

Peluang Karbon Nanopori *Moringa oleifera* Mengurangi Residu Besi Efluen Fenton Air Limbah Organik Tinggi

Peni Pujiastuti¹

¹Program Studi Analis Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Setia Budi, Indonesia; e-mail: penipujiastuti@setiabudi.ac.id

ABSTRAK

Polutan organik konsentrasi tinggi dari limbah industri mendominasi pencemaran air permukaan, dapat menimbulkan ancaman signifikan terhadap ekosistem perairan dan kesehatan manusia. Polutan ini sulit mengalami biodegradasi, menyebabkan berkurangnya kualitas air dan mengganggu kehidupan biota air. Reagen Fenton sangat efektif mengurangi konsentrasi polutan organik tinggi hingga lebih dari 90%. Namun efluen proses fenton mengandung residu Fe sangat tinggi melebihi baku mutu, berakibat menimbulkan pencemaran air. Diperlukan upaya pengolahan lanjutan yang ramah lingkungan. *Moringa oleifera* mempunyai peluang besar untuk mengurangi residu Fe setelah pengolahan fenton. Proses ini menjanjikan keamanan bagi biota air. Penelitian ini bertujuan memberikan solusi ramah lingkungan dalam pengolahan limbah organik tinggi pada efluen fenton menggunakan *Moringa oleifera* Carbon (MOC) dan *Moringa oleifera* Carbon Activated (MOCA) untuk mengurangi residu Fe. Metode penelitian dilakukan secara deskriptif laboratoris, menggunakan sampel penelitian dari air limbah industri tahu. Pengolahan menggunakan reagen fenton (H_2O_2 0,3M dan FeSO_4 0,8M). Efluen dari proses fenton ditambahkan serbuk MOC dan MOCA 100 mesh. Variabel bebas konsentrasi (mg/L) MOC dan MOCA: 100, 200, 300 dan 400. Selanjutnya diuji waktu kontak (menit) 15, 30, 45 dan 60 terhadap konsentrasi paling optimal mengurangi residu Fe. Sampel sebelum dan sesudah pengolahan diuji kadar Fe. Uji karakteristik partikel MOC dan MOCA menggunakan SEM-EDX, BET-BJH dan FTIR. Uji karakteristik kimia meliputi kadar air, kadar abu, protein, lemak, karbohidrat, daya serap terhadap iod menggunakan metode terstandar sesuai SNI. Hasil penelitian menunjukkan MOCA memiliki rerata diameter pori 4,1825 nm. MOCA dosis 400 mg/L dengan waktu kontak 30 menit efektif mengurangi residu Fe efluen fenton sebesar 76,39%. MOCA nanopori berpeluang besar sebagai bioadsorben yang ramah lingkungan.

Kata kunci: Polutan organik, Fenton, Residu Fe, *Moringa oleifera*, bioadsorben

ABSTRACT

High concentrations of organic pollutants dominate surface water pollution, posing a threat to aquatic ecosystems and humans. These pollutants are difficult to biodegrade, causing reduced water quality. Fenton reagents effectively reduce >90% of high concentrations of organic pollutants. However, the effluent of the fenton process leaves a very high Fe residue, resulting in water pollution. Environmentally friendly advanced processing efforts are needed. *Moringa oleifera* has a great chance of reducing Fe residues after fenton processing and promises safety for aquatic life. The research aims to provide an environmentally friendly solution in the treatment of high organic waste in fenton effluent using *Moringa oleifera* Carbon (MOC) and *Moringa oleifera* Carbon Activated (MOCA) to reduce Fe residues. Laboratory descriptive research method, using tofu industrial wastewater samples. Using fenton reagents H_2O_2 0.3M and FeSO_4 0.8M. Bioadsorbent of MOC and MOCA 100 mesh powder, concentration (mg/L): 100, 200, 300 and 400. Contact time (minutes) tests of 15, 30, 45 and 60 against the most optimal concentration reduce Fe residues. Pre- and post-processing samples tested for Fe levels. Testing the characteristics of MOC and MOCA particles using SEM-EDX, BET-BJH and FTIR. Chemical characteristics test including moisture content, ash content, protein, fat, carbohydrates, absorption to iodine. The results showed that MOCA had an average pore diameter of 4.1825 nm. MOCA dosage of 400 mg/L with a contact time of 30 minutes effectively reduced fenton effluent Fe residue by 76.39%. MOCA nanopores have a great opportunity as an environmentally friendly bioadsorbent.

Keywords: Organic pollutants, Fenton, Fe residue, *Moringa oleifera*, bioadsorbent

Citation: Pujiastuti, P. (2025). Peluang Nanopori Karbon *Moringa Oleifera* Mengurangi Residu Besi Effluent Fenton Air Limbah Organik Tinggi. Jurnal Ilmu Lingkungan, 23(4), 1114-1122, doi:10.14710/jil.23.4.1114-1122

1. PENDAHULUAN

Air sungai merupakan salah satu air permukaan yang menerima buangan air limbah industri, seperti industri batik, industri makanan, industri tahu, industri laundry, dan sebagainya. Air limbah industri

yang dibuang tanpa dilakukan pengolahan akan meningkatkan beban pencemaran air permukaan (Tugiyono *et al.*, 2023; Iloms *et al.*, 2020). Industri menjadi sumber utama pencemaran air, kandungan logam berat yang tinggi (Xu *et al.*, 2022; Iloms *et al.*,

2020). Hal ini dapat menyebabkan resiko pencemaran pada lingkungan air sungai tersebut dan kesehatan manusia. Sebagian besar air limbah industri mengandung polutan organik dengan angka *Biological Oxygen Demand* (BOD) dan atau *Chemical Oxygen Demand* (COD) (Pujiastuti Peni, 2024). Air limbah industri tahu, mengandung polutan organik tinggi dengan angka COD sebesar 7482,30 mg/L (Aji *et al.*, 2016), industri tekstil sebesar 1268 ± 121 mg/L (Kishor *et al.*, 2021). Polutan organik mengandung material organik yang bersifat *biodegradable* dan *non-biodegradable* (Pujiastuti Peni, 2024). Mikroorganisme dalam perairan tersebut mampu menguraikan material organik *biodegradable* menjadi senyawa yang lebih sederhana tidak berbahaya terhadap lingkungan air. Namun, material organik *non-biodegradable* akan sulit diuraikan oleh mikroorganisme secara alami (Pujiastuti Peni, 2024). Diperlukan pengolahan yang dapat mengurangi kandungan polutan organik (Fang *et al.*, 2024; Wijayanti *et al.*, 2023). Metode flokulasi-koagulasi, adsorpsi, lumpur aktif dan fenton dapat mengurangi polutan organik. Metode flokulasi-koagulasi dan metode lumpur aktif kurang efektif menguraikan polutan organik *non-biodegradable*, sedangkan fenton terbukti memiliki efektivitas tinggi dalam menurunkan polutan organik *non-biodegradable* (Aji *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2022). Reagen Fenton berisi Hidrogen peroksida (H_2O_2) sebagai oksidator dan Fero Sulfat ($FeSO_4$) sebagai katalis (Fang *et al.*, 2024; Lima *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2021). $FeSO_4$ ini termasuk dalam jenis reaksi homogen fenton, merupakan sumber Fe sebagai katalis (Tamas Isna Nufussilma, 2017; Khataee *et al.*, 2016).

