan efisiensi tinggi, ramah lingkungan, dan dapat digunakan kembali. Efektivitas degradasi sangat dipengaruhi oleh pH, waktu reaksi, konsentrasi H₂O₂, dan dosis katalis. Kombinasi dengan metode lain seperti UV, ozonasi, atau fotokatalisis menunjukkan potensi pengembangan teknologi yang lebih efisien dan berkelanjutan. Metode ini sangat relevan untuk diterapkan dalam skala industri kecil-menengah batik di Indonesia.

Daftar Pustaka

- Andriani, D., Andriyani, R., Prabandani, A., Yuniati, M., Yanto, D., Zaidi, N., & Puteh, M. (2025). Characterization and Treatment Methods of Hazardous Compounds in Batik Wastewater: A Review. *International Journal of Environmental Research*, 19. <https://doi.org/10.1007/s41742-025-00741-7>
- Ansori, R. A., & Mufid, M. (2025, Maret 31). STUDI LITERATUR PENENTUAN METODE PENGOLAHAN LIMBAH YANG EFISIEN UNTUK LIMBAH CAIR
- BATIK. DISTILAT : Jurnal Teknologi Separasi, 11(1), 67–74. <https://doi.org/10.33795/distilat.v11i1.6876>
- Apriyani, N. (2018). Industri batik: Kandungan limbah cair dan metode pengolahannya. *MITL: Media Ilmiah Teknik Lingkungan*, 3(1), 21–29. Universitas Muhammadiyah Palangkaraya.
- Ayadi, H., Khaled, A., Halladja, S., Boudraa, I., Rehimi, Z., & Chehimi, M. M. (2022). Fe₃O₄/MMT Fenton-like heterogeneous catalyst for the methylene blue degradation. *Desalination and Water Treatment*, 260, 179–186. <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28523>
- Chatterjee, S., Guha, N., Krishnan, S., Singh, A. K., Mathur, P., & Rai, D. K. (2020). Selective and Recyclable Congo Red Dye Adsorption by Spherical Fe₃O₄ Nanoparticles Functionalized with 1,2,4,5-Benzenetetracarboxylic Acid. *Scientific Reports*, 10(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57017-2>
- Creswell, John W., (2014). Research design: pendekatan kualitatif, kuantitatif, dan mixed. Yogyakarta : Pustaka Pelajar.
- Dewi M. A., Suprihatin, I. E., dan Sibarani J. 2017. Fotodegradasi Zat Warna Remazol Brilliant Blue dengan Bentonit Terimpregnasi Fe₂O₃. *Jurnal Kimia*. 11(1): 82–87.
- Dewi, S. H., & Wardiyati, S. (2016). Optimasi Proses Degradasi Limbah Warna Oleh Katalis Heterogen Fe₃O₄/SiO₂ Menggunakan Metode Foto Fenton. In *Prosiding Seminar Nasional XXIV "Kimia Dalam Industri Dan Lingkungan," May*, 175–180.
- Diantariani, N. P., Suprihatin, I. E. dan Widihati, I. A. G. 2016. Synthesis Of ZnO-AC Composite and Its Use in Reducing Textile Dyes Concentrations Of Methylene Blue and Congo Red By Photodegradation. *Cakra Kimia*. 4(1): 1-7.
- Fatimah, I., Wang. S. and Wulandary. D. 2010. ZnO/Montmorillonite for Photocatalytic and Photochemical Degradation of Methylene Blue. *Journal Science*. 53: 553-560.
- Fatimah, I., Fadillah, G., & Yudha, S. P. (2021). Synthesis of iron-based magnetic nanocomposites: A review. *Arabian Journal of Chemistry*, 14(8), 103301. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.arabj.c.2021.103301>
- Fischbacher, A., von Sonntag, C., & Schmidt, T. C. (2017). Hydroxyl radical yields in the Fenton process under various pH, ligand concentrations and hydrogen peroxide/Fe(II) ratios. *Chemosphere*, 182, 738–744. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.039>

- Freire, T. M., Fechine, L. M. U. D., Queiroz, D. C., Freire, R. M., & Juliano, C. (n.d.). *Supporting Information for Magnetic Porous Controlled Fe₃O₄ – Chitosan Nanostructure : An Ecofriendly Adsorbent for Efficient Removal of Azo Dyes*. 85, 1–9.
