



Kombinasi katalis FeSO_4 dan H_2O_2 dalam penanganan air limbah agroindustri kopi menggunakan metode foto Fenton

Elida Novita^{1*}, Nurfila Sari Sudirman¹, Hendra Andiananta Pradana², Asmak Afriliana³, Soni Sisbudi Harsono¹, Bambang Herry Purnomo⁴, Tjahjo Hartono⁵

¹Teknik Pertanian, Universitas Jember, Jember, Indonesia

²Program Pascasarjana, Universitas Jember, Jember, Indonesia

³Teknologi Hasil Pertanian, Universitas Jember, Jember, Indonesia

⁴Teknologi Industri Pertanian, Universitas Jember, Jember, Indonesia

⁵Teknik Sipil, Universitas Ibn Khaldun, Bogor, Indonesia

Article history

Diterima:

5 Juli 2024

Diperbaiki:

5 Januari 2025

Disetujui:

14 Januari 2025

Keyword

Advanced oxidation
processes (AOPs);

Catalis;

Coffee processing;

Wastewater quality
improvement

ABSTRACT

Wastewater production from the coffee agroindustry is generally brown. Melanoidin contents cause it and the high content of organic matter in coffee processing wastewater can impact water pollution. Turbid coffee processing wastewater can prevent sunlight from entering the water if it is channeled directly into water bodies without prior treatment. The research aims to improve the quality of coffee processing wastewater using the photo Fenton method, which combines catalyst reagents from H_2O_2 and FeSO_4 . The stages of the research consist of adjusting the pH of the process, combining H_2O_2 and FeSO_4 dosages, irradiating using UV light, settling, and analyzing wastewater quality improvements with parameters i.e. Total Suspended Solid (TSS), turbidity, color, pH, and Chemicals Oxygen Demand (COD). The research results show that adding H_2O_2 and FeSO_4 treatment in the Fenton photo can improve the quality of coffee processing wastewater. H2F1 treatment (H_2O_2 0.2 M and FeSO_4 0.0015 M) is the best alternative for reducing TSS, turbidity, color, and COD parameters. The percentage reduction values for TSS, turbidity, color, and COD is sequentially 95.55; 98.40; 93.97; and 72.47 %. The combination of H_2SO_4 and FeSO_4 catalysts can be used as an alternative tertiary method for coffee agro-industrial wastewater purification which is effective and efficient.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

* Penulis korespondensi

Email : elida_novita.ftp@unej.ac.id

DOI 10.21107/agrointek.v19i4.26362

PENDAHULUAN

Agroindustri kopi merupakan salah satu sektor yang berperan penting dalam menopang perekonomian nasional. Produksi kopi nasional diestimasikan akan mengalami fluktuasi pada tahun 2022-2026 dan mengalami peningkatan pada periode 2025 – 2026. Estimasi produksi kopi gabah di tahun 2026 yakni 789.220 ton dengan presentase kenaikan sebesar 0,01% (Widaningsih 2022). Secara umum dikenal tiga metode pengolahan kopi yakni olah kering, semi basah, dan olah basah. Olah semi basah dan basah menghasilkan kualitas kopi yang lebih baik dari secara fisik ataupun rasa daripada metode olah kering (Mangku et al. 2022). Akan tetapi pengolahan metode tersebut kurang ramah lingkungan karena menghasilkan air limbah yang berpotensi mencemari lingkungan jika tidak ditangani terlebih dahulu (Ijanu et al. 2020, Campos et al. 2021, Firdissa et al. 2022). Input air yang digunakan dalam pengolahan kopi dengan metode ini sebesar 7-9 m³ per ton buah kopi (Novita et al. 2021).

Air limbah yang dihasilkan dari pengolahan kopi cenderung berwarna coklat dan mengandung bahan organik yang tinggi. Komponen utama yang terkandung dalam air limbah kopi adalah melanoidin (Novita 2001). Melanoidin merupakan produk akhir dari reaksi Maillard, terdiri dari grup ligan seperti tanin dan polisakarida. Melanoidin memiliki sifat makromolekul dan berwarna coklat gelap yang sulit didegradasi dengan penanganan fisik maupun biologis (Novita 2001, Ijanu et al. 2020). Warna coklat gelap yang berasal dari melanoidin dapat menghalangi cahaya masuk ke perairan sehingga menghambat proses fotosintesis dan membahayakan kehidupan akuatik apabila dibuang langsung ke perairan. Berdasarkan penelitian terdahulu diketahui bahwa *effluent* air limbah pengolahan kopi 3,8-5,5, TSS berkisar 127-140 mg/l, COD berkisar 3360-3762 mg/l dan kekeruhan berkisar 395-523 NTU (Novita et al. 2019, Novita et al. 2023). Tingginya kandungan bahan organik pada air limbah tersebut mengakibatkan berkurangnya jumlah oksigen di perairan dan berpotensi menyebabkan pencemaran jika dibuang langsung ke badan air atau lingkungan tanpa dilakukan penanganan terlebih dahulu. Oleh karena itu, perlu dilakukan penanganan air limbah yang sesuai untuk mendegradasi warna dan menurunkan kandungan bahan organik dalam air limbah kopi agar sesuai

dengan baku mutu yang telah diatur dalam Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Tahun 2014 tentang bagi usaha dan/atau kegiatan industri pengolahan kopi.

Struktur melanoidin yang kompleks mengakibatkan air limbah sulit didegradasi secara biologis. Beberapa pendekatan metode penanganan limbah berwarna yang digunakan dianggap kurang efektif karena dapat menimbulkan permasalahan baru. Aplikasi penanganan air limbah pengolahan kopi menggunakan proses anaerobik kurang optimal pada parameter kekeruhan dan warna karena hanya fokus pada proses degradasi bahan organik dengan bantuan mikroorganisme (Hailemariam et al. 2021). Kemudian, metode ini akan menghasilkan *effluent* yang masih berbau akibat reaksi produksi gas metan dan amonia. Beberapa penelitian terdahulu sudah dilakukan penelitian untuk mendegradasi kandungan bahan organik dalam air limbah kopi. Pengolahan air limbah kopi dengan penanganan kimia menggunakan metode koagulasi dan flokulasi menghasilkan efisiensi COD sebesar 61,63% namun dalam aplikasinya memerlukan teknologi yang mudah untuk diterapkan (Novita et al. 2021). Pada penanganan air limbah kopi menggunakan metode fitoremediasi dihasilkan efisiensi COD sebesar 81,10 % tetapi dalam praktiknya membutuhkan waktu yang lebih lama (Novita et al. 2023). Salah satu penanganan air limbah yang efektif untuk mendegradasi air limbah yang berwarna dan mengandung senyawa kimia yang bersifat toksik adalah metode foto Fenton (Fauzi and Agung 2018).