Reagen Fenton berperan sebagai pereaksi oksidasi tingkat tinggi (Fang *et al.*, 2024; Wijayanti *et al.*, 2023). Fenton mampu mengurangi polutan organik tinggi dalam air limbah industri (Wang *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2021). Efektifitasnya pada pengolahan air limbah tahu mencapai lebih dari 90 % (Aji *et al.*, 2016), pengolahan limbah laboratorium kimia mencapai 99,98% (Wijayanti *et al.*, 2023), industri tekstil (Zhang *et al.*, 2021). Fenton dengan katalis terbukti efektif mengurangi polutan organik tinggi. Namun dalam proses pengolahan ini menyisakan residu besi dalam efluennya (Tamas Isna Nufussilma, 2017; Lyu *et al.*, 2020). Keberadaan besi dalam limbah industri dapat menimbulkan masalah pencemaran air, mengganggu kehidupan biota pada lingkungan air tersebut, yang juga akan berdampak pada kesehatan manusia (Kahlon *et al.*, 2018). Pengolahan polutan organik tinggi dengan menggunakan Fenton sudah banyak dilakukan (Aji *et al.*, 2016; Fang *et al.*, 2024), namun residu besi yang dihasilkan dari proses fenton tersebut belum banyak menjadi perhatian. Residu besi dapat menimbulkan pencemaran baru. Jadi pengolahan polutan organik tinggi menggunakan satu metode fenton saja tidak menyelesaikan masalah pencemaran air. Beberapa penelitian telah mencoba melakukan kombinasi fenton. (Feng *et al.*, 2021). melakukan kombinasi fenton dengan biochar dapat

mengurangi residu besi dalam lumpur. Menurut Wijayanti *et al.*, (2023) dalam penelitiannya mengintegrasikan proses fenton dengan adsorpsi karbon aktif untuk mengurangi residu besi dan meminimalkan produksi lumpur yang mengandung besi. Lima *et al.*, (2023) mengkombinasikan fenton dengan asam galat hasil ekstraksi kulit kayu. Namun, penelitian tentang kombinasi fenton dengan koagulan alami, seperti karbon biji *Moringa oleifera* masih terbatas, sehingga eksplorasi bahan alami ini menjadi area penelitian yang menjanjikan.

Moringa oleifera terbukti mampu mengurangi kandungan besi dalam air limbah laboratorium dengan efisiensi 89% (Pujiastuti *et al.*, 2022). *Moringa oleifera* kaya akan nutrisi, terutama protein. MO memiliki protein tinggi bermanfaat untuk pangan, kesehatan dan lingkungan. Biji *Moringa oleifera* memiliki protein tinggi berfungsi sebagai koagulan alami (Silveira *et al.*, 2020), mampu menurunkan bakteri *E.coli* (Silveira *et al.*, 2020;; Pujiastuti *et al.*, 2022; Kacem *et al.*, 2024) dan logam berat (Pujiastuti *et al.*, 2022; Tayi *et al.*, 2023). Protein dalam *Moringa oleifera* bersifat kationik yang berfungsi sebagai adsorben alami. Protein ini menginduksi pembentukan flok melalui interaksi elektrostatik dengan partikel tersuspensi dalam air, menyebabkan partikel-partikel terlarut mengumpul dan mengendap (Olabanji *et al.*, 2021; Shah *et al.*, 2024). Sebagai agen alami, residu *Moringa oleifera* menghasilkan sedikit lumpur dibandingkan dengan koagulan kimiawi seperti alum, yang seringkali menghasilkan lumpur dalam jumlah besar dan membutuhkan pengelolaan tambahan (Dehghani & Alizadeh, 2016). Penggunaan *Moringa oleifera* menjadi solusi koagulasi yang efisien, ekonomis, dan ramah lingkungan untuk pengolahan air.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi peluang karbon *Moringa oleifera* dalam mengurangi residu besi pada air limbah organik tinggi setelah pengolahan Fenton.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan dalam penelitian adalah: H_2O_2 pa Merck, $FeSO_4$ pa Merck, NaOH pa Merck, HCl pa Meck, HNO_3 pa Merck, Acetylene gas (C_2H_2), larutan standar logam besi Fe.

Alat utama yang digunakan Spektrofotometer UV-Vis Shimadzu, AAS Shimadzu, dan FTIR Shimadzu.

2.2. Parameter Penelitian

Parameter utama yang diukur dalam penelitian ini adalah zat besi terlarut (Fe). Parameter pendukung adalah COD yang diukur sesuai SNI 6989.73:2009. Besi terlarut diukur menggunakan Spektrofotometri Serapan Atom (AAS) sesuai dengan SNI 6989.4:2009 dan spektrofotometri UV-Vis sesuai SNI 06-4138-1996, Parameter tersebut digunakan untuk menilai efektivitas proses Fenton yang dikombinasikan dengan MOC dan MOCA dengan ukuran 100 mesh.

Pengaruh konsentrasi dan waktu kontak MOC dan MOCA menjadi variabel berubah.

2.3. Preparasi Sampel

Pengambilan sampel air limbah industri tahu dilakukan sesuai dengan SNI nomor 6989.59:2008 tentang metode pengambilan contoh air limbah. Sampel diambil secara grab sampling pada bak ekualisasi industri tahu di desa Madegondo Sukoharjo disebut sampel A, B dan C (Rika Wahyuningsih, 2022) dan desa Krajan Surakarta disebut sampel D, E, dan F. Selanjutnya dilakukan pengaturan derajat keasaman sampai mencapai pH 3 sebelum proses fenton dilakukan (Aji *et al.*, 2016).

2.4. Proses Fenton

Prosedur proses fenton pada limbah industri berdasarkan penelitian Aji *et al.*, (2016), sebagai berikut: Ke dalam 1 L air limbah industri tahu pH 3 ditambahkan 4 mL H₂O₂ 0,8 M dan 4 mL FeSO₄ 0,3 M, selanjutnya dilakukan pengadukan di atas hot *magnetic stirer* selama 1 jam. Kemudian dibiarkan mengendap, filtratnya dipisahkan disebut efluen proses fenton, selanjutnya digunakan untuk analisis residu Fe dan proses adsorpsi dengan MOC dan MOCA.

2.5. Persiapan MOC dan MOCA

Biji Moringa oleifera kering kupas kulit kotiledon dilakukan pengarangan di dalam *muffle furnace* yang beroperasi dalam udara dengan suhu 400°C selama 15 menit. Arang yang dihasilkan ditumbuk halus dan disaring menggunakan saringan 100 mesh, selanjutnya disebut MOC. Arang Moringa oleifera diaktifkan di dalam larutan HCl 2% dengan waktu kontak 3 jam, dikeringkan, ditumbuk dan disaring dengan saringan 100 mesh, selanjutnya disebut MOCA.

2.5.1. Uji karakteristik MOC dan MOCA

Uji karakteristik Kimia meliputi kadar air, kadar abu, protein, lemak, karbohidrat, daya serap terhadap iod menggunakan metode standar nasional Indonesia (SNI). Karakteristik untuk mengetahui morfologi permukaan dan kandungan unsur adsorben MOC dan MOCA dilakukan dengan uji *scanning electron microscopy-energy dispersive X-Ray* (SEM-EDX). Karakterisasi luas permukaan total, ukuran pori dan volume pori dari adsorben MOC dan MOCA dengan metode *Brunauer-Emmett-Teller* dan *Barrett-Joyner-Halenda* (BET-BJH). Analisis gugus fungsi diuji melalui FTIR.

