

Elektro-Fenton sebagai Pra-pengolahan POME Menggunakan Elektroda Fe-Grafit: Keunggulan pH Alami dan Analisis Kinetika

Electro-Fenton as POME Pretreatment Using Fe-Graphite Electrodes: Natural pH Advantage and Kinetic Analysis

Nita Widyastuti*, Rara Ayu Lestary, Sri Mundarti, Ra'ida Raudhatussya'rifah, Hadistya Suryadri, Oki Alfernando, Nazarudin, Perdana Alfarez, Rifan Rizki

Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Jambi, Jl. Jambi-Muara Bulian No.KM. 15, Mendalo Darat, Jambi, 36361, Indonesia

*Email: nitawidyastuti@unja.ac.id

Article history:

Diterima : 3 Desember 2025
Direvisi : 18 Mei 2026
Disetujui : 29 Juni 2026
Mulai online : 29 September 2026

E-ISSN: 2337-4888

How to cite:

Nita Widyastuti, Rara Ayu Lestary, Sri Mundarti, Ra'ida Raudhatussya'rifah, Hadistya Suryadri, Oki Alfernando, Nazarudin, Perdana Alfarez, Rifan Rizki. (2026). Elektro-Fenton sebagai Pra-pengolahan POME Menggunakan Elektroda Fe-Grafit: Keunggulan pH Alami dan Analisis Kinetika. Jurnal Teknik Kimia USU, 15(2), 132-141.

ABSTRAK

Limbah cair kelapa sawit (*Palm Oil Mill Effluent*/POME) dengan konsentrasi COD tinggi (15.000-100.000 mg/L) menimbulkan risiko lingkungan yang signifikan. Penelitian ini mengevaluasi metode elektro-Fenton menggunakan pasangan elektroda Fe-grafit sebagai unit pra-pengolahan POME. Pengaruh pH awal (4; 5,5; dan 7) dikaji pada kondisi tetap: arus 0,4 A, durasi 60 menit, rasio H_2O_2 /COD 0,425, pengadukan 300 rpm, dan jarak elektroda 3 cm. Hasil menunjukkan degradasi COD tertinggi pada pH 7 (34,00%), diikuti oleh pH 4 (28,22%) dan pH 5,5 (21,55%). Proses pada pH 4 paling baik digambarkan oleh model kinetika orde pertama ($R^2 = 0,8936$). Kebaruan dari penelitian ini terletak pada efektivitas sistem pada pH alami POME (pH 4), yang memungkinkan degradasi signifikan tanpa penyesuaian pH sehingga meningkatkan kelayakan ekonomi. Lebih lanjut, kenaikan suhu sebesar 11 °C akibat efek *Joule heating* mempercepat difusi radikal hidroksil ($\bullet OH$). Metode ini menunjukkan prospek sebagai pra-pengolahan POME yang efisien untuk diintegrasikan dengan proses biologi lanjutan.

Kata kunci: POME, elektro-Fenton, degradasi COD, elektroda Fe-grafit, pra-pengolahan

ABSTRACT

Palm Oil Mill Effluent (POME) with high COD concentrations (15,000–100,000 mg/L) poses significant environmental risks. This study evaluates the electro-Fenton method using Fe-graphite electrodes as a POME pretreatment unit. The impact of initial pH (4, 5.5, and 7) was examined under fixed conditions: 0.4 A current, 60-minute duration, 0.425 H_2O_2 /COD ratio, 300 rpm stirring, and 3 cm electrode spacing. Results indicated the highest COD degradation at pH 7 (34.00%), followed by pH 4 (28.22%) and pH 5.5 (21.55%). The process at pH 4 was best described by a first-order kinetic model ($R^2 = 0.8936$). The novelty of this work lies in the effectiveness of the system at natural POME pH (pH 4), enabling significant degradation without pH adjustment to enhance economic feasibility. Furthermore, an 11 °C temperature rise from Joule heating accelerated hydroxyl radical ($\bullet OH$) diffusion. This method shows promise as an efficient POME pretreatment for biological process integration.

Keywords: POME, electro-Fenton, COD degradation, Fe-graphite electrode, pretreatment



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International.
<https://doi.org/10.32734/jtk.v15i2.23718>

1. Pendahuluan

Industri kelapa sawit merupakan salah satu sektor ekonomi paling signifikan di Indonesia, namun aktivitas operasionalnya menghasilkan limbah cair dalam volume besar yang menjadi tantangan lingkungan yang serius. *Palm Oil Mill Effluent* (POME) merupakan salah satu limbah cair utama dari proses sterilisasi dan klarifikasi minyak sawit yang memiliki karakteristik beban polutan sangat tinggi, dengan nilai *Chemical Oxygen Demand* (COD) mencapai 15.000-100.000 mg/L dan *Biochemical Oxygen Demand* (BOD₅) berkisar antara 3.000-15.000 mg/L [1]. Limbah cair yang berwarna cokelat gelap ini secara alami bersifat asam dengan pH berkisar antara 4-5, serta mengandung matriks senyawa organik kompleks yang meliputi emulsi minyak, lemak, protein, karbohidrat, dan senyawa fenolik beracun [2].

Pembuangan POME ke lingkungan tanpa adanya sistem pengolahan yang memadai dapat memicu deplesi oksigen terlarut secara drastis, eutrofikasi, serta toksisitas akut terhadap seluruh ekosistem akuatik [3]. Metode pengolahan konvensional yang umum diterapkan di industri, seperti kombinasi koagulasi-flokulasi dan pengolahan biologi anaerobik (kolam sedimentasi), dilaporkan sering kali kurang efektif dan membutuhkan waktu retensi yang sangat lama untuk mendegradasi senyawa organik rekalsitran bermolekul besar [4]. Oleh karena itu, diperlukan alternatif teknologi pengolahan sekunder yang lebih efisien, cepat, dan mampu memutus rantai polutan kompleks tersebut secara tuntas sebelum dialirkan ke badan air penerima.