Metode foto Fenton merupakan pengembangan dari metode oksidasi kimia lanjut (*Advanced Oxidation Reaction* - AOPs). Metode Fenton bekerja dengan cara mengoksidasi bahan organik pada air limbah dengan reagen Fenton dan bantuan penyinaran sinar UV untuk membentuk radikal OH yang digunakan untuk mendegradasi bahan organik maupun anorganik dalam air limbah. Komponen utama dalam proses foto Fenton adalah pembentukan radikal OH yang terbentuk dari dekomposisi hidrogen peroksida sebagai oksidator dan dipercepat oleh ion Fe²⁺ sebagai katalisator. Penggunaan sinar UV pada reaksi Fenton akan mempercepat dan memperbanyak radikal OH yang terbentuk (Wijayanti et al. 2024).

Katalisator yang lazim dan memiliki daya dukung yang relatif optimal pada metode foto

Fenton yaitu katalis $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. Pada percobaan perbaikan kualitas air limbah *laundry* dan tekstil menggunakan metode foto Fenton dengan katalis $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ mampu mereduksi bahan organik dengan rentang nilai 85-90 % (Setiawan and Widayanti 2023; Hamed et al. 2024). Foto Fenton merupakan salah satu metode yang dianggap metode yang mudah untuk diaplikasikan dan relatif efektif dalam mereduksi COD pada air limbah pencucian dari hasil pengupasan (Agustina et al. 2016). Salah satu faktor yang mempengaruhi optimalisasi proses foto Fenton adalah pembentukan radikal OH yang tergantung pada dosis reagen Fenton, pH larutan, dan lama penyinaran sinar UV (Wijayanti et al. 2024). Pada aplikasinya, katalis FeSO_4 dan H_2SO_4 harus seimbang agar proses foto Fenton berjalan optimal. Tujuan penelitian untuk perbaikan kualitas air limbah pengolahan kopi menggunakan metode foto Fenton dengan kombinasi reagen katalis dari H_2O_2 dan FeSO_4 .

METODE

Bahan dan Lokasi Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian adalah air limbah pengolahan kopi pada proses pengupasan di Agroindustri Kopi Rumah Kopi Banjarsengon, Kecamatan Patrang, Kabupaten Jember, bahan kimia (pro analisis) yang digunakan yaitu larutan yang terdiri atas senyawa H_2O_2 dan H_2SO_4 , adapun NaOH dan FeSO_4 berbentuk padatan, air suling bebas ion (*aquadest*), dan reagen COD *High Range* (HR) merek Hanna HI 839800 (*range detection* 200 – 15.000 mg/l). Selanjutnya lokasi proses foto Fenton dan uji sampel penelitian dilakukan di Laboratorium Teknik dan Pengendalian Konservasi Lingkungan Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Jember, Kabupaten Jember, dan Provinsi Jawa Timur.

Persiapan Penelitian

Persiapan penelitian terdiri atas preparasi dan pengukuran karakteristik awal air limbah pengolahan kopi. Tahapan penyaringan dilakukan untuk mengondisikan agar air limbah pengolahan kopi tidak tercampur dengan zat-zat padat yang memiliki ukuran cukup besar seperti sisa kulit buah kopi, gumpalan lendir, ranting-ranting dan sejenisnya. Upaya ini dilakukan agar foto-Fenton tidak terkendala oleh bahan-bahan tersebut yang berdampak pada pembentukan radikal OH (Rizki dan Agung 2020). Penyaringan air limbah

pengolahan kopi dilakukan menggunakan kain saring dan ditampung pada beaker glass 250 mL. Alat penyaring yang digunakan memiliki ukuran 40 mesh atau masing – masing lubang berukuran 0,425 mm. Tahapan selanjutnya yakni pengukuran karakteristik air limbah pengolahan kopi terhadap parameter TSS, kekeruhan, warna, COD, dan pH. Analisis TSS dilakukan secara gravimetri dengan SNI 6989.3:2019, COD secara spektrofotometer refluks tertutup SNI 6989.2:2019, absorbansi warna secara spektrofotometri SNI 6989.80:2011 dan pH menggunakan pH meter SNI 6989.11:2019.

Prosedur Penelitian

Setelah persiapan penelitian dilakukan, tahapan penelitian selanjutnya yakni variasi penambahan dosis H_2O_2 dan FeSO_4 , pengaturan atau pengondisian pH air limbah pengolahan kopi, proses foto Fenton pada foto reaktor, pengukuran parameter akhir air limbah (TSS, COD, kekeruhan, warna, dan pH), dan analisis data menggunakan metode statistik kuantitatif parametrik.

Tujuan penentuan dosis reagen adalah menentukan rentang molar dosis reagen Fenton yang akan digunakan. Besarnya kebutuhan H_2O_2 ditentukan dari besarnya konsentrasi awal kadar COD air limbah yang akan digunakan. Besaran H_2O_2 secara teoritis berkisar 2,12 mg untuk mengoksidasi 1 mg BOD/COD (Putri et al. 2020). Persamaan (1), (2), dan (3) merupakan formulasi yang digunakan untuk menentukan dosis (molaritas) dari H_2O_2 . Penetapan kebutuhan reagen FeSO_4 ditentukan setelah kebutuhan H_2O_2 diketahui. Kebutuhan katalis FeSO_4 yakni 1/20 – 1/50 bagian dari berat H_2O_2 (Sari et al. 2019).