2.5.2. Proses adsorpsi dengan MOC dan MOCA

Proses mengurangi residu Fe dilakukan menggunakan metode jartest. MOC atau MOCA dengan variasi konsentrasi 100 mg/L, 200 mg/L, 300 mg/L dan 400 mg/L ditambahkan ke dalam 100 ml effluent Fenton (Pujiastuti *et al.*, 2022). Dilakukan pengadukan cepat 200 rpm selama 30 menit dan pengadukan lambat 50 rpm selama 15 menit (Pujiastuti *et al.*, 2022). Selanjutnya filtrat dilakukan

analisis Fe, menggunakan metode spektrofotometri sesuai SNI 6989.4:2009 dan SNI 06-4138- 1996.

2.5.3. Analisis Data Penyisihan COD dan Fe

Efektifitas proses fenton terhadap penyisihan angka COD dan proses adsorpsi MOC/MOCA terhadap penyisihan angka Fe dapat dihitung berdasarkan data laboratorium sebelum dan sesudah proses pengolahan air limbah industri. Rumus prosen efektifitas dapat dihitung menggunakan rumus berikut (Adelodun *et al.*, 2020):

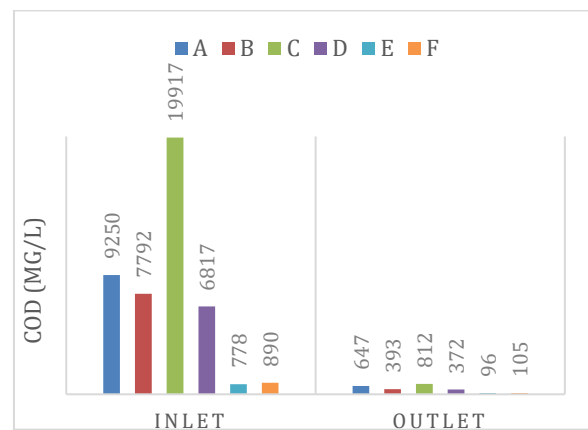
$$\text{Efisiensi penyisihan (\%)} = \frac{(C_1 - C_2)}{C_1} \times 100\% \quad (1)$$

dimana C1 konsentrasi COD/Fe sebelum pengolahan fenton/MOC/MOCA, sedang C2 merupakan konsentrasi COD/Fe setelah pengolahan dengan fenton/MOC/MOCA.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. COD inlet dan Outlet Proses Fenton

Gambar 1 menunjukkan bahwa air limbah tahu sebelum pengolahan fenton mengandung polutan organik tinggi, memiliki angka COD sebesar 778 mg/L sampai dengan 19.917 mg/L. Jauh melebihi baku mutu Peraturan Menteri Lingkungan Hidup nomor 5 tahun 2014 air limbah industri tahu maksimal memiliki angka COD sebesar 300 mg/L. Polutan tersebut efektif dioksidasi dengan reagen fenton. Oksidator kuat H₂O₂ dan katalisator FeSO₄ dengan pH 3 mampu mendegradasi polutan organik menjadi CO₂ dan H₂O. Hal ini ditunjukkan dengan penurunan angka COD yang sangat tajam, sejalan dengan penelitian (Liu *et al.*, 2021b). Rata-rata angka COD pada influen fenton sebesar 7574 mg/L dan efluen fenton sebesar 404,1667 mg/L.



Gambar 1. COD Inlet dan Outlet Proses Fenton

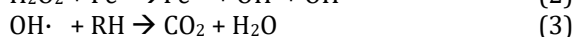
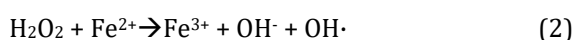
Keterangan Gambar: A, B dan C: sampel air limbah industri tahu dari desa Madegondo Sukoharjo (Rika Wahyuningsih, 2022). D, E dan F adalah sampel air limbah industri tahu dari desa Krajan Surakarta.

Proses Fenton secara efektif mengurangi tingkat COD dalam air limbah industri dengan polutan organik tinggi, seperti pada lindi (Wijayanti *et al.*, 2023), industri tahu (Aji *et al.*, 2016). Angka COD pada inlet reaktor Fenton lebih tinggi dibanding outlet.

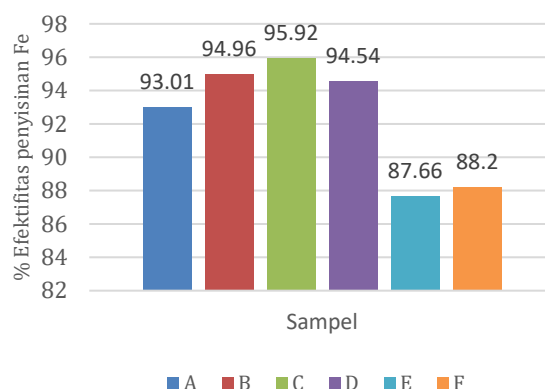
Menunjukkan proses fenton efektif mengurangi polutan organik, seperti terlihat pada Gambar 1 dan Gambar 2. Hal ini menunjukkan kapasitas proses Fenton dalam mendegradasi polutan organik tinggi, sehingga berkontribusi terhadap peningkatan kualitas air (Ribeiro & Nunes, 2021) (Wijayanti *et al.*, 2023). Selain itu, kandungan residu besi terjadi perubahan yang signifikan sebelum dan sesudah proses fenton. Proses fenton menghasilkan produksi residu besi sebagai produk sampingan, seperti terlihat pada Gambar 3 dan Gambar 4. Hasil pengurangan COD dan residu besi menegaskan efektivitas sistem secara keseluruhan dan menggarisbawahi perlunya pengelolaan kontaminan sekunder.

3.2. Efektivitas Fenton

Proses fenton merupakan reaksi oksidasi tingkat tinggi. Termasuk dalam Teknologi oksidasi kimia lanjut (*Advanced Oxidation Process-AOPs*). Oksidator H_2O_2 mampu mendegradasi polutan Organik tinggi (Zhang *et al.*, 2021; Wijayanti *et al.*, 2023). Reaksi ini akan berlangsung cepat dengan bantuan katalisator Fero sulfat ($FeSO_4$). Reaksi berlangsung efektif dalam suasana asam (Tamas Isna Nufussilma, 2017; Aji *et al.*, 2016) pada pH 3 (Adelodun *et al.*, 2020). Proses Fenton didasarkan pada perpindahan elektron H_2O_2 dan aktivitas Fe^{2+} sebagai katalis homogen. Proses oksidasinya didasarkan pada campuran hidrogen peroksida (H_2O_2) dan garam besi ($Fe[II]$) untuk menghasilkan radikal hidroksil ($OH\cdot$) pada pH asam, selanjutnya radikal hidroksil ini bereaksi dengan cepat terhadap polutan organik dalam lingkungan air. Kondisi air limbah, perbandingan H_2O_2 dengan $FeSO_4$ yang tepat akan menghasilkan reaksi fenton optimal (Tamas Isna Nufussilma, 2017). Mekanisme reaksi fenton adalah sebagai berikut (Fang *et al.*, 2024).