Advanced Oxidation Processes (AOPs) menjanjikan untuk mengoksidasi polutan organik melalui pembentukan radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) yang sangat reaktif (potensial redoks $\pm 2,8$ V) [5]. Elektro-Fenton merupakan salah satu metode AOP yang menarik karena menggabungkan keuntungan proses elektrokimia dengan reaksi Fenton. Metode ini dikenal ramah lingkungan karena tidak menghasilkan lumpur sekunder yang masif, memiliki waktu reaksi singkat, serta biaya operasional yang kompetitif dibandingkan metode oksidasi kimia lainnya [6].

Secara mekanistik, proses elektro-Fenton memicu pembentukan radikal $\bullet\text{OH}$ secara *in-situ* melalui reaksi katalitik antara ion $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ dan hidrogen peroksida (H_2O_2) di bawah kondisi asam melalui persamaan reaksi berikut [7]:



Meskipun efektif, penerapan Elektrofenton pada POME dalam studi-studi sebelumnya masih menghadapi kendala operasional yang signifikan. Sebagian besar penelitian melaporkan bahwa efisiensi degradasi maksimal hanya tercapai pada pH spesifik sekitar 3, sehingga memerlukan penyesuaian pH (*pH adjustment*) menggunakan bahan kimia tambahan secara masif sebelum proses dimulai [8]. Ketergantungan pada pengaturan pH ini secara langsung meningkatkan biaya operasional hingga 20-30% dan menambah kompleksitas sistem pada skala industri, yang pada akhirnya membatasi kelayakan ekonomi dari metode elektro-Fenton standar dalam pengolahan limbah cair kelapa sawit [9].

Kombinasi elektroda Fe-grafit menawarkan keunggulan dimana elektroda Fe menghasilkan katalis $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ melalui oksidasi-reduksi berulang, sementara elektroda grafit memfasilitasi transfer elektron dan produksi radikal $\bullet\text{OH}$ [10]. Hingga saat ini, masih terdapat celah penelitian (*research gap*) mengenai optimalisasi sistem elektro-Fenton yang mampu beroperasi secara efektif pada pH alami POME tanpa penyesuaian kimiawi untuk meningkatkan efisiensi biaya. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja elektro-Fenton Fe-grafit pada variasi pH, khususnya pada pH alami POME untuk aplikasi praktis dan ekonomis, serta menganalisis mekanisme degradasi menggunakan model kinetika. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja elektrofenton Fe-grafit pada variasi pH, khususnya pada pH alami POME untuk aplikasi praktis dan ekonomis, serta menganalisis mekanisme degradasi menggunakan model kinetika.

2. Metode

Bahan Penelitian

POME yang digunakan dalam penelitian ini dikumpulkan dari industri pengolahan minyak kelapa sawit. Industri pengolahan minyak kelapa sawit tersebut berlokasi di Batanghari, Jambi, Indonesia. Karakteristik fisika-kimia POME yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 1.

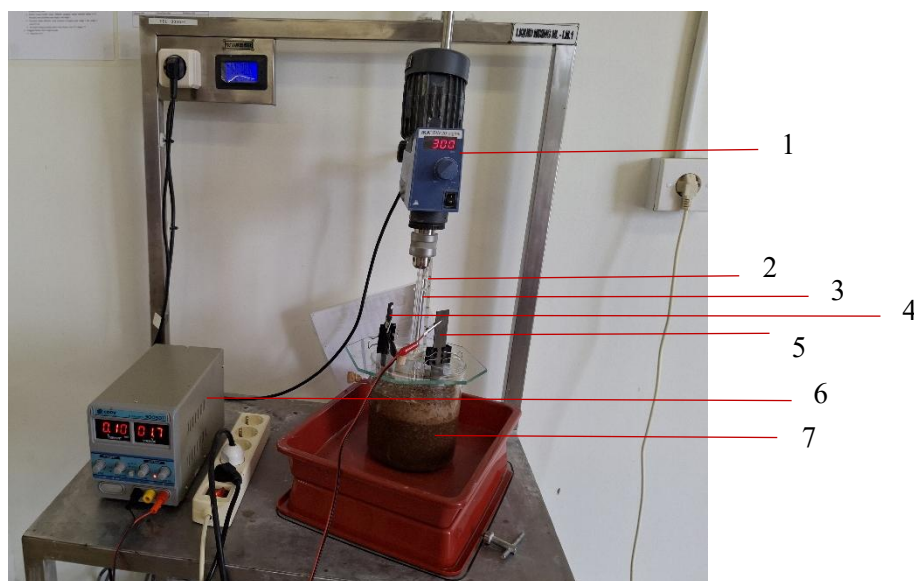
Bahan kimia yang digunakan dalam penelitian ini meliputi hidrogen peroksida (H_2O_2) 35%, asam klorida 15% untuk preparasi elektroda besi, serta akuades yang diperoleh dari Medika Laborta. Spesifikasi elektroda besi (22 cm x 2 cm x 0,2 cm) dan batang grafit (panjang 22 cm, diameter 0,8 cm).

Tabel 1. Karakteristik fisika-kimia POME

Parameter	Nilai	Satuan
pH	4	-
Suhu	30 ± 2	$^{\circ}\text{C}$
COD	86.383	mg/L
Warna	Cokelat gelap	-
Bau	Bau khas	-

Rancangan Penelitian

Peralatan yang digunakan yaitu rangkaian peralatan elektrofenton dapat dilihat pada Gambar 1.