$$C_{\text{H}_2\text{O}_2} = \text{Nilai COD} \times 2,12 \quad (1)$$

$$\text{Molar}_{\text{H}_2\text{O}_2} = C_{\text{H}_2\text{O}_2} \times \text{mr}_{\text{H}_2\text{O}_2} \quad (2)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}_2} = M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2 \quad (3)$$

Keterangan,

$C_{\text{H}_2\text{O}_2}$ = Konsentrasi hidrogen peroksida (mg/l)

$\text{mr}_{\text{H}_2\text{O}}$ = Massa atom relatif hidrogen peroksida

M_1 = Molaritas 1 (M) H_2O_2

M_2 = Molaritas 2 (M) H_2O_2

V_1 = Volume 1 (L) H_2O_2

V_2 = Volume 2 (L) H_2O_2

Setelah dosis reagen atau katalis diketahui, dilanjutkan karakterisasi nilai awal COD bertujuan untuk menentukan jumlah H_2O_2 yang akan digunakan. Air limbah kopi sebanyak 250 mL air limbah kopi dimasukkan ke dalam labu takar kemudian dituang ke dalam beaker glass 250 mL, pH sampel diatur menjadi pH 3 dengan menggunakan H_2SO_4 0,1 M atau NaOH 0,1 M. Beaker glass yang berisi sampel diletakkan di atas plat *hot and stirrer* kemudian ditambahkan *magnetic stirrer* untuk menghomogenkan antara air limbah dan reagen Fenton, kemudian ditambahkan reagen Fenton sesuai kombinasi rancangan percobaan. Beaker glass yang berisi sampel tersebut dimasukkan ke dalam box foto *reactor* selama 120 menit, kemudian diendapkan selama 120 menit. Filtrat yang diperoleh dianalisis karakteristiknya meliputi parameter TSS, warna, COD, dan pH.

Desain Percobaan

Desain percobaan pada penelitian ini disusun dengan Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan

2 faktor yaitu H_2O_2 dan FeSO_4 dan dilakukan pengulangan sebanyak 3 kali ulangan. Faktor pertama yaitu perlakuan dosis H_2O_2 yang terdiri dari 3 taraf perlakuan yaitu konsentrasi H_2O_2 0,1 M; 0,2 M dan 0,3 M. Faktor kedua yaitu perlakuan dosis FeSO_4 yang terdiri dari 6 taraf perlakuan yaitu konsentrasi FeSO_4 0,0015 M; 0,003 M; 0,006 M; 0,012 M dan 0,036 M. Perlakuan dalam penelitian merupakan kombinasi antar faktor dari seluruh taraf perlakuan. Dengan demikian diketahui bahwa masing-masing perlakuan dilakukan dalam 3 kali pengulangan, sehingga keseluruhan menghasilkan 54 perlakuan, yaitu $3 \times 6 \times 3$ unit percobaan. Tujuannya untuk mengetahui kombinasi dosis reagen Fenton (H_2O_2 dan FeSO_4) terbaik yang efektif untuk mendegradasi kandungan bahan organik dan warna pada air limbah kopi. Data hasil pengamatan selanjutnya dihitung nilai efisiensi dan dianalisis menggunakan statistik. Rancangan percobaan yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Kombinasi rancangan percobaan

Dosis Reagen Fenton		Dosis FeSO_4 (M)					
		0,0015	0,003	0,006	0,012	0,024	0,036
		F1	F2	F3	F4	F5	F6
Dosis H_2O_2 (M)	H1 (0,1)	H1F1 (0,1 H_2O_2 ; 0,0015 FeSO_4)	H1F2 (0,1 H_2O_2 ; 0,003 FeSO_4)	H1F3 (0,1 H_2O_2 ; 0,006 FeSO_4)	H1F4 (0,1 H_2O_2 ; 0,012 FeSO_4)	H1F5 (0,1 H_2O_2 ; 0,024 FeSO_4)	H1F6 (0,1 H_2O_2 ; 0,036 FeSO_4)
		H2F1 (0,2 H_2O_2 ; 0,0015 FeSO_4)	H2F2 (0,2 H_2O_2 ; 0,003 FeSO_4)	H2F3 (0,2 H_2O_2 ; 0,006 FeSO_4)	H2F4 (0,2 H_2O_2 ; 0,012 FeSO_4)	H2F5 (0,2 H_2O_2 ; 0,024 FeSO_4)	H2F6 (0,2 H_2O_2 ; 0,036 FeSO_4)
		H3F1 (0,3 H_2O_2 ; 0,0015 FeSO_4)	H3F2 (0,3 H_2O_2 ; 0,003 FeSO_4)	H3F3 (0,3 H_2O_2 ; 0,006 FeSO_4)	H3F4 (0,3 H_2O_2 ; 0,012 FeSO_4)	H3F5 (0,3 H_2O_2 ; 0,024 FeSO_4)	H3F6 (0,3 H_2O_2 ; 0,036 FeSO_4)

Keterangan,

- F1 = Dosis FeSO_4 0,00015 M
- F2 = Dosis FeSO_4 0,003 M
- F3 = Dosis FeSO_4 0,006 M
- F4 = Dosis FeSO_4 0,012 M
- F5 = Dosis FeSO_4 0,024 M
- F6 = Dosis FeSO_4 0,036 M
- H1 = Dosis H_2O_2 0,1 M
- H2 = Dosis H_2O_2 0,2 M
- H3 = Dosis H_2O_2 0,3 M

Metode Analisis Data

Analisis penurunan parameter yang diamati didekati dengan nilai efisiensinya. Nilai efisiensi dihitung dengan menghitung persentase pengurangan konsentrasi parameter air limbah yang diamati dengan menggunakan Persamaan (4).

$$Eff = \left(\frac{Co - Ci}{Co} \right) \times 100 \% \quad (4)$$

Keterangan,

- Eff = Persentase efisiensi penurunan (%)
 Co = Konsentrasi awal parameter air limbah (mg/l)
 Ci = Konsentrasi akhir parameter air limbah (mg/l)

Identifikasi pengaruh kombinasi perlakuan dosis katalis FeSO₄ dan H₂O₂ pada proses foto Fenton dilakukan uji *Analisis of Varians (two way Anova)* dengan interaksi menggunakan *Microsoft Excel* dengan taraf nyata sebesar 0,05 atau 5 % untuk menentukan hipotesis diterima atau ditolak. Hasil uji Anova yang menunjukkan adanya perbedaan nyata dilakukan uji lanjut yakni uji *Duncan Multiple Range Test (DMRT)*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Air Limbah Pengolahan Kopi

Sampel yang digunakan merupakan air limbah kopi setelah proses pengupasan. Karakteristik awal air limbah kopi dapat disajikan pada Tabel 2. Berdasarkan nilai tersebut parameter *chemical oxygen demand* (COD), *total suspended solid* (TSS) dan pH tidak memenuhi baku mutu yang telah ditetapkan oleh Menteri Lingkungan Nomor 5 Hidup Tahun 2014.