Gambar 2 menunjukkan bahwa reagen fenton terbukti sangat efektif dalam mengurangi polutan organik air limbah industri tahu, mampu mengurangi angka COD dengan efektifitas hingga 95,92%. Ini selaras dengan penelitian (Hardyanti *et al.*, 2024) mencapai 95,13% dan (Aji *et al.*, 2016) sebesar 94,48%. Pada sampel air limbah industri tahu E dan F prosentase penyisihan COD lebih kecil dari pada sampel A, B, C dan D. Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi proses fenton dalam mengurangi polutan organik, antara lain pH, suhu, dosis Fe , dosis H_2O_2 dan rasio molar $Fe:H_2O_2$ (Tamas Isna Nufussilma, 2017; Adelodun *et al.*, 2020), pengadukan, periode retensi dan karakteristik air limbah itu sendiri (Gao *et al.*, 2019; Adelodun *et al.*, 2020).

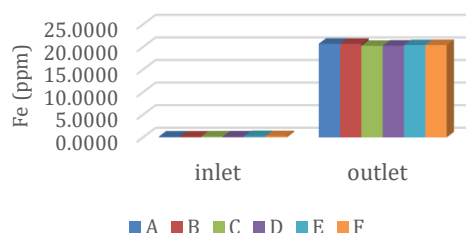


Gambar 2. Efektivitas Fenton Menurunkan COD

Keterangan Gambar: A, B dan C: sampel air limbah industri tahu dari desa Madegondo Sukoharjo (Rika Wahyuningsih, 2022). D, E dan F adalah sampel air limbah industri tahu dari desa Krajan Surakarta.

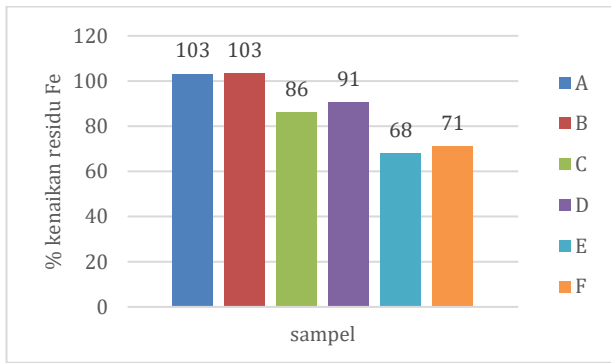
Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyoroti kemanjuran proses oksidasi tingkat lanjut, khususnya reaksi Fenton, dalam mengurangi polutan organik dalam air limbah industri. Liu *et al.*, (2021) proses gabungan tailing bijih Fenton + O_3/Mn memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan proses tunggal lanjutan biasa. Demikian pula, Wijayanti *et al.*, (2023) perlakuan menggunakan AOPs dengan rasio molar reagen Fenton 1:1200 mampu menurunkan COD sebesar 99,97%. Studi-studi ini menggarisbawahi penerapan luas sistem berbasis Fenton. Namun, seperti Wang *et al.*, (2022) mencatat, akumulasi residu besi dapat menimbulkan risiko kontaminasi sekunder yang signifikan jika tidak dikelola dengan baik. Eksplorasi moringa oleifera sebagai koagulan alami untuk menghilangkan residu besi dalam penelitian ini dapat memberikan solusi inovatif untuk masalah ini.

3.3. Residu Fe Sebelum dan Sesudah Proses Fenton



Gambar 3. Residu Fe Inlet dan Outlet Proses Fenton

Keterangan Gambar: A, B dan C: sampel air limbah industri tahu dari desa Madegondo Sukoharjo (Rika Wahyuningsih, 2022). D, E dan F adalah sampel air limbah industri tahu dari desa Krajan Surakarta.



Gambar 4. Peningkatan Fe Setelah Proses Fenton

Keterangan Gambar: A, B dan C: sampel air limbah industri tahu dari desa Madegondo Sukoharjo (Rika Wahyuningsih, 2022). D, E dan F adalah sampel air limbah industri tahu dari desa Krajan Surakarta.

Proses fenton meninggalkan residu Fe yang tinggi pada effluent dan sludge (Feng *et al.*, 2021; Fang *et al.*, 2024; Tamas Isna Nufussilma, 2017). Pada Gambar 3 dan 4, terlihat semua sampel air limbah tahu setelah proses fenton meninggalkan residu Fe yang sangat tinggi, dengan rata-rata kenaikan sebesar 87%. Penggunaan FeSO_4 sebagai katalisator dalam reaksi fenton inilah yang menyebabkan peningkatan Fe pada effluent pengolahan fenton. Sehingga dibutuhkan pengolahan pendamping fenton untuk mendapatkan hasil produksi bersih.

3.4. Karakteristik MOC dan MOCA

Moringa oleifera merupakan biokoagulan yang baik dalam mengatasi pencemaran air (Pujiastuti *et al.*, 2022; Nenohai *et al.*, 2023). MOC dan MOCA memiliki karakteristik kimia disajikan pada Tabel 1.

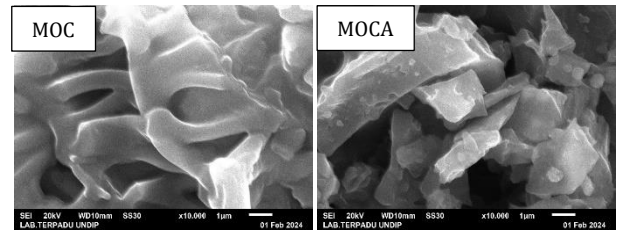
Tabel 1. Karakteristik MOC dan MOCA

Parameter uji	MOC	MOCA	SNI
Kadar air (%)	2,20	2,46	15
Kadar abu (%)	11,76	9,9	10
Protein (%)	34,99	38,08	-
Karbohidrat (%)	38,08	29,78	-
Lemak (%)	32,92	19,78	-
Daya serap Iod (mg/g)	555,97	624,1	750
Lolos ukuran mesh (mesh)	100	100	90

Pada Tabel 1 MOCA memiliki karakteristik yang memenuhi baku mutu sebagai karbon aktif, pada parameter kadar air, kadar abu dan lolos ukuran mesh. Daya serap terhadap iodium belum memenuhi standar sebagai karbon aktif, namun diperoleh angka daya serap yang mendekati baku mutu. MOCA ini memenuhi sebagai karbon aktif sehingga dapat digunakan sebagai adsorben.

Karakteristik partikel MOC dan MOCA yang diuji dengan SEM-EDX disajikan pada Gambar 5 dan ukuran pori partikel yang diuji dengan BET-BJH diperoleh hasil yang disajikan pada Tabel 2 dan Gambar 5. MOCA yang mengalami aktivasi dengan HCl 2% menghasilkan Gambar morfologi permukaan yang berbeda. Gambar morfologi permukaan MOC dan MOCA hasil uji SEM pada penelitian ini selaras dengan

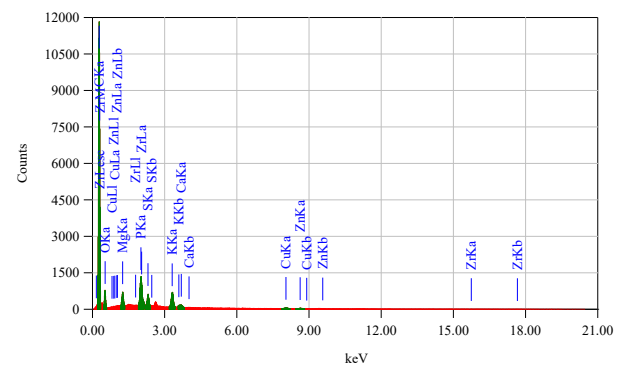
penelitian Salmi Abdullah *et al.*, (2017) pada biji Moringa oleifera yang diaktivasi dengan H_2SO_4 dan ZnCl_2 .