Keterangan: (1) motor pengaduk, (2) termometer, (3) pengaduk kaca berbentuk T, (4) batang grafit, (5) elektroda besi, (6) *power supply*, (7) gelas beker 2 L

Gambar 1. Unit rangkaian peralatan proses elektrofenton

Sistem elektro-Fenton dirancang menggunakan sel elektrokimia batch berkapasitas 2000 mL yang dilengkapi dengan penutup reaktor (*covered reactor*). Penutup ini berfungsi untuk menjaga stabilitas posisi elektroda dan meminimalkan kontaminasi eksternal. Namun, karena terdapat celah fungsional pada bagian poros pengaduk dan lubang elektroda, sistem ini dioperasikan pada tekanan atmosferik (*atmospheric pressure*) yang memungkinkan terjadinya transfer massa oksigen secara terbatas dari udara luar ke dalam fasa cair melalui celah tersebut. Elektroda Fe dan grafit dipasang secara paralel dengan jarak antarelektroda 3 cm. Sistem dihubungkan dengan *power supply* DC yang dapat diatur untuk menghasilkan arus konstan 0,4 A, dipilih berdasarkan studi pendahuluan yang menunjukkan efisiensi energi optimal pada arus *in*, serta didasarkan pada kepadatan arus (*current density*) sebesar $9,09 \text{ mA/cm}^2$ (perhitungan luas permukaan terendam), yang menurut literatur merupakan rentang optimal untuk memicu regenerasi Fe^{2+} tanpa menyebabkan reaksi samping evolusi hidrogen yang berlebihan. Sistem dilengkapi dengan pengaduk dari kaca berbentuk T yang berputar pada kecepatan konstan 300 rpm untuk memastikan homogenitas larutan dan transfer massa yang optimal. Sampel POME sebanyak 1000 mL ditempatkan dalam sel reaktor, dan pH awal disesuaikan dengan variasi yang diinginkan [10]. Hidrogen peroksida (H_2O_2) dengan kemurnian 35% ditambahkan dengan rasio $\text{H}_2\text{O}_2/\text{COD}$ sebesar 0,425 [11]. Rasio ini dipilih berdasarkan penelitian pendahuluan yang menunjukkan keseimbangan optimal antara efisiensi degradasi dan penghematan biaya kimia.

Proses elektrofenton berlangsung pada suhu ruang ($29 \pm 1^{\circ}\text{C}$) selama 60 menit [10]. Pengambilan sampel dilakukan pada interval waktu 12 menit (yaitu pada 0, 12, 24, 36, 48, dan 60 menit) untuk mempelajari profil degradasi COD seiring waktu. Setiap variasi kondisi pH dijalankan dengan kontrol parameter operasional yang ketat untuk menjamin stabilitas sistem dan keterulangan data. Kontrol variabilitas data dilakukan melalui

analisis profil degradasi pada enam titik interval waktu pengambilan sampel yang berbeda untuk setiap reaktor. Validitas hasil eksperimen diverifikasi menggunakan analisis regresi linier pada model kinetika, di mana nilai koefisien determinasi (R^2) yang tinggi digunakan sebagai indikator konsistensi dan reliabilitas data eksperimental.

Metode Analisis

Konsentrasi COD diukur menggunakan metode spektrofotometri sesuai prosedur IKM JLI-12 di Jalint Laboratorium. Sampel diencerkan 10 kali agar pembacaan berada dalam rentang linear kurva kalibrasi kalium bikromat. Pengukuran pH menggunakan pH meter digital ATC backlight-2011 yang telah dikalibrasi dengan buffer standar pH 4,0 dan 7,0. Sampel yang telah diambil disesuaikan pH-nya menjadi 7 menggunakan NaOH 5 M untuk menghentikan reaksi [11]. Pengukuran suhu larutan dalam reaktor dimonitor menggunakan termometer air raksa dengan akurasi $\pm 0,5^\circ\text{C}$ pada setiap interval waktu pengambilan sampel. Persentase degradasi COD dihitung menggunakan persamaan:

$$\% \text{ Degradasi COD} = \frac{(COD_0 - COD_t)}{COD_0} \times 100\% \quad (2)$$

Dimana: COD_0 adalah konsentrasi COD awal (mg/L) dan COD_t adalah konsentrasi COD pada waktu t (mg/L). Data degradasi COD dianalisis menggunakan tiga model kinetika untuk menentukan mekanisme reaksi dominan dan karakteristik kinetika sistem. Model-model yang digunakan adalah [11]:

Tabel 2. Tipe model kinetika linier

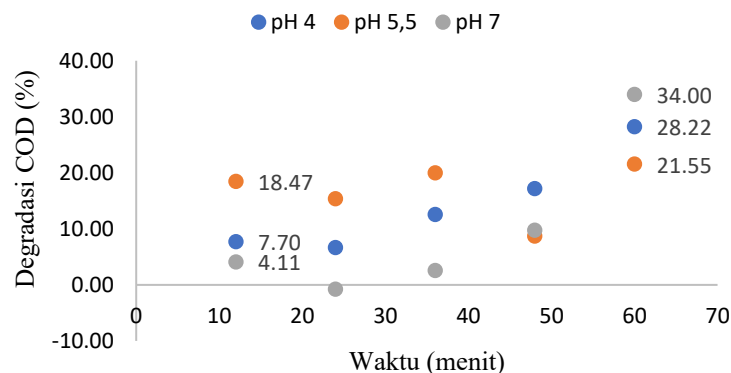
Orde pertama	$\ln \frac{C_0}{C_t} = k_1 t$
Orde kedua	$\frac{1}{C_t} - \frac{1}{C_0} = k_1 t$
Behnajady-Modirshahla Ghanbery (BMG)	$\frac{t}{\left(1 - \frac{C_t}{C_0}\right)} = m + bt$