Tabel 2 Karakteristik awal air limbah pengolahan kopi

Parameter Pengamatan	Hasil	Baku Mutu*	Satuan
TSS	377,33	150	mg/l
Kekeruhan	262,83	-	NTU
Warna	2,33	-	AU
COD	6663	200	mg/l
pH	4,34	6-9	-

Sumber: *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014

Air limbah yang digunakan merupakan keluaran dari proses *pulping*. Menurut Novita et

al. (2021), air limbah pengolahan kopi pada pengolahan basah banyak dihasilkan dari proses pengupasan kulit buah (*pulping*) dan pencucian biji (*washing*) setelah fermentasi. Hasil dari pengolahan kopi tersebut dibuang ke saluran yang berada didekat proses pengolahan tanpa adanya penanganan terlebih dahulu. Representasi kondisi visual air limbah pengolahan kopi disajikan pada Gambar 1. Besarnya nilai TSS yang didapatkan pada pengukuran karakteristik awal sebesar 377,56 mg/l berada diatas baku mutu yang telah ditetapkan. Kandungan TSS pada air limbah kopi berasal dari sisa-sisa lendir pada proses sebelumnya (Izzah et al. 2020). Kekeruhan air sebesar 262,83 NTU. Tingginya nilai kekeruhan disebabkan oleh banyaknya partikel – partikel yang tersuspensi seperti kulit ari dan sisa-sisa lendir hasil dari proses pengupasan dan pencucian setelah pengupasan. Kemudian secara visual, air limbah pengolahan kopi berwarna cokelat.



Gambar 1 Air limbah agroindustri kopi

Nilai absorbansi warna awal air limbah pengolahan kopi sebesar 2,33 *Absorbance Units* (AU) sehingga tampak secara visual air limbah pengolahan kopi berwarna cokelat yang dapat dilihat pada Gambar 1. Tingginya nilai absorbansi warna disebabkan oleh adanya kandungan melanoidin pada air limbah kopi. Kandungan melanoidin merupakan senyawa yang terbentuk dari reaksi Maillard. Hal tersebut sesuai dengan kandungan yang terdapat pada pulp kopi yaitu gula, protein, mineral, asam amino (Campos et al. 2021). Melanoidin merupakan senyawa yang terbentuk dari gula pereduksi dan protein atau asam amino.

Nilai COD pada air limbah kopi sebesar 6.663 mg/l melebihi baku mutu yang sudah ditetapkan. Tingginya nilai COD disebabkan oleh adanya senyawa kimia seperti melanoidin. Melanoidin merupakan senyawa makromolekul

sehingga sulit didegradasi secara biologis maupun secara fisik (Ijanu et al. 2020). Hal tersebut mengakibatkan jumlah oksigen di perairan berkurang dan meningkatkan kadar BOD dan COD jika dialirkan langsung ke badan air tanpa penanganan terlebih dahulu. Nilai pH pada air limbah kopi tergolong asam yaitu berkisar 4,34. Rendahnya nilai pH air limbah kopi disebabkan oleh sisa-sisa lendir yang terdapat pada kulit kopi (Izzah et al. 2020).

Efisiensi Parameter *Total Suspended Solid* (TSS)

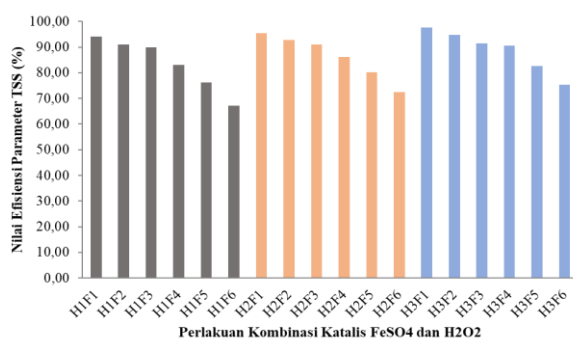
Gambar 2(a) menunjukkan bahwa semua perlakuan dosis reagen Fenton dapat menurunkan kadar TSS air limbah pengolahan kopi hingga memenuhi baku mutu yang telah ditetapkan oleh Menteri Lingkungan Hidup Tahun 2014. Grafik efisiensi penurunan TSS menunjukkan bahwa nilai efisiensi TSS tertinggi pada kombinasi perlakuan H3F1 dengan konsentrasi H_2O_2 0,3 M dan FeSO_4 0,0015 M yaitu sebesar 97,64 %, dan disusul dengan perlakuan H2F1 dengan nilai efisiensi 95,50 % sedangkan efisiensi TSS terendah terjadi pada kombinasi perlakuan H1F6 dengan konsentrasi H_2O_2 0,1 M dan FeSO_4 0,036 M yaitu sebesar 67,08 %. Hasil uji Anova *two ways* dan uji lanjut Duncan yang menunjukkan nilai $F_{\text{hitung}} < F_{\text{tabel}}$ yang berarti tidak terdapat pengaruh kombinasi perlakuan H_2O_2 dan FeSO_4 terhadap nilai TSS air limbah pengolahan kopi. Nilai efisiensi TSS semakin meningkat pada penambahan konsentrasi H_2O_2 , tetapi pada penambahan konsentrasi FeSO_4 efisiensi TSS cenderung menurun. Kombinasi perlakuan penambahan H_2O_2 dan FeSO_4 tidak berpengaruh nyata terhadap penurunan parameter TSS. Fenomena ini terjadi akibat terdapat proses pengendapan ion Fe yang relatif tinggi, pembentukan radikal OH, selanjutnya degradasi bahan organik kurang optimal sehingga nilai TSS meningkat pada perlakuan ini. Sejalan dengan hal tersebut ketidaksetimbangan atau berlebihnya kadar FeSO_4 berdampak pada pengendapan ion Fe dan memengaruhi peningkatan nilai TSS hasil *effluent* pengolahan limbah tekstil menggunakan foto Fenton (Hamed et al. 2024). Semakin besar konsentrasi H_2O_2 maka semakin banyak radikal OH yang terbentuk untuk mengoksidasi kandungan bahan organik dalam air limbah. Pada