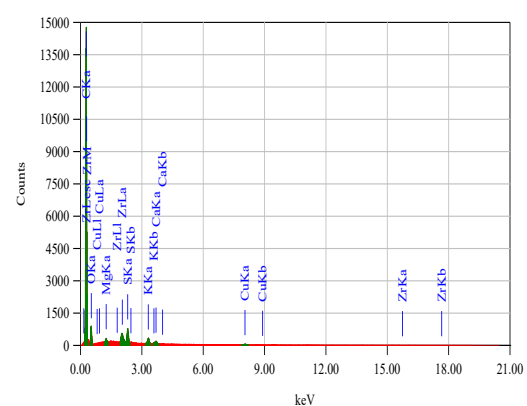
Gambar 5. Morfologi SEM-EDX MOC dan MOCA

Pada Gambar 6 dan 7 menyajikan kandungan unsur adsorben MOC dan MOCA dari hasil uji SEM-EDX. Sebagian besar komponennya adalah molekul carbon mencapai 93,98%. Molekul carbon di dalam MOCA sebesar 88,96%. Jika dibanding dengan MOC, kandungan carbon MOCA mengalami penurunan karena proses aktivasi dengan HCl 2%.

Berdasarkan Gambar 6 persen massa yang terkandung dalam MOC adalah komponen C 88,96% ; O 4,55%; Mg 0,36%; P 1,61%; S 0,72%; Ca 0,19%; Cu 0,59%; Zn 0,44%; dan Zr 0,88%



Gambar 6. Spektra EDX dari MOC



Gambar 7. Spektra EDX dari MOCA

Berdasarkan Gambar 7, persen massa yang terkandung dalam MOCA meliputi komponen C 88,96% ; O 4,55%; Mg 1,22%; S 0,72%; K 1,34%; Ca 0,19%; Cu 0,59%; Zr 0,86% ; P 1,61%; dan Zn 0,44%.

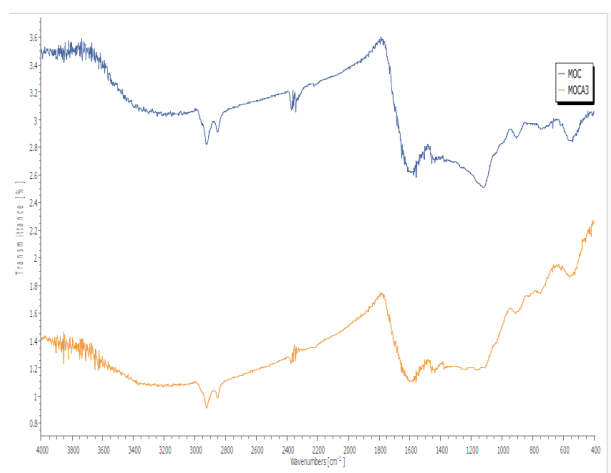
MOC dan MOCA memiliki ukuran partikel yang berbeda berdasarkan uji BET-BJH, disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Ukuran Partikel MOC dan MOCA

Ukuran partikel	Satuan	MOC	MOCA
Total volume pori	cm ³ /g	0.0069	0.0128
Rerata diameter pori	nm	5.7702	4.1825
Luas permukaan pori	m ² /g	4.7687	12.2032
Rerata diameter partikel	nm	571.9068	223.4886

Menurut Bergna *et al.*, (2022) aktivasi kimia meningkatkan luas permukaan partikel. Sejalan dengan penelitian Salmi Abdullah *et al.*, (2017) karbon aktif biji MO yang diaktivasi dengan ZnCl₂ memiliki diameter pori sebesar 2,13 nm. Berdasarkan data Tabel 2, Material MOC dan MOCA termasuk jenis mesopori. Menurut Kusumaningtyas, (2017) material dengan diameter pori 2-50 nm termasuk jenis material mesopori. MOCA memiliki rerata diameter nanopori dan diameter nanopartikel yang lebih kecil dan luas permukaan pori yang lebih besar dibanding MOC. Semakin kecil ukuran partikel maka semakin luas ukuran permukaannya dan semakin baik dalam menyerap polutan logam berat (Imelda *et al.*, 2019). Hal ini disebabkan partikel MOCA teraktivasi larutan HCl 2% selama 3 jam. HCl mampu membuka pori-pori partikel sehingga menjadi lebih luas. Memberikan peluang kepada MOCA untuk menjadi biokoagulan yang baik dalam mengurangi kandungan Fe.

Karakteristik gugus fungsi yang terdapat dalam MOC dan MOCA diuji menggunakan FTIR. Secara detail disajikan pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik Hasil Uji FTIR MOC dan MOCA

Berdasarkan grafik hasil uji FTIR pada Gambar 8, MOC memiliki berbagai gugus fungsi, yaitu adanya gugus OH, amina (NH), alkena (=C-H) dan (C=C), aromatis (C-H), nitro (N-O), dan alkana (C-H). Sedangkan MOCA mengandung gugus fungsi OH, amina (NH), Alkena (=C-H), aromatis (C-H) dan alkana untuk CH. Gugus hidroksil (OH) ditunjukkan spektrum FTIR di pita serapan kuat pada bilangan gelombang 3263,56 cm⁻¹ (MOC) dan 3205,69 cm⁻¹ (MOCA), sejalan dengan penelitian (Das *et al.*, 2020) 3280,92 cm⁻¹ yang mengindikasikan adanya gugus hidroksil yang umum terdapat pada senyawa fenolik. Gugus karbonil (C=O) terkonfirmasi di pita serapan pada bilangan gelombang 1593,2 cm⁻¹ – 1602,65 cm⁻¹

(MOC) dan 1595,13 cm⁻¹ (MOCA), sejalan dengan temuan (Das *et al.*, 2020) 1544,98 cm⁻¹ dan (Teclegeorgish *et al.*, 2021) 1611,3 cm⁻¹. Keberadaan gugus NH pada MOC dan MOCA terkonfirmasi pada bilangan gelombang 1051,20 cm⁻¹ dan 1114,86 cm⁻¹ – 1234,44 cm⁻¹ pita-pita serapan ini merupakan ciri khas gugus karbonil an amina dalam protein (Jayan *et al.*, 2021). Keberadaan gugus fungsi hidroksil (OH) dan karbonuil (C=O) meningkatkan kemampuan MOC dan MOCA sebagai koagulan alami, yang secara efektif mengurangi kekeruhan dalam air (Nwagbara *et al.*, 2022; Das *et al.*, 2020). Keberadaan protein MOC dan MOCA ditunjukkan oleh pita amina (NH) juga berperan dalam proses koagulasi (Kwaambwa & Maikokera, 2008). Kelompok gugus fungsi seperti C=O, NH dan OH sangat penting dalam biosorpsi logam berat (Nwagbara *et al.*, 2022; Jayan *et al.*, 2021).