- Ganiyu, S., Zhou, M., & Martinez-Huitle, C. A. (2018). Heterogeneous electro-Fenton and photoelectro-Fenton processes: A critical review of fundamental principles and application for water/wastewater treatment. *Applied Catalysis B: Environmental*, 235. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.04.044>
- Ghasemi, H., Mozaffari, S., Mousavi, S. H., Aghabarari, B., & Abu-Zahra, N. (2021). Decolorization of wastewater by heterogeneous Fenton reaction using MnO₂-Fe₃O₄/CuO hybrid catalysts. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(2), 105091. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105091>
- J A R, N. R., & Priyadi, A. R. (2019). Penurunan Kadar Cod Dan Warna Limbah Industri Tekstil Dengan Metode Elektro-Fenton. *Jurnal Envirotek*, 11(2), 14–23. <https://doi.org/10.33005/envirotek.v11i2.9>
- Komariah, K., Setyaningtyas, T., & Riyani, K. (2022). Pengaruh Penambahan H₂O₂ dan Variasi Massa Fe₃O₄-Kitosan Beads dalam Mendegradasi Zat Warna Methylene Blue di Bawah Sinar UV. *Chimica et Natura Acta*, 10(1), 26–32.
- Karmanto. (2013). Sintesis dan Karakterisasi Material Lempung Magnetik (Mg/Alhydrotalcite-Magnetit). *Kaunia*, IX(2), 27–33.
- Kastanek, F., Spacilova, M., Krystynik, P., Dlaskova, M., & Solcova, O. (2023). Fenton Reaction–Unique but Still Mysterious. *Processes*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/pr11020432>
- Keshta, B. E., Gemeay, A. H., Kumar Sinha, D., Elsharkawy, S., Hassan, F., Rai, N., & Arora, C. (2024). State of the art on the magnetic iron oxide Nanoparticles: Synthesis, Functionalization, and applications in wastewater treatment. *Results in Chemistry*, 7, 101388. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101388>
- Kharisma. (2021). Pengaruh Zat Pewarna Sintetis terhadap Pewarnaan Kain Batik. *Journal of Fashion Product Design & Business*, 2, 44–46. <https://journal.uc.ac.id/index.php/FOLIO/article/view/3476>
- Lai, C., Shi, X., Li, L., Cheng, M., Liu, X., Liu, S., Li, B., Yi, H., Qin, L., Zhang, M., & An, N. (2021). Enhancing iron redox cycling for promoting heterogeneous Fenton performance: A review. *Science of The Total Environment*, 775, 145850. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145850>
- Liu, M., Ye, Y., Ye, J., Gao, T., Wang, D., Chen, G., & Song, Z. (2023). Recent Advances of Magnetite (Fe₃O₄)-Based Magnetic Materials in Catalytic Applications. *Magnetochemistry*, 9(4). <https://doi.org/10.390/magnetochemistry9040110>
- Martínez-Huitle, C.A., Rodrigo, M.A., Sirés, I., Scialdone, O., (2016). Single and coupled electrochemical processes and reactors for the abatement of organic water pollutants: a critical review. *Chem. Rev.* 115 (24), 13362–13407.