perlakuan H1, konsentrasi H_2O_2 yang ditambahkan belum cukup maksimal untuk memenuhi kebutuhan radikal OH dalam mengoksidasi partikel tersuspensi. Kurang ketersediaan H_2O_2 menyebabkan kurangnya radikal OH yang terbentuk sehingga memperlambat proses degradasi senyawa (Putri et al. 2020).

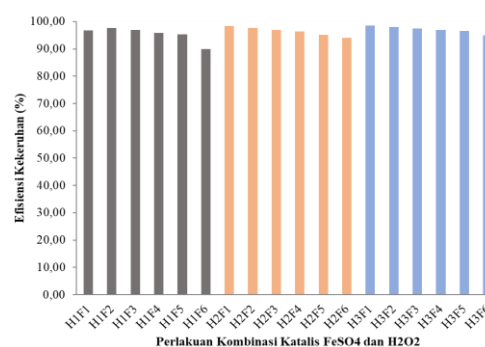
Efisiensi Parameter Kekeruhan

Gambar 2(b) menunjukkan bahwa semua perlakuan dapat menurunkan kekeruhan air limbah pengolahan kopi. Berdasarkan hasil penelitian diperoleh efisiensi kekeruhan tertinggi pada kombinasi perlakuan H3F1 dengan konsentrasi H_2O_2 0,3 M dan FeSO_4 0,0015 M yaitu sebesar 98,59 %, dan disusul oleh perlakuan H2F1 dengan nilai 98,40 % sedangkan efisiensi terendah pada perlakuan H1F6 dengan konsentrasi H_2O_2 0,1 M dan FeSO_4 0,036 M yaitu sebesar 89,87 %. Penurunan nilai kekeruhan disebabkan oleh adanya penambahan reagen Fenton yang dapat mengoksidasi bahan organik dalam air limbah menjadi partikel sederhana dan mudah mengendap. Ion Fe^{2+} dan Fe^{3+} dapat berfungsi sebagai koagulan yang mampu mengikat padatan tersuspensi membentuk flokulan dan mengendap di dasar larutan. Flokulan yang tidak terpresipitasi dengan sempurna dapat mengapung dan melayang pada sistem. Jika massa jenis flok lebih kecil daripada massa jenis air yang mengakibatkan efek *tyndall* yaitu penghamburan berkas sinar (cahaya) oleh partikel tersuspensi maupun terlarut yang mengakibatkan efisiensi menurun (Fauzi and Agung 2018).

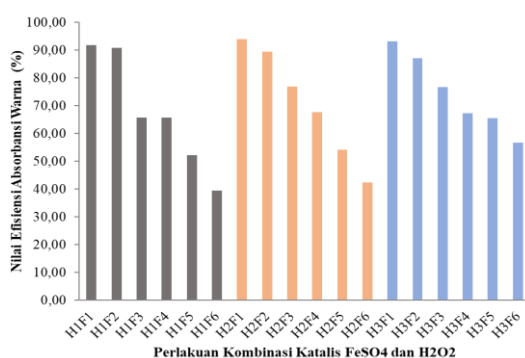
Kombinasi perlakuan penambahan H_2O_2 dan FeSO_4 berpengaruh nyata terhadap penurunan parameter kekeruhan. Hal ini didukung dengan hasil uji Anova *two ways* dan uji lanjut Duncan yang menunjukkan nilai $F_{\text{hitung}} > F_{\text{tabel}}$ yang berarti terdapat pengaruh kombinasi perlakuan H_2O_2 dan FeSO_4 terhadap nilai kekeruhan air limbah pengolahan kopi. Nilai kekeruhan berbanding lurus dengan nilai TSS sehingga degradasi partikel tersuspensi dipengaruhi oleh banyaknya flok-flok yang terbentuk. Semakin banyak flok-flok yang terbentuk maka semakin besar penurunan padatan tersuspensi dalam air limbah.



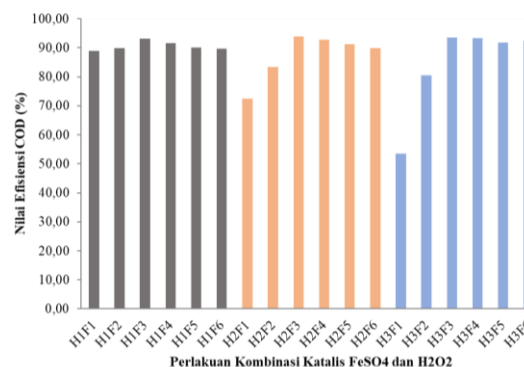
Nilai Efisiensi Parameter TSS (a)



Nilai Efisiensi Parameter Kekeruhan (b)



Nilai Efisiensi Parameter Warna (c)



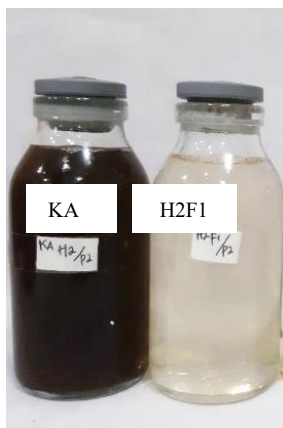
Nilai Efisiensi Parameter COD (d)