3.5. Optimasi Konsentrasi MOC dan MOCA dalam Mengurangi Residu Fe Efluen Fenton

Pada efluen pengolahan air limbah industri tahu menggunakan reagen fenton, terdapat residu Fe sebesar 24,2697 mg/L. Selanjutnya ke dalam efluen tersebut ditambahkan MOC dan MOCA dengan dosis 100 mg/L - 400 mg/L. Pemilihan kisaran konsentrasi MOC dan MOCA berdasarkan penelitian Pujiastuti *et al.*, (2022), serbuk biji Moringa oleifera sebanyak 80 mg/l efektif menurunkan Fe air limbah laboratorium sebesar 89,33%. Bila dosis ini diterapkan untuk residu fenton dengan Fe yang tinggi, maka diperkirakan masih menyisakan residu Fe yang tidak memenuhi standar kualitas air limbah. Maka pada penelitian ini perlu menaikkan dosis dengan rentang 100 - 400 mg/l. Hasil penelitian menunjukkan MOC dan MOCA terkonfirmasi mempunyai kemampuan yang baik dalam mengurangi residu Fe tersebut. Hasil selengkapnya disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Optimasi Konsentrasi MOC dan MOCA dalam Mengurangi Residu Fe Efluen Fenton

Konsentrasi (mg/L)	MOC		MOCA	
	Fe (mg/L)	Efektivitas (%)	Fe (mg/L)	Efektivitas (%)
100	12,4770	48,61	14,7191	39,35
200	10,7866	55,56	9,1011	62,50
300	7,9775	67,13	6,2921	74,07
400	6,2921	74,07	5,0562	79,17

MOCA lebih efektif mengurangi kandungan Fe daripada MOC. Hal ini sejalan dengan karakteristik MOCA yang tertera pada Tabel 1, Tabel 2, Gambar 5 dan 6. Proses aktivasi selama 3 jam menggunakan HCl 2% telah menjadikan MOCA sebagai bioadsorben yang sangat baik dalam mengurangi residu Fe. Aktivasi karbon berpengaruh terhadap luas permukaan pori (Santos *et al.*, 2021; Yu, 2019). Sesuai dengan Gambar 5 dan Tabel 2 MOCA memiliki permukaan pori lebih luas dari MOC yaitu sebesar 12.2032 m²/g dan ukuran rata-rata diameter pori dan diameter partikel sebesar 223.4886 nm yang lebih kecil dari MOC. MOCA mampu menyerap residu Fe lebih besar dari MOC, karena memiliki ukuran luas

permukaan pori yang besar. Ukuran luas permukaan pori yang lebih besar dari 10 nm mempunyai kemampuan adsorpsi lebih cepat dibandingkan dengan adsorben yang memiliki ukuran pori kecil (Suresh Kumar *et al.*, 2019).

3.6. Optimasi Waktu Kontak MOCA-400 terhadap Penurunan Residu Fe

Berdasarkan Tabel 3, MOCA dengan konsentrasi 400 mg/L paling optimal dalam mengurangi residu Fe. Selanjutnya perlu ditentukan waktu kontak yang paling optimal dalam mengurangi residu Fe. Waktu kontak optimal, penting untuk memaksimalkan kapasitas adsorpsi Moringa Oleifera. Beberapa penelitian menemukan bahwa penghilangan berbagai ion logam berat, termasuk Fe menggunakan biji Moringa Oleifera dengan waktu kontak optimal 60 menit (Maina *et al.*, 2016; Jagaba *et al.*, 2021; de Paula *et al.*, 2016) pada dosis 1 gram pH 8 (Maina *et al.*, 2016). Berdasarkan hal tersebut maka rentang waktu kontak penelitian ini ditentukan 15 sampai 60 menit, dengan dosis MOCA 400 mg. Hasil penelitian disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Optimasi Waktu Kontak MOCA-400

Waktu kontak (menit)	Fe (mg/L)	Efektivitas (%)
0	24,2697	-
15	6,2921	74,07
30	5,7303	76,39
45	7,4157	69,44
60	6,8539	71,76

Lama waktu kontak partikel MOCA berpengaruh terhadap jumlah residu Fe yang diadsorpsi. Waktu kontak memberikan kesempatan partikel untuk bertumbukan dengan Fe. Sesuai Tabel 4 MOCA dengan waktu kontak 30 menit mampu mengurangi Fe paling tinggi dengan efektivitas sebesar 76,39 %. Pada waktu kontak 45 menit terjadi penurunan efektivitas penyisihan Fe, karena adanya kesetimbangan adsorpsi. Hal ini terjadi karena proses adsorpsi sering mencapai keseimbangan pada periode tertentu, selanjutnya laju adsorpsi menurun secara signifikan. Hal ini terjadi karena situs aktif yang tersedia pada adsorben MOCA menjadi jenuh dengan adsorbat Fe (Helen Kalavathy & Miranda, 2010; Pramanik *et al.*, 2015).

Efektivitas MOCA dalam mengurangi Fe dapat dijelaskan melalui mekanisme adsorpsi dan flokulasi yang terjadi pada permukaan biji Moringa. Partikel MOCA dengan kandungan protein tinggi sebesar 38,08% dan memiliki luas permukaan pori yang lebih besar dari MOC yaitu 12.2032m²/g, memungkinkan peningkatan area kontak antara MOCA dengan ion Fe, sehingga meningkatkan kemampuan pengikatan dan pengendapan ion logam berat tersebut (Demarco *et al.*, 2023). Mekanisme ikatan karbon dan Fe yang memfasilitasi pembuangan Fe ke dalam air limbah terutama melibatkan proses adsorpsi dan oksidasi (Moreira *et al.*, 2005). Penyisihan Fe dari air limbah industri dapat dicapai melalui adsorpsi ke permukaan karbon. Tanpa adanya oksigen terlarut, ion

Fe²⁺ diadsorpsi ke permukaan karbon, membentuk lapisan tunggal (Moreira *et al.*, 2005). Selain itu, penelitian oleh Shan *et al.*, (2017) menunjukkan bahwa protein aktif dalam MOCA berinteraksi dengan ion logam melalui mekanisme pengikatan muatan, yang membuat Fe dapat lebih mudah terkoagulasi dan diendapkan keluar dari larutan. Hasil ini konsisten dengan temuan yang dilaporkan oleh Shan *et al.*, (2017), dimana Moringa oleifera memiliki potensi yang lebih tinggi dalam penyerapan logam berat.

4. KESIMPULAN

MOC dan MOCA memiliki peluang besar sebagai adsorben ramah lingkungan. Memiliki karakteristik protein tinggi 34,99–38,08%, kemampuan daya serap iod mendekati 750 mg/g, termasuk material mesopori dengan ukuran diameter pori 4,1825 – 5,7702 nm, luas permukaan pori 12.2032 m²/g. MOCA dengan diameter partikel 223,4886 nm, lebih efektif mengurangi residu Fe efluen fenton. MOCA 400 mg/L dengan waktu kontak 30 menit berpeluang lebih besar menjadi adsorben, lebih efektif dalam mengurangi residu Fe pada efluen fenton sebesar 76,39% pada kondisi proses pengadukan cepat 200 rpm selama 30 menit dan pengadukan lambat 50 rpm selama 15 menit.