Di mana C_0 adalah konsentrasi COD awal (mg/L), C_t adalah konsentrasi COD pada waktu t (mg/L), k_1 adalah konstanta laju reaksi orde pertama (1/menit), k_2 adalah konstanta laju reaksi orde kedua (L/mg·menit), dan m serta b adalah konstanta karakteristik model BMG. Performa setiap model dievaluasi berdasarkan nilai koefisien determinasi (R^2), dihitung menggunakan analisis regresi linier pada plot yang sesuai dengan persamaan setiap model. Nilai R^2 yang lebih tinggi (mendekati 1) mengindikasikan kesesuaian model yang lebih baik terhadap data eksperimental. Umumnya, $R^2 > 0,8$ dianggap sebagai kesesuaian model yang sangat baik, R^2 antara 0,6-0,8 sebagai kesesuaian sedang, dan $R^2 < 0,6$ sebagai kesesuaian buruk [12].

3. Hasil

Pengaruh Variasi pH terhadap Degradasi COD

Penelitian menunjukkan bahwa pH awal memiliki pengaruh signifikan terhadap efisiensi degradasi COD. Degradasi COD tertinggi tercapai pada pH 7 sebesar 34,00%, diikuti oleh pH 4 (pH alami) sebesar 28,22%, dan pH 5,5 sebesar 21,55%.



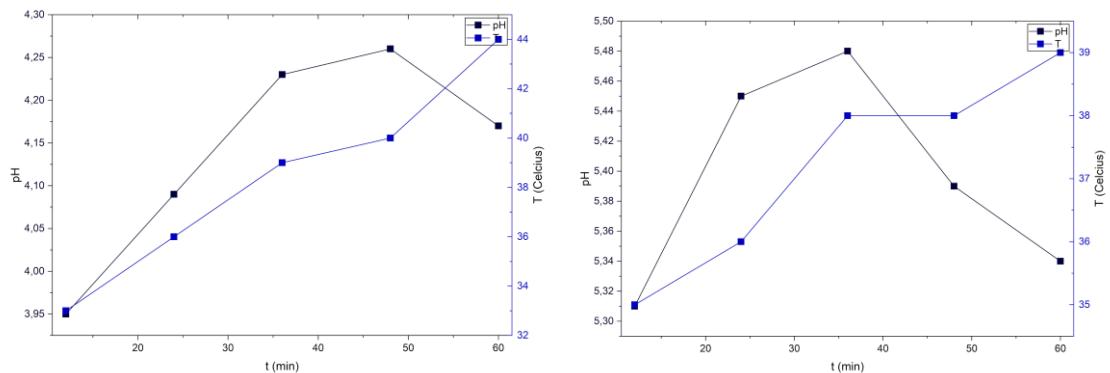
Gambar 2. Persentase degradasi COD pada setiap pH

Secara kuantitatif, konsentrasi COD awal sebesar 86.383 mg/L tereduksi menjadi 62.002 mg/L (pH 4), 67.765 mg/L (pH 5,5), dan 57.015 mg/L (pH 7) setelah 60 menit proses. Pada pH 4, degradasi menunjukkan pola yang konsisten dan linear, sementara pada pH 5,5 terjadi fluktuasi data. Pada pH 7, ditemukan periode lag yang panjang (0-48 menit) sebelum terjadi degradasi cepat di akhir proses. Seluruh data diperoleh dari satu seri percobaan tunggal per variasi pH dengan kontrol ketat pada parameter operasional; variabilitas data divalidasi melalui profil kinetika multi-titik waktu.

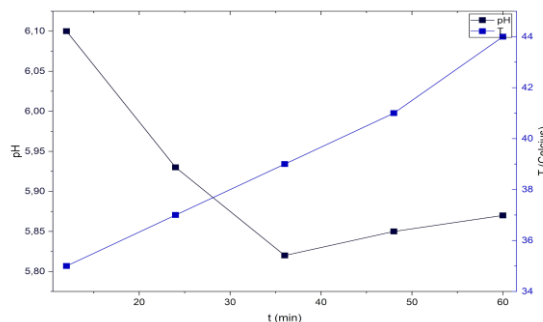
Mekanisme optimal pada pH 4 disebabkan oleh ketersediaan ion H^+ yang mendukung reaksi Fenton dan stabilitas H_2O_2 . Siklus redoks $Fe(III)/Fe(II)$ berlangsung optimal tanpa gangguan presipitasi, memastikan ketersediaan katalis Fe^{2+} secara berkelanjutan [13]. Hasil 28,22% pada pH alami ini sejalan dengan studi [13] yang menunjukkan bahwa pada beban organik sangat tinggi, efisiensi cenderung berada pada rentang 25-40% akibat fenomena *scavenging* radikal oleh matriks limbah yang kompleks. Sebaliknya, fluktuasi data degradasi yang teramati pada pH 5,5 ini dipicu oleh ketidakstabilan spesiasi besi, di mana terjadi transisi fase dari ion besi terlarut menjadi bentuk kompleks koloid besi hidroksida yang tidak larut. Akibatnya, mekanisme elektro-Fenton bergeser sebagian dari homogen menjadi heterogen secara acak. Pengendapan parsial ini mengganggu kontinuitas transfer elektron pada permukaan elektroda dan menyebabkan fluktuasi laju generasi radikal $\bullet OH$, yang tercermin dari profil penurunan COD yang tidak stabil sepanjang waktu deteksi [14]. Sebaliknya, pada pH 7, meskipun secara kuantitatif lebih tinggi (34,00%), kondisi ini dinilai kurang ideal dibandingkan dengan pH 4 dari perspektif operasional industri. Pada pH 7, adanya periode lag yang panjang (0-48 menit) mengindikasikan bahwa proses oksidasi tidak berjalan secara instan, sehingga memerlukan waktu retensi yang lebih lama yang berpotensi meningkatkan konsumsi energi. Selain itu, risiko pembentukan endapan besi hidroksida (*sludge*) pada pH netral dapat memicu pasivasi elektroda dan meningkatkan beban biaya penanganan limbah padat [15]. Sebaliknya, operasional pada pH alami (pH 4) menawarkan profil degradasi yang linear dan stabil sejak menit awal, serta memberikan efisiensi biaya yang signifikan karena mengeliminasi kebutuhan bahan kimia untuk penyesuaian pH (*pH adjustment*).