Gambar 2 Nilai efisiensi parameter TSS, kekeruhan, warna, dan COD

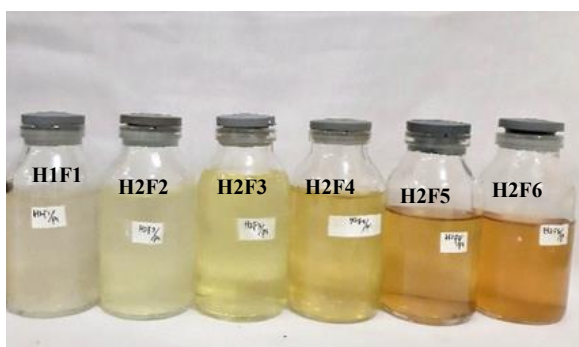
Efisiensi Parameter Absorbansi Warna

Semakin tinggi efisiensi yang diperoleh maka nilai absorbansi yang dihasilkan semakin rendah. Semakin rendah nilai absorbansi warna, semakin mendekati *blanko* atau kontrol (KA). Gambar 2(c) menunjukkan bahwa semua kombinasi perlakuan dosis reagen Fenton dapat menurunkan nilai absorbansi warna air limbah kopi yang berwarna coklat. Berdasarkan hasil penelitian diperoleh efisiensi kekeruhan tertinggi pada kombinasi perlakuan H2F1 dengan konsentrasi H_2O_2 0,2 M dan FeSO_4 0,0015 M yaitu sebesar 93,97%, sedangkan efisiensi terendah pada perlakuan H1F6 dengan konsentrasi H_2O_2 0,1 M dan FeSO_4 0,036 M yaitu sebesar 39,44%. Penurunan nilai disebabkan oleh terbentuknya radikal OH yang dapat mengoksidasi bahan organik dalam air limbah menjadi partikel yang mudah terurai. Fenol merupakan salah satu senyawa yang membentuk melanoidin. Visualisasi hasil penjernihan air limbah pengolahan kopi menggunakan foto Fenton dapat dilihat pada Gambar 3.

Kombinasi perlakuan penambahan H_2O_2 dan FeSO_4 tidak berpengaruh nyata terhadap penurunan parameter absorbansi warna. Hal ini didukung dengan hasil uji Anova *two ways* dan uji lanjut Duncan yang menunjukkan nilai F hitung < F tabel yang berarti tidak terdapat pengaruh kombinasi perlakuan H_2O_2 dan FeSO_4 terhadap nilai absorbansi warna air limbah pengolahan kopi. Hal ini berarti bahwa perlakuan variasi dosis katalis H_2O_2 dan FeSO_4 tidak memiliki pengaruh yang signifikan pada parameter absorbansi warna. Hasil percobaan semakin besar penambahan konsentrasi FeSO_4 warna air limbah kopi menjadi kemerahan. Perubahan warna tersebut adanya ion besi berlebih yang terlarut di dalam air limbah sehingga meningkatkan nilai absorbansi warna. Penambahan katalis FeSO_4 yang berlebih mengakibatkan keberadaan ion Fe^{2+} berlebih akan bereaksi dengan dengan radikal OH yang sudah terbentuk, dengan demikian pembentukan radikal OH yang akan digunakan untuk mendegradasi warna berkurang (Wirandani et al. 2017).



(a) perbandingan hasil Fenton H2F1 terhadap kontrol (KA)



(b) hasil perlakuan foto Fenton semua perlakuan

Gambar 3 Visualisasi warna air limbah hasil foto Fenton

Efisiensi Parameter COD

Berdasarkan hasil penelitian diperoleh efisiensi COD tertinggi pada kombinasi perlakuan H2F3 dengan konsentrasi H_2O_2 0,2 M dan FeSO_4 0,006 M yaitu sebesar 93,91%, sedangkan efisiensi terendah pada perlakuan H3F1 dengan konsentrasi H_2O_2 0,3 M dan FeSO_4 0,0015 M yaitu sebesar 53,44% (Gambar 3(d)). Penurunan nilai COD disebabkan oleh adanya radikal OH yang terbentuk pada reaksi foto Fenton (Lesa et al. 2020). Adapun nilai efisiensi parameter COD pada perlakuan H2F1 adalah 72,47%. Semakin banyak reaksi antara H_2O_2 dan FeSO_4 maka semakin banyak radikal OH yang terbentuk untuk mengoksidasi zat organik sehingga dapat meningkatkan efisiensi penanganan (Lesa et al. 2020). Efisiensi akan menurun jika salah satu penambahan reagen tidak seimbang.

Air limbah pengolahan kopi memiliki kadar bahan organik terlarut yang cukup tinggi sehingga kombinasi katalis H_2SO_4 dan FeSO_4 pada proses foto Fenton sebaiknya digunakan sebagai alternatif metode tersier dalam penjernihan air

limbah agroindustri kopi yang relatif mudah diterapkan, efektif, dan efisien. Penambahan reagen yang berlebih atau tidak seimbang juga dapat meningkatkan nilai COD yang disebabkan oleh senyawa yang dapat teroksidasi sudah habis, sehingga sisa senyawa reagen Fenton terbaca sebagai polutan. Selain itu peningkatan nilai COD juga dapat disebabkan penggunaan sisa H_2O_2 yang tidak digunakan akan bereaksi dengan $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ sehingga sisa senyawa reagen Fenton terbaca sebagai polutan dalam air limbah (Putri et al. 2020).

Kombinasi perlakuan penambahan H_2O_2 dan FeSO_4 berpengaruh nyata terhadap penurunan parameter kekeruhan. Hal ini didukung dengan hasil uji Anova *two ways* dan uji lanjut Duncan yang menunjukkan nilai F hitung > F tabel yang berarti terdapat pengaruh kombinasi perlakuan H_2O_2 dan FeSO_4 terhadap nilai COD air limbah pengolahan kopi. Pada perlakuan H3F1 dengan konsentrasi H_2O_2 0,3 M dan FeSO_4 0,0015 M diketahui bahwa penambahan dosis yang diberikan tidak seimbang sehingga dihasilkan nilai rata-rata COD yang paling besar. Penambahan H_2O_2 yang berlebih dan kurang ketersediaan Fe^{2+} mengakibatkan berkurangnya jumlah produksi OH. Besarnya konsentrasi H_2O_2 atau kurangnya konsentrasi FeSO_4 yang ditambahkan pada proses foto Fenton akan mengakibatkan terjadinya *self saving* OH atau radikal OH yang terbentuk dari dekomposisi H_2O_2 bereaksi kembali dengan H_2O_2 menghasilkan HO_2 atau radikal hidroperoksil yang kurang reaktif (Fauzi and Agung 2018).