DAFTAR PUSTAKA

- Adelodun, B., Ogunshina, M. S., Ajibade, F. O., Abdulkadir, T. S., Bakare, H. O., & Choi, K. S. (2020). Kinetic and prediction modeling studies of organic pollutants removal from municipal wastewater using Moringa oleifera biomass as a coagulant. *Water (Switzerland)*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/w12072052>
- Aji, P. B., Sunarto, W., Eko, D., & Susatyo, B. (2016). Indonesian Journal of Chemical Science. *J. Chem. Sci.*, 5(2). <http://journal.unnes.ac.id/sju/index.php/iics>
- Bergna, D., Varila, T., Romar, H., & Lassi, U. (2022). Activated carbon from hydrolysis lignin: Effect of activation method on carbon properties. *Biomass and Bioenergy*, 159. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106387>
- Das, S. K., J., B. D., P. V., P., Das, S., Behera, S. P., Veilumuthu, P., & Christopher, J. G. (2020). Investigation on the Phenolic Content in Moringa oleifera and Its Antimicrobial Activity. *Indian Journal of Agricultural Research, Of*. <https://doi.org/10.18805/IJAR.A-5636>
- de Paula, H. M., Ilha, M. S. de O., & Andrade, L. S. (2016). Coagulantes químicos e o extrato de semente de Moringa oleifera para o tratamento da água residuária de concreto. *Acta Scientiarum - Technology*, 38(1), 57–64. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v38i1.25699>
- Dehghani, M., & Alizadeh, M. H. (2016). The effects of the natural coagulant Moringa oleifera and alum in wastewater treatment at the Bandar Abbas Oil Refinery. *Environmental Health Engineering and Management*, 3(4), 225–230. <https://doi.org/10.15171/ehem.2016.24>
- Demarco, C. F., Quadro, M. S., Selau Carlos, F., Pieniz, S., Morselli, L. B. G. A., & Andreadza, R. (2023). Bioremediation of Aquatic Environments Contaminated with Heavy Metals: A Review of

- Mechanisms, Solutions and Perspectives. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 15, Issue 2). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/su15021411>
- Fang, J., Liu, L., Yang, H., & Du, H. (2024). Applications of Fenton/Fenton-like photocatalytic degradation in g-C₃N₄ based composite materials. In *Journal of Environmental Chemical Engineering* (Vol. 12, Issue 6). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114153>
- Feng, D., Lü, J., Guo, S., & Li, J. (2021). Biochar enhanced the degradation of organic pollutants through a Fenton process using trace aqueous iron. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104677>
- Gao, Q., Xu, J., & Bu, X.-H. (2019). Recent advances about metal-organic frameworks in the removal of pollutants from wastewater. *Coordination Chemistry Reviews*, 378, 17–31. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2018.03.015>
- Hardyanti, N., Susanto, H., & Budihardjo, M. A. (2024). Removal of organic matter from tofu wastewater using a combination of adsorption, Fenton oxidation, and ultrafiltration membranes. *Desalination and Water Treatment*, 318. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100255>
- Helen Kalavathy, M., & Miranda, L. R. (2010). Moringa oleifera—A solid phase extractant for the removal of copper, nickel and zinc from aqueous solutions. *Chemical Engineering Journal*, 158(2), 188–199. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.12.039>
- Iloms, E., Ololade, O. O., Ogola, H. J. O., & Selvarajan, R. (2020). Investigating industrial effluent impact on municipal wastewater treatment plant in vaal, South Africa. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(3). <https://doi.org/10.3390/ijerph17031096>
- Imelda, D., Khanza, A., & Wulandari, D. (2019). *Pengaruh Ukuran Partikel Dan Suhu Terhadap Penyerapan Logam Tembaga (Cu) Dengan Arang Aktif Dari Kulit Pisang Kepok (Musa Paradisiaca Formatypica)*. Online.
- Jagaba, A. H., Kutty, S. R. M., Hayder, G., Baloo, L., Ghaleb, A. A. S., Lawal, I. M., Abubakar, S., Al-dhawi, B. N. S., Almahbashi, N. M. Y., & Umaru, I. (2021). Degradation of Cd, Cu, Fe, Mn, Pb and Zn by Moringa-oleifera, zeolite, ferric-chloride, chitosan and alum in an industrial effluent. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(1), 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.06.016>
- Jain, B., Singh, A. K., Kim, H., Lichtfouse, E., & Sharma, V. K. (2018). Treatment of organic pollutants by homogeneous and heterogeneous Fenton reaction processes. In *Environmental Chemistry Letters* (Vol. 16, Issue 3, pp. 947–967). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0738-3>
- Jayan, N., Laxmi Deepak Bhatlu, M., & Akbar, S. T. (2021). Central Composite Design for Adsorption of Pb(II) and Zn(II) Metals on PKM-2 Moringa oleifera Leaves. *ACS Omega*, 6(39), 25277–25298. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03069>
- Kacem, N. S., Derdour, R., & Djekoun, A. (2024). Antibacterial Efficacy of Moringa oleifera Seeds for Water Purification. *Journal of Ecological Engineering*, 25(11), 134–142. <https://doi.org/10.12911/22998993/192713>
- Kahlon, S. K., Sharma, G., Julka, J. M., Kumar, A., Sharma, S., & Stadler, F. J. (2018). Impact of heavy metals and nanoparticles on aquatic biota. In *Environmental Chemistry Letters* (Vol. 16, Issue 3, pp. 919–946). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0737-4>
- Khataee, A., Gholami, P., Vahid, B., & Joo, S. W. (2016). Heterogeneous sono-Fenton process using pyrite nanorods prepared by non-thermal plasma for degradation of an anthraquinone dye. *Ultrasonics Sonochemistry*, 32, 357–370. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.04.002>
- Kishor, R., Purchase, D., Saratale, G. D., Saratale, R. G., Ferreira, L. F. R., Bilal, M., Chandra, R., & Bharagava, R. N. (2021). Ecotoxicological and health concerns of persistent coloring pollutants of textile industry wastewater and treatment approaches for environmental safety. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(2), 105012. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.105012>
- Kusumaningtyas, M. P. (2017). *Analisis Struktur Nano Batu Apung Lombok Menggunakan Metode Bet (Brunauer-Emmett-Teller)*. [Institut Teknologi Sepuluh Nopember]. <https://repository.its.ac.id/3253/7/1112100035-Undergraduate-Theses.pdf>
- Kwaambwa, H. M., & Maikokera, R. (2008). Infrared and circular dichroism spectroscopic characterisation of secondary structure components of a water treatment coagulant protein extracted from Moringa oleifera seeds. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 64(1), 118–125. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2008.01.014>
- Lima, J. P. P., Tabelini, C. H. B., & Aguiar, A. (2023). A Review of Gallic Acid-Mediated Fenton Processes for Degrading Emerging Pollutants and Dyes. In *Molecules* (Vol. 28, Issue 3). MDPI. <https://doi.org/10.3390/molecules28031166>
- Liu, H., Xu, T., Li, C., Liu, W., & Lichtfouse, E. (2021). High increase in biodegradability of coking wastewater enhanced by Mn ore tailings in Fenton/O₃ combined processes. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18(1), 173–184. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02816-8>
- Lyu, L., Deng, K., Liang, J., Lu, C., Gao, T., Cao, W., & Hu, C. (2020). The interaction of surface electron distribution-polarized Fe/polyimide hybrid nanosheets with organic pollutants driving a sustainable Fenton-like process. *Materials Advances*, 1(5), 1083–1091. <https://doi.org/10.1039/d0ma00374c>
- Maina, I. W., Obuseng, V., & Nareetsile, F. (2016). Use of Moringa oleifera (Moringa) Seed Pods and Sclerocarya birrea (Morula) Nut Shells for Removal of Heavy Metals from Wastewater and Borehole Water. *Journal of Chemistry*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/9312952>
- Moreira, R. D. F. P. M., Madeira, V. S., José, H. J., & Humeres, E. (2005). Removal of Iron from Water Using Adsorbent Carbon. *Separation Science and Technology*, 39(2), 271–285. <https://doi.org/10.1081/ss-120027558>
- Nenohai, J. A., Minata, Z. S., Ronggopuro, B., Sanjaya, E. H., & Utomo, Y. (2023). Penggunaan Karbon Aktif dari Biji Kelor dan Berbagai Biomassa Lainnya dalam Mengatasi Pencemaran Air: Analisis Review. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 21(1), 29–35. <https://doi.org/10.14710/jil.21.1.29-35>
- Nwabgara, V. U., Chigayo, K., Iyama, W. A., & Kwaambwa, H. M. (2022). Removal of lead, cadmium, and copper