Dari perspektif aplikasi industri, pH 4 merupakan pilihan optimal karena limbah dapat langsung diproses tanpa penyesuaian pH, mencapai degradasi signifikan sebesar 28,22% dengan kinetika yang konsisten dan terprediksi

Perubahan pH dan Suhu Selama Proses



(a) Profil pH dan suhu pada kondisi pH awal 4 (b) Profil pH dan suhu pada kondisi pH awal 5,5



(c) profil pH dan suhu pada kondisi pH awal 7

Gambar 3. Profil pH dan suhu pada berbagai kondisi pH awal

Gambar 3 menampilkan profil perubahan pH dan suhu secara simultan selama 60 menit proses elektro-Fenton pada masing-masing kondisi pH awal 4, 5,5, dan 7.

Pada pH 4 (a), sistem menunjukkan stabilitas pH yang baik dengan fluktuasi minimal (3,95-4,26 atau $\pm 0,31$ unit), mengindikasikan buffer alami POME efektif menjaga kondisi reaksi optimal. Seiring berjalannya proses, suhu meningkat secara progresif dari 33°C menjadi 44°C ($\Delta T = +11^\circ\text{C}$), merupakan peningkatan tertinggi di antara ketiga variasi. Peningkatan suhu yang signifikan ini disebabkan oleh *Joule heating* akibat resistansi larutan yang tinggi pada kondisi pH asam [5].

Pada pH 5,5 (b), stabilitas pH lebih baik dengan fluktuasi terendah (5,31-5,48 atau $\pm 0,17$ unit). Namun, peningkatan suhu paling minimal terjadi pada kondisi ini, hanya dari 35°C menjadi 39°C ($\Delta T = +4^\circ\text{C}$). Resistansi larutan yang lebih rendah pada pH intermediate ini kemungkinan disebabkan oleh konduktivitas optimal dari pembentukan kompleks besi atau spesiasi ion yang lebih stabil [16].

Pada pH 7 (c), pH mengalami fluktuasi sedang (5,82–6,10 atau $\pm 0,28$ unit) dengan kecenderungan sedikit menurun dari kondisi awal. Peningkatan suhu cukup signifikan dari 35°C menjadi 44°C ($\Delta T = +9^\circ\text{C}$), menunjukkan resistansi sistem yang lebih tinggi pada kondisi netral, kemungkinan akibat presipitasi parsial $\text{Fe}(\text{OH})_3$ yang mempengaruhi konduktivitas larutan [15].

Perbedaan pola *Joule heating* pada ketiga pH mengindikasikan karakteristik elektrokimia yang berbeda. Peningkatan suhu memberikan dampak positif dengan mempercepat laju reaksi Fenton dan difusivitas radikal $\bullet\text{OH}$ sesuai persamaan Arrhenius, namun peningkatan signifikan pada pH 4 dan pH 7 (hingga 11°C dan 9°C) dapat menyebabkan inefisiensi energi pada skala industri [17]. Sistem pendingin atau optimalisasi parameter operasional perlu dipertimbangkan untuk aplikasi praktis.

Analisis Kinetika Degradasi COD

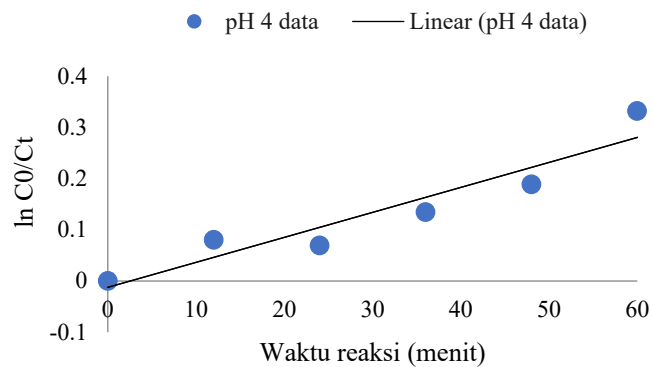
Analisis kinetika dilakukan secara mendalam pada kondisi pH alami (pH 4) karena variasi ini merupakan parameter operasional yang paling optimal, linear, dan memiliki kelayakan tertinggi untuk aplikasi industri. Evaluasi kesesuaian data eksperimen dilakukan menggunakan tiga model kinetika, yaitu model orde pertama, orde kedua, dan model *Behnajady-Modirshahla-Ghanbery* (BMG) [15]. Ringkasan parameter kinetika yang diperoleh disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter kinetika degradasi COD pada kondisi pH alami (pH 4)

Model Kinetika	0,4 A pH 4
Orde pertama	
k (1/menit)	0,0049
R ²	0,8936
Orde kedua	
k (L/mg.menit)	0,00000007
R ²	0,8685
<i>Behnajady-Modirshahla-Ghanbery</i> (BMG)	
k (1/menit)	3,2367
R ²	0,3305