Rekomendasi Alternatif Kombinasi Reagen Foto Fenton

Variasi penambahan reagen dari H_2O_2 dan FeSO_4 berpengaruh positif dalam reduksi polutan dan penjernihan air limbah pengolahan kopi. Perlakuan ini berpengaruh nyata terhadap parameter kekeruhan dan COD. Selanjutnya, perlakuan H2F1 (H_2O_2 0,2 M dan FeSO_4 0,0015M) merupakan perlakuan paling efektif dan efisien yang direkomendasikan dari hasil kajian dengan nilai efisiensi yang disajikan pada Tabel 3.

Kesetimbangan penambahan H_2O_2 dan FeSO_4 memengaruhi hasil pengolahan air limbah pengolahan kopi baik secara visual maupun kandungan pH dan residu Fe. Jika penambahan reagen Fenton terlalu sedikit maka pembentukan radikal OH tidak maksimal sehingga proses foto Fenton tidak dapat berjalan secara optimal.

Selanjutnya, jika reagen foto Fenton dalam hal ini penambahan FeSO_4 terlalu banyak maka akan meningkatkan residu Fe dan perubahan warna air limbah pengolahan kopi menjadi kemerahan. Pelakuan H2F1 memiliki residu Fe sebesar 45,8 mg/l. Namun nilai tersebut belum memenuhi baku mutunya dengan nilai 10 mg/l yang merujuk pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014. Kemudian, hasil pengolahan air limbah pengolahan kopi cenderung asam dengan nilai pH yakni 1,68 – 4,34.

Tabel 3 Nilai efisiensi parameter kualitas air limbah pengolahan kopi

Perlakuan	Efisiensi (%)			
	TSS	Kekeruhan	Warna	COD
H1F1	94,2	96,80	91,73	88,86
H1F2	90,9	97,59	90,88	89,83
H1F3	90,0	96,93	65,66	93,05
H1F4	83,0	95,80	65,70	91,63
H1F5	76,1	95,26	52,20	90,13
H1F6	67,1	89,87	39,44	89,59
H2F1	95,5	98,40	93,97	72,47
H2F2	92,8	97,61	89,34	83,39
H2F3	91,1	96,97	76,96	93,91
H2F4	86,1	96,32	67,76	92,70
H2F5	80,2	95,21	54,16	91,28
H2F6	72,4	94,10	42,37	89,81
H3F1	97,6	98,59	93,23	53,44
H3F2	94,9	97,96	86,98	80,54
H3F3	91,5	97,51	76,62	93,50
H3F4	90,6	96,99	67,22	93,28
H3F5	82,7	96,60	65,58	91,83
H3F6	75,3	94,99	56,63	92,40

Hasil penanganan air limbah pengolahan kopi dengan metode foto Fenton cenderung asam sehingga diperlukan penanganan lanjut seperti netralisasi ataupun aerasi. Menurut (Wijayanti et al. 2024), pemanfaatan metode foto Fenton terintegrasi adsorpsi mampu mereduksi polutan pada air limbah laboratorium dan memiliki *effluent* dengan nilai pH cenderung netral. Metode foto Fenton direkomendasikan sebagai alternatif penanganan tersier untuk penjernihan air limbah pengolahan kopi yang dilanjutkan dengan tahap netralisasi *effluent*, setelah dilakukan penanganan terdahulu untuk menyisihkan atau mereduksi kandungan bahan organik yang relatif tinggi.

KESIMPULAN

Penambahan larutan H_2O_2 dan FeSO_4 pada foto Fenton dapat meningkatkan kualitas air

limbah pengolahan kopi secara positif. Perlakuan variasi dosis H_2O_2 0,2 M dan FeSO_4 0,0015M merupakan alternatif terbaik untuk menurunkan parameter TSS, kekeruhan, warna, dan COD. Kombinasi dosis H_2SO_4 dan FeSO_4 berpengaruh terhadap parameter kekeruhan dan COD. Nilai efisiensi TSS, kekeruhan, warna, dan COD berturut-turut sebesar 95,55; 98,40; 93,97; dan 72,47 %. Air limbah pengolahan kopi memiliki kadar bahan organik terlarut yang cukup tinggi sehingga kombinasi katalis H_2SO_4 dan FeSO_4 pada proses foto Fenton sebaiknya digunakan sebagai alternatif metode tersier dalam penjernihan air limbah agroindustri kopi yang relatif mudah diterapkan, efektif, dan efisien.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti ini merupakan bagian dari tugas akhir dan memenuhi syarat lulus pada Program Studi Teknik Pertanian dan Peneliti mengucapkan terima kasih pada Civitas Akademik Universitas Jember yang telah memberikan Pendanaan melalui Hibah Internal Skema Penelitian Percepatan Guru Besar tahun 2024. Lebih lanjut, penulis mengucapkan terima kasih juga kepada Agroindustri Kopi Klungkung dan Civitas Akademik Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Jember dalam menyediakan bantuan fasilitas dan eksplorasi data penelitian. Kemudian, penulis juga memberikan ucapan terima kasih kepada *Reviewer* atau penelaah jurnal sehingga artikel atau hasil penelitian ini disajikan lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustina, T. E., L. Kurnia, and D. Novilasari. 2016. Penggunaan Reagen Fenton dan Adsorpsi terhadap Penurunan Kadar COD pada Air Limbah Pencucian Biji Kopi. *Majalah Ilmiah Sriwijaya*, 27(13), 33-42.
- Campos, R. C., V. R. A. Pinto, L. F. Melo, S. J. S. S. da Rocha, and J. S. Coibra. 2021. New Sustainable Perspectives for “Coffee Wastewater” and Other by-Products: A Critical Review. *Future Food*, 4(2021), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100058>
- Fauzi, A. R. and T. R. Agung. 2018. Kombinasi Fenton dan Fotokatalis sebagai Alternatif Pengolahan Limbah Batik. *Envirotek: Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan*, 10(1), 37-45.