- Mao, H., Wang, L., Zhang, Q., Chen, F., Song, Y., Gui, H., Cui, A., & Yao, C. (2023). via Iron-Doped g-C₃N₄ / GO Hybrid for Complex Wastewater. 1–17
- Nguyen, X. C Le, T. T. N., Truong, H. B., Thi Hoa, L., Le, H. S., Tran, T. T. T., Manh, T. D., Le, V. T., Dinh, Q. K., (2023). Cu₂O/Fe₃O₄/UiO-66 nanocomposite as an efficient fenton-like catalyst: Performance in organic pollutant degradation and influencing factors based machinelearning. *Heliyon*, 9(10). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20466>
- Oturan, M. A., & Aaron, J. J. (2014). Advanced oxidation processes in water/wastewater treatment: Principles and applications. A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44(23), 2577–2641. <https://doi.org/10.1080/10643389.2013.829765>
- Ou, J., Luo, K., Tan, H., Li, N., Hu, B., & Yu, G. (2022). Fe₃O₄@N-doped carbon derived from dye wastewater flocculates as a heterogeneous catalyst for degradation of methylene blue. *New Journal of Chemistry*, 46(33), 15882–15890. <https://doi.org/10.1039/d2nj02905g>
- Prasetyo, I., Akbar, F., Prabandari, A. W., & Ariyanto, T. (2019). Fenton Oxidation using Easily Recoverable Catalyst of Magnetite (Fe₃O₄) as an Efficient Approach to Treatment of Rhodamine B Dyeing Effluent in Traditional Fabrics Industry. *ASEAN Journal on Science and Technology for Development*, 36(3). <https://doi.org/10.29037/ajstd.592>
- Rafaqat, S., Ali, N., Torres, C., & Rittmann, B. (2022). Recent progress in treatment of dyes wastewater using microbial-electro-Fenton technology. *RSC Advances*, 12(27), 17104–17137. <https://doi.org/10.1039/d2ra01831d>
- Rahmat, A., & Agung, T. (2018). Alternatif Pengolahan Limbah Batik. *Jurnal Envirotek*, 10(1), 37–45.
- Reyes-Pérez, J. A., Amaya-Chávez, A., Roa- Morales, G., Balderas-Hernández, P., Pavón Silva, T. B., Torres-Blancas, T., & Barrera- Díaz, C. E. (2025). Textile Wastewater Coupled Treatment Implementing Enhanced Ozonation with Fenton-like Processes and Phytoremediation. *Catalysts*, 15(1). <https://doi.org/10.3390/catal15010043>
- Rueda-Márquez, J. J., Levchuk, I., Manzano, M., & Sillanpää, M. (2020). Toxicity reduction of industrial and municipal

- wastewater by advanced oxidation processes (Photo-fenton, UVC/H₂O₂, electro-fenton and galvanic fenton): A review. *Catalysts*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/catal10060612>
- Santhanaraj, D., Joseph, N. R., Ramkumar, V., Selvamani, A., Bincy, I. P., & Rajakumar, K. (2020). Influence of lattice strain on Fe₃O₄@carbon catalyst for the destruction of organic dye in polluted water using a combined adsorption and Fenton process. *RSC Advances*, 10(64), 39146–39159. <https://doi.org/10.1039/d0ra07866b>
- Sartika, D. (2016). Sifat Magnetik Adsorben Nanopartikan Fe₃O₄ terhadap Adsorpsi Logam Berat (CO dan Fe) dalam Larutan. *Seminar Nasional Pendidikan 2016*, 1, 631-641
- Setyaningtyas, T., Riyani, K., Dwiasi, D. W., & Rahayu, E. B. (2018). Degradasi Fenol pada Limbah Cair Batik Menggunakan Reagen Fenton Dengan Sinar UV Degradation of Phenol in Batik Wastewater Using Fenton Reagent under UV Rays. *Jurnal Kimia VALENSI: Jurnal Penelitian dan Pengembangan Ilmu Kimia*, 4(1), 26-33.
- Seni, P., Geografi, F., & Gadjah, U. (2011). KAJIAN KUALITAS AIR SUNGAI BEDOG AKIBAT PEMBUANGAN LIMBAH CAIR SENTRA INDUSTRI BATIK DESA WIJIREJO Widayati Indarsih Slamet Suprayogi dan M. Widyastuti INTISARI Batik sebagai salah satu warisan budaya asli Indonesia harus dilestarikan keberadaannya. *Majalah Geografi Indonesia*, 25(1).