Berdasarkan Tabel 3, model orde pertama pada pH alami (pH 4) menghasilkan nilai R² tertinggi sebesar 0,8936 dengan konstanta laju reaksi (k) 0,0049 1/menit. Linieritas yang tinggi ini membuktikan bahwa pada pH alami, degradasi COD dikendalikan secara stabil oleh pembentukan radikal $\bullet\text{OH}$ melalui siklus redoks $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ yang berjalan optimal tanpa kendala presipitasi besi (*iron sludge*) [18]. Dari aspek keteknikan, nilai k yang konstan pada pH asli limbah ini memberikan relevansi industri yang kuat karena menjamin prediktabilitas proses. Parameter ini menjadi dasar esensial dalam kalkulasi waktu retensi (*retention time*) dan penentuan dimensi reaktor skala penuh (*full-scale*) tanpa memerlukan unit tambahan untuk pengkondisian kimiawi awal (*pH adjustment*), sehingga mampu menekan biaya operasional [19]. Sebaliknya, fenomena degradasi pada pH 5,5 dan 7 tidak dapat divalidasi menggunakan model kinetika linier sederhana karena nilai koefisien determinasi yang sangat rendah ($R^2 < 0,6$) [12]. Pada pH non-alami tersebut, sistem mengalami anomali mekanistik yang kompleks; pH 7 memicu periode lag akibat lambatnya inisiasi radikal, sementara pH 5,5 menyebabkan fluktuasi data akibat pengendapan parsial *ion ferri* [16]. Karena data eksperimen pada pH 5,5 dan 7 secara statistik tidak memenuhi asumsi dasar linieritas model, maka kalkulasi nilai k pada kedua

kondisi tersebut tidak memiliki validitas ilmiah untuk digunakan sebagai acuan perancangan reaktor dan tidak representatif untuk ditabelkan.

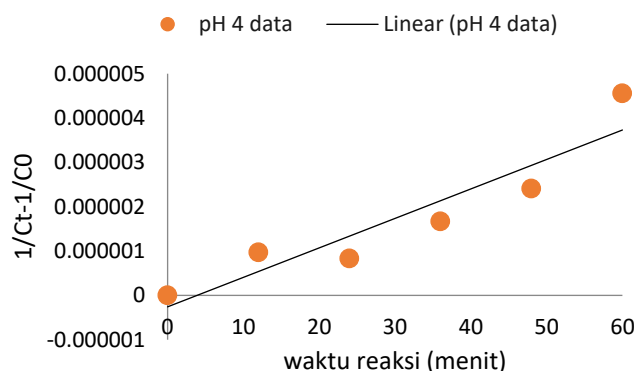


Gambar 4. Profil kinetika orde pertama pada pH 4

Pada pH 4, model orde pertama menghasilkan nilai R^2 tertinggi sebesar 0,8936, menunjukkan kesesuaian model yang sangat baik ($R^2 > 0,8$). Nilai R^2 ini mengindikasikan bahwa 89,36% dari variasi data dapat dijelaskan oleh model orde pertama, menunjukkan bahwa degradasi COD pada pH 4 mengikuti mekanisme kinetika orde pertama dengan karakteristik yang konsisten. Secara praktis, nilai konstanta laju reaksi k sebesar 0,0049 1/menit pada pH alami ini memiliki implikasi penting dalam perancangan reaktor skala industri. Nilai k yang stabil dan terprediksi memudahkan penentuan waktu retensi (*retention time*) yang dibutuhkan untuk mencapai target penurunan beban organik tertentu. Selain itu, konstanta laju ini menunjukkan bahwa reaksi oksidasi berlangsung secara konsisten tanpa adanya hambatan teknis yang berarti pada pH alami, sehingga memungkinkan efisiensi dimensi reaktor yang lebih optimal dan biaya operasional yang lebih rendah karena tidak memerlukan unit tambahan untuk penyesuaian pH. Model orde kedua menghasilkan R^2 yang sedikit lebih rendah (0,8685), tetap menunjukkan kesesuaian yang baik namun sedikit lebih rendah dari orde pertama. Model BMG menghasilkan R^2 yang jauh lebih rendah (0,3305), menunjukkan ketidaksesuaian model ini dengan data pada pH 4.

Kesesuaian model orde pertama yang sangat baik pada pH 4 menunjukkan bahwa proses degradasi pada pH ini didominasi oleh pembentukan radikal $\bullet\text{OH}$ yang konsisten dan reaktif secara merata terhadap konsentrasi COD. Pada pH 4 (pH alami limbah POME), regenerasi Fe^{2+} melalui siklus redoks berlangsung optimal, memastikan ketersediaan katalis yang konstan sepanjang proses. Hal ini menghasilkan laju degradasi yang mengikuti kinetika orde pertama, di mana laju reaksi berbanding lurus dengan konsentrasi COD yang tersisa. Keunggulan pH alami limbah ini semakin memperkuat keaslian dari analisis kinetika, karena tidak ada modifikasi pH yang dapat mengubah karakteristik fisikokimia limbah.