- from water using Moringa oleifera seed biomass. *Journal of Water and Climate Change*, 13(7), 2747–2760. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.091>
- Olabanji, T. O., Ojo, O. M., Williams, C. G., & Adewuyi, A. S. (2021). Assessment of Moringa oleifera Seeds as a Natural Coagulant in Treating Low Turbid Water. *FUOYE: Journal of Engineering and Technology*, 6(4). <https://doi.org/10.46792/fuoyejt.v6i4.702>
- Pramanik, B. K., Pramanik, S. K., & Suja, F. (2015). A comparative study of coagulation, granular- and powdered-activated carbon for the removal of perfluorooctane sulfonate and perfluorooctanoate in drinking water treatment. *Environmental Technology*, 36(20), 2610–2617. <https://doi.org/10.1080/09593330.2015.1040079>
- Pujiastuti, P., Wibowo, Y. M., & Narimo. (2022). Moringa Seed Powder Biocoagulant (Moringa oleifera) for Improving Laboratory Wastewater Quality. *Molekul*, 17(3), 301–310. <https://doi.org/10.20884/1.jm.2022.17.3.5461>
- Pujiastuti Peni. (2024). *Monograf: Polutan Organik dalam Air* (Azhari Tiara, Ed.; 1st ed., Vol. 1). Deepublish.
- Ribeiro, J. P., & Nunes, M. I. (2021). Recent trends and developments in Fenton processes for industrial wastewater treatment – A critical review. In *Environmental Research* (Vol. 197). Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110957>
- Rika Wahyuningsih. (2022). *Analisis Chemical Oxygen Demand (COD) Pada Air Limbah Tahu Dengan Penambahan Reagen Fenton*. Universitas Setia Budi.
- Salmi Abdullah, N., Hazwan Hussin, M., Syima Sharifuddin, S., & Azroie Mohamed Yusoff, M. (2017). Preparation and Characterization of Activated Carbon from Moringa Oleifera Seed Pod. In *Special Issue Sci.Int.(Lahore)* (Vol. 29, Issue 1).
- Santos, T. M., da Silva, J. V., da Silva, G. F., & Pontes, L. A. M. (2021). Development of a low-cost adsorbent obtained from moringa oleifera and functionalized with iron nanoparticles for removal of oil from produced water. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 11(5), 13214–13231. <https://doi.org/10.33263/BRIAC115.1321413231>
- Shah, A., Manning, G., Zakharova, J., Arjunan, A., Batool, M., & Hawkins, A. J. (2024). Particle size effect of Moringa oleifera Lam. seeds on the turbidity removal and antibacterial activity for drinking water treatment. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 6, 370–379. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enceco.2024.07.008>
- Shan, T. C., Matar, M. Al, Makky, E. A., & Ali, E. N. (2017). The use of Moringa oleifera seed as a natural coagulant for wastewater treatment and heavy metals removal. *Applied Water Science*, 7(3), 1369–1376. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0499-8>
- Silveira, F. M. R., Baptista, A. T. A., Dutra, T. V., de Abreu Filho, B. A., Gomes, R. G., & Bergamasco, R. (2020). Application of Moringa oleifera Lam. Fractionated proteins for inactivation of Escherichia coli from water. *Water Science and Technology*, 81(2), 265–273. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.094>
- Suresh Kumar, P., Korving, L., Keesman, K. J., van Loosdrecht, M. C. M., & Witkamp, G. J. (2019). Effect of pore size distribution and particle size of porous metal oxides on phosphate adsorption capacity and kinetics. *Chemical Engineering Journal*, 358, 160–169. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.202>
- Tamas Isna Nufussilma. (2017). *TAMAS 2017_FENTON*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Tayi Preethi Rangamani, Mudigeti Srinivasulu, Gogula Sreedevi, & Tanuku Srinivas. (2023). View of Optimization and Removal of Heavy Metals from Groundwater Using Moringa Extracts and Coconut Shell Carbon Powder. <https://doi.org/https://doi.org/10.52756/ijerr.2023.v3i36.008>
- Teclegeorghish, Z. W., Aphane, Y. M., Mokgalaka, N. S., Steenkamp, P., & Tembu, V. J. (2021). Nutrients, secondary metabolites and anti-oxidant activity of Moringa oleifera leaves and Moringa-based commercial products. *South African Journal of Botany*, 142, 409–420. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.07.008>
- Tugiyono, T., Setiawan, A., Suharso, S., Risgianto, A., Huda, M. N., & Hadi, S. (2023). Evaluation of the Water Quality Status and Pollution Load Carrying Capacity of Way Umpu River, Way Kanan District, Lampung Province, Indonesia, Based on Land Use. *International Journal of Ecology*, 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/2689879>
- Wang, C., Jiang, R., Yang, J., & Wang, P. (2022). Enhanced Heterogeneous Fenton Degradation of Organic Pollutants by CRC/Fe3O4 Catalyst at Neutral pH. *Frontiers in Chemistry*, 10. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.892424>
- Wijayanti, M. S., Agustina, T. E., Dahlan, M. H., & Teguh, D. (2023). Pengolahan Air Limbah Laboratorium Menggunakan AOPs Secara Terintegrasi. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(1), 142–149. <https://doi.org/10.14710/jil.22.1.142-149>
- Xu, H., Gao, Q., & Yuan, B. (2022). Analysis and identification of pollution sources of comprehensive river water quality: Evidence from two river basins in China. *Ecological Indicators*, 135. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108561>
- Yu, Z. (2019). Research on absorbing performance of activated carbon. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 563(2). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/563/2/022023>
- Zhang, Y., Shaad, K., Vollmer, D., & Ma, C. (2021). Treatment of textile wastewater using advanced oxidation processes—a critical review. In *Water (Switzerland)* (Vol. 13, Issue 24). MDPI. <https://doi.org/10.3390/w13243515>