- Suprayitno, D., & Suharti, L. (2024). *Peran kepemimpinan wirausaha untuk keberlanjutan UKM batik*. Medan: PT Media Penerbit Indonesia. ISBN: 978-634-7012-18-0.
- Suprihatin, I. E., Murdani, N. D., & Suarsa, I. W. (2021). BENTONIT-Fe₃O₄ SEBAGAI FOTOKATALIS DALAM PROSES FOTODEGRADASI NAPHTHOL BLUE BLACK DENGAN IRADIASI UV. *Jurnal Kimia*, 15(1), 59. https://doi.org/10.24843/jc_hem.2021.v15.i01.p09
- Tatinting, G. D., & Aritonang, H. F. (2021). DARI PASIR BESI PANTAI HAIS SEBAGAI ADSORBEN LOGAM KADMIUM (Cd). 14(2).
- Wang, J., & Tang, J. (2020). Iron-copper bimetallic metal-organic frameworks for efficient Fenton-like degradation of sulfamethoxazole under mild conditions. *Chemosphere*, 241, 125002. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125002>
- Wang, J., & Tang, J. (2021). Fe-based Fenton-like catalysts for water treatment: Preparation, characterization and modification. *Chemosphere*, 276, 130177. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130177>
- Wang, Y., Mao, Q., He, H., & Zhou, M. (2013). Fe₃O₄ nanoparticles as an efficient heterogeneous Fenton catalyst for phenol removal at relatively wide pH values. *Water Science and Technology : A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 68, 2367–2373. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.497>
- Wardiyati, S., Hasnah, S., & Fisli, A. (2014). Dekolorisasi Limbah Industri Batik Menggunakan Proses Fenton dan Foto Fenton. *Indonesian Journal of Materials Science*, 14(April), 131–135.
- Wardiyati, S., Winatapura, D.S., and Wisnu, A.A., (2015) Influence of Fe₃O₄ addition in TiO₂ catalyst on degradation of methylene blue. *The 9th Seminar on Manetic Material*, Palembang.
- Xu, L., & Wang, J. (2012). Fenton-like degradation of 2,4-dichlorophenol using Fe₃O₄ magnetic nanoparticles. *Applied Catalysis B: Environmental*, 123–124, 117–126. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2012.04.028>
- Xu, W., Jin, Y., & Zeng, G. (2024). Introduction of heavy metals contamination in the water and soil: a review on source, toxicity and remediation methods. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 17(1), 1–25. <https://doi.org/10.1080/17518253.2024.2404235>
- Xue, W.J., Huang, D.L., Zeng, G.M., Wan, J., Zhang, C., Xu, R., Cheng, M., Deng, R., 2018a. Nanoscale zero-valent iron coated with rhamnolipid as an effective stabilizer for immobilization of Cd and Pb in river sediments. *J. Hazard. Mater.* 341, 381–389.
- Yusuf, S., Dewi, S. H., Ridwan, R., & Wardiyati, S. (2013). Pembuatan Katalis Fenton dari Sumber Daya Alam Lokal untuk Pengolahan Limbah Organik. *Indonesian Journal of Materials Science*, 14(4), 261092.
- Zhang, M., Dong, H., Zhao, L., Wang, D., & Meng, D. (2019). A review on Fenton process for organic wastewater treatment based on optimization perspective. *Science of The Total Environment*, 670, 110–121. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.180>
- Zhao, H., Tian, C., Mei, J., Yang, S., & Wong, P. K. (2020). Synergistic effect and mechanism of catalytic degradation toward antibiotic contaminants by amorphous goethite nanoparticles decorated graphitic carbon nitride. *Chemical Engineering Journal*, 390, 124551. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124551>