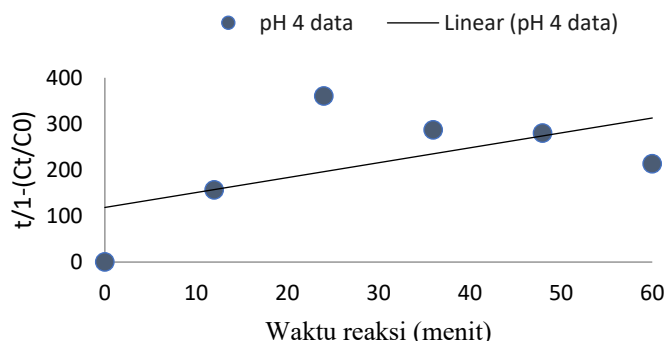
Efisiensi degradasi COD sebesar 28,22% pada pH alami (pH 4) dalam penelitian ini menunjukkan hasil yang realistis dan kompetitif mengingat beban organik awal POME yang sangat tinggi ($\text{COD} \approx 86.000 \text{ mg/L}$). Sebagai perbandingan, penelitian oleh [13] menunjukkan bahwa efisiensi sistem elektro-Fenton sangat dipengaruhi oleh rasio radikal $\bullet\text{OH}$ terhadap konsentrasi polutan; pada limbah dengan konsentrasi organik tinggi, efisiensi cenderung berada pada rentang 25-40% karena fenomena *scavenging* radikal oleh matriks limbah yang kompleks. Selain itu, jika dibandingkan dengan studi [19] yang menggunakan sistem serupa, penggunaan elektroda besi-grafit tanpa modifikasi pH eksternal tetap mampu memberikan penyisihan beban organik yang signifikan secara massa (sekitar 24.000 mg/L COD tersisihkan). Hal ini menegaskan bahwa meskipun persentase degradasi tidak mencapai angka ekstrem, sistem ini sangat efektif sebagai unit pra-pengolahan karena mampu beroperasi pada pH asli limbah, yang menurut [15] merupakan faktor krusial dalam menekan biaya operasional pada skala industri.



Gambar 5. Profil kinetika orde kedua pada pH 4

Pada pH 5,5, ketiga model menunjukkan nilai R^2 yang relatif rendah. Model orde pertama menghasilkan R^2 sebesar 0,2879, model orde kedua sebesar 0,2850, dan model BMG sebesar 0,5425 (tertinggi di antara ketiga model). Nilai R^2 yang rendah pada semua model mengindikasikan bahwa reaksi degradasi pada pH 5,5 lebih kompleks dan tidak dapat dijelaskan dengan baik oleh model kinetika sederhana.

Kompleksitas pada pH 5,5 dapat disebabkan oleh beberapa faktor. Pertama, pH 5,5 adalah pH intermediate di antara kondisi optimal (pH 4) dan kondisi yang mulai mengalami presipitasi besi (pH > 5). Pada pH ini, keseimbangan spesiasi besi antara Fe^{2+} dan Fe^{3+} menjadi tidak stabil, dengan munculnya $\text{Fe}(\text{OH})_2$ dan $\text{Fe}(\text{OH})_3$ yang berpotensi terbentuk [19]. Presipitasi ini mengurangi konsentrasi besi terlarut aktif, sehingga mekanisme reaksi menjadi heterogen. Kedua, pada pH 5,5, buffer alami dalam POME mungkin beroperasi pada titik infleksinya, menghasilkan fluktuasi pH yang tidak terprediksi seperti terlihat pada data (pH berfluktuasi antara 5,31–5,48). Ketiga, fluktuasi COD yang diamati pada pH 5,5 mengindikasikan bahwa sistem mengalami periode transformasi kimia, di mana beberapa proses pembentukan dan degradasi terjadi secara simultan [20]. Kondisi kompleks ini menjelaskan mengapa tidak ada model kinetika sederhana yang dapat menggambarkan data dengan baik.



Gambar 6. Profil kinetika BMG pada pH 4

Pada pH 7, model orde pertama menghasilkan R^2 sebesar 0,5783 menunjukkan kesesuaian sedang. Model orde kedua menghasilkan R^2 sebesar 0,5580, sedikit lebih rendah dari orde pertama. Model BMG menghasilkan R^2 yang sangat rendah (0,0428), menunjukkan ketidaksesuaian total model ini dengan data pada pH 7. Kesesuaian sedang dari model orde pertama dan orde kedua pada pH 7 menunjukkan bahwa degradasi pada pH ini tidak mengikuti mekanisme orde pertama atau orde kedua yang sempurna, melainkan mekanisme reaksi yang lebih kompleks dan multi-tahap. Periode lag yang panjang (0–48 menit) dengan degradasi minimal, diikuti dengan degradasi cepat pada 48–60 menit terakhir, mengindikasikan proses induksi atau penyesuaian sistem sebelum mencapai performa maksimal [15].

Pada pH netral, beberapa mekanisme fisikokimia yang berbeda kemungkinan beroperasi [16]. Pertama, presipitasi $\text{Fe}(\text{OH})_3$ menjadi masalah utama, meskipun pH sistem terjaga stabil pada sekitar 5,87–6,10 [8]. Spesiasi besi mungkin terdistribusi antara bentuk terlarut dan presipitat, menciptakan mekanisme heterogen. Kedua, pada pH 7, pembentukan radikal $\bullet\text{OH}$ melalui mekanisme Fenton klasik berkurang, tetapi mekanisme oksidasi alternatif seperti oksidasi langsung oleh Fe^{3+} atau oksidasi elektrokimia pada permukaan elektroda mungkin menjadi signifikan [13]. Ketiga, periode lag yang panjang mungkin mencerminkan waktu yang

diperlukan untuk pembentukan spesies antara yang lebih mudah dioksidasi atau akumulasi produk degradasi antara yang lebih biodegradabel [21].