- <https://doi.org/10.33005/envirotek.v10i1.1166>
- Firdissa, E., A. Mohammed, G. Berecha, and W. Garedew. 2022. Coffee Drying and Processing Method Influence Quality of Arabica Coffee Varieties (Coffee arabica L.) at Gomma I and Limmu Kossa, Southwest Ethiopia. *Journal of Food Quality*, 2022, 1-8. <https://doi.org/10.1155/2022/9184374>
- Hailemariam, F. A., P. Velmurugan, and S. K. Selvaraj. 2021. Treatment of Wastewater from Coffee (Coffea arabica) Industries Using Mixed Culture Pseudomonas florescence and Escherichia coli Bacteria. *Materialstoday: Proceedings*, 46(17), 7396-7401. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.1124>
- Hamed, M. A. R., H. M. Hussein, and K. Elmaadawy. 2024. Radiant Remedies – Maximizing Wastewater Treatment Efficiency with Optimized Photo-Fenton Techniques. *Journal of Ecological Engineering*, 25(12), 324 – 332. <https://doi.org/10.12911/22998993/194957>
- Ijanu, E. M., M. A. Kamarudin, and F. A. Norashiddin. 2020. Coffee Wastewater Treatment: a Critical Review on Current Treatment Technologies with a Proposed Alternative. *Applied Water Science* 10(11): 1-11. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1091-9>
- Izzah, L., I. D. A. Susilawati, S. S. Harsono, D. Poernomo, D. Soejono, D. E. Munandar, E. Novita, and P. Purwanto. 2020. Kopi Desa Klungkung Lereng Gunung Hyang Argopuro. Jember, UPT Percetakan dan Penerbitan Universitas Jember.
- Lesa, W. S., M. Ali, and F. Rosariawari. 2020. Proses Foto Fenton dalam Reaktor Resirkulasi untuk Menyisihkan Beban Pencemar pada Lindi. *Jukung Jurnal Teknik Lingkungan*, 6(1), 54-65. <http://dx.doi.org/10.20527/jukung.v6i1.8239>
- Mangku, I. G. P., L. Suriati, D. G. Y. Ardana, and W.W. Putra. 2022. The Effects of Processing Methods on the Quality of Arabica Kintamani Green Beans. *International Journal of Food Studies*, 2022(11), 374-385. <https://doi.org/10.7455/ijfs/11.2.2022.a9>
- Novita, E. 2001. Optimasi Proses Koagulasi Flokulasi Pada Limbah Cair yang Mengandung Melanoidin. Skripsi, Fakultas Teknologi Pertanian, IPB University. <http://repository.ipb.ac.id:8080/handle/123456789/140725?show=full>. [diakses pada 12 Januari 2024].
- Novita, E., H.A. Pradana, S. Wahyuningsih, B. Marhaenanto, M.W. Sujarwo, and M. S. A. Hafidz. 2019. Anaerobic Digester Variation for Biogas Production on Coffee Wastewater Treatment. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*, 8(3), 164-174. <http://dx.doi.org/10.23960/jtpe-l.v8i3.164-174>
- Novita, E., M. B. Salim, and H. A. Pradana. 2021. Penanganan Air Limbah Industri Kopi dengan Metode Koagulasi-Flokulasi Menggunakan Kaogulasi Alami Biji Asam Jawa (*Tamarindus indica* L.). *Jurnal Teknologi Pertanian*, 22(1), 13-24. <https://doi.org/10.21776/ub.jtp.2021.022.01.2>
- Novita E., S. Wahyuningsih, M. Andika, and H. A. Pradana. 2023. Water Hyacinth Potential in the Pollution Impact Reduction of Coffee Agroindustry Wastewater. *Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri*, 14(2), 10-22. <https://doi.org/10.21771/jrtppi.2023.v14.no2.p10-22>
- Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014. Baku Mutu Air Limbah. Jakarta. <https://jdih.maritim.go.id/en/peraturan-menteri-negara-lingkungan-hidup-no-5-tahun-2014>. [Diakses pada 24 Januari 2024].
- Putri, F. A., S. Sarto, and A. T. Yuliansyah. 2020. Pengaruh Variasi Rasio H₂O₂/COD Dan Tegangan Terhadap Penurunan COD Air Limbah Rumah Sakit dengan Metode Elektro – Fenton. *Jurnal Chemurgy*, 4(2), 15-23. <http://dx.doi.org/10.30872/cmg.v4i2.4736>
- Rizki, M. N., and T. R. Agung. 2020. Kombinasi AOPs (Advanced Oxidation Processes) Fotokatalis – FotoFenton dalam Mendegradasi Surfaktan Las (Linier Alkylbenzene Sulfonate) pada Limbah Laundry. *Prosiding Seminar Nasional ESEC 2020*, 114 – 120.

- Sari, A. A., T. B. Utomo, Y. Parmawati, D. Wulandari, and S. Sudarno. 2019. Integrasi Pengolahan Air Limbah Lindi Hitam Dengan COD Dan TSS Tinggi dari Proses Pembuatan Bioetanol. *Jurnal Ilmu Lingkungan* 17(1), 100–106. <https://doi.org/10.14710/jil.17.1.100-106>
- Setiawan, O., and E. Q. Widayanti. 2023. Pengolahan Limbah Laundry dengan Metode Fenton. *Cakra Kimia*, 11(2), 71-77. <https://doi.org/10.24843/CK.2023.v11.i02>
- Widaningsih, R. 2022. Outlook Kopi. Jakarta, Pusat Data dan Sistem Informasi Pertanian – Kementerian Pertanian.
- Wijayanti, M. S., T. E. Agustina, M. H. Dahlan, d and D. Teguh. 2024. 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>
- Wirandani, M.Y., S. Sudarno, and P. Purwono. 2017. Pengolahan Lindi Menggunakan Metode Koagulasi Flokulasi dengan Koagulan FeCl₃ (Ferric Chloride) Dan Aops (Advanced Oxidation Process) Dengan Fe-H₂O₂ Studi Kasus : Tpa Jatibarang. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 6(1), 1-17.