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa metode elektro-Fenton dengan pasangan elektroda Fe-grafit memberikan potensi signifikan sebagai unit pra-pengolahan POME. Temuan utama menunjukkan bahwa pH alami POME (pH 4) memberikan performa optimal dengan degradasi COD sebesar 28,22% dan mengikuti model kinetika orde pertama ($R^2=0,8936$). Kondisi ini sangat menguntungkan karena menghilangkan kebutuhan penyesuaian pH (*pH adjustment*) yang mahal. Sementara itu, pH 7 mencapai degradasi tertinggi (34,00%) namun kurang ideal secara operasional karena adanya periode lag yang panjang, sedangkan pH 5,5 menunjukkan ketidakstabilan proses. Peningkatan suhu hingga 11°C akibat efek *Joule heating* terbukti meningkatkan laju degradasi, meskipun manajemen energi tetap diperlukan untuk efisiensi jangka panjang. Analisis kinetika pada pH alami ini mempertegas relevansi sistem untuk diaplikasikan langsung pada aliran limbah industri. Meskipun penelitian ini memiliki keterbatasan dalam jumlah replikasi eksperimental, konsistensi tren data yang dihasilkan melalui analisis multi-titik waktu memberikan basis yang kuat untuk pengembangan lebih lanjut. penelitian selanjutnya perlu mengevaluasi integrasi sistem elektro-Fenton ini dengan proses biologis lanjutan untuk mengoptimalkan penurunan beban organik hingga mencapai standar baku mutu efluen.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Jambi yang telah memberikan dukungan pendanaan melalui skema Penelitian Dosen Pemula sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

6. Konflik Kepentingan

Semua penulis tidak memiliki konflik kepentingan (*conflict of interest*) pada publikasi artikel ini.

Daftar Pustaka

- [1] S. E. Putra *et al.*, “Analysis of Palm Oil Mill Effluent Quality,” *E3S Web Conf.*, vol. 481, pp. 1–10, 2024, doi: 10.1051/e3sconf/202448103001.
- [2] Y. M. U. N. Tang, K. T. A. T. Tan, and L. P. Wong, “Palm Oil Mill Effluent (Pome) As a Source of Biofuels and Value-Added Products Via Oil Recovery: a Review,” *J. Oil Palm Res.*, vol. 36, no. 3, pp. 534–546, 2024, doi: 10.21894/jopr.2023.0056.
- [3] P. L. Soo, L. P. Wong, M. J. K. Bashir, X. Guo, and Y. Wei, “Palm Oil Fuel Ash-Enhanced Biofilm Reactor: Performance and Microbial Dynamics in POME Treatment,” *Environments*, vol. 13, no. 1, p. 22, 2026, doi: 10.3390/environments13010022.
- [4] N. D. Totewad, B. Patra, and S. Warangkar, “Conventional and Advanced Technologies for Bioremediation of Wastewater Pollutants,” *Int. J. Adv. Res.*, vol. 10, no. 07, pp. 372–384, 2022, doi: 10.21474/ijar01/15044.
- [5] E. Marlina and Purwanto, “Electro-Fenton for Industrial Wastewater Treatment: A Review,” *E3S Web Conf.*, vol. 125, no. 201 9, pp. 1–5, 2019, doi: 10.1051/e3sconf/201912503003.
- [6] M. Á. Fernández de Dios, O. Iglesias, M. Pazos, and M. Á. Sanromán, “Application of Electro-Fenton Technology to Remediation of Polluted Effluents by Self-Sustaining Process,” *Sci. World J.*, vol. 2014, pp. 1–8, 2014, doi: 10.1155/2014/801870.
- [7] Y. Yavuz, “EC and EF processes for the treatment of alcohol distillery wastewater,” vol. 53, pp. 135–140, 2007, doi: 10.1016/j.seppur.2006.08.022.
- [8] M. Pushpalatha and B. M. Krishna, “Electro-Fenton Process for Waste Water Treatment A Review,” *Int. J. Adv. Res. Ideas Innov. Technol.*, vol. 3, no. 1, pp. 439–451, 2017.
- [9] R. D. Al Bostami, A. Al Othman, M. Tawalbeh, K. N. McPhedran, and M. M. A. Shirazi, “Treatment and valorization of spent caustic brine: A critical review with emphasis on membrane technologies,” *Chemosphere*, vol. 395, no. September 2025, p. 144835, 2026, doi: 10.1016/j.chemosphere.2026.144835.
- [10] N. Widyastuti, M. Hidayat, and C. W. Purnomo, “Enhanced Biogas Production from Sugarcane Vinasse using Electro-Fenton as Pre-treatment Method,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 830, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1755-1315/830/1/012079.
- [11] D. C. Hakika, S. Sarto, A. Mindaryani, and M. Hidayat, “Decreasing COD in sugarcane vinasse using

- the fenton reaction: The effect of processing parameters,” *Catalysts*, vol. 9, no. 11, 2019, doi: 10.3390/catal9110881.
- [12] J. Lach, “Analysis of the Differences Resulting from the Determination of Langmuir Isotherm Coefficients from Linear and Non-Linear Forms—A Case Study,” *Materials (Basel)*, vol. 18, no. 15, 2025, doi: 10.3390/ma18153506.
- [13] Z. Wang *et al.*, “Strategies based on electron donors to accelerate Fe(III)/Fe(II) cycle in Fenton or Fenton-like processes,” *Chem. Eng. J.*, vol. 454, no. August 2022, 2023, doi: 10.1016/j.cej.2022.140096.
- [14] V. Poza-Nogueiras, E. Rosales, M. Pazos, and M. Á. Sanromán, “Current advances and trends in electro-Fenton process using heterogeneous catalysts – A review,” *Chemosphere*, vol. 201, pp. 399–416, 2018, doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.03.002.
- [15] I. Syaichurrozi, S. Sarto, W. B. Sediawan, and M. Hidayat, “Effect of current and initial ph on electrocoagulation in treating the distillery spent wash with very high pollutant content,” *Water (Switzerland)*, vol. 13, no. 1, 2021, doi: 10.3390/w13010011.
- [16] Y. Soltan, K. Bani-Melhem, M. Ba-Abbad, F. Almomani, and A. Al-Muhtaseb, “Optimization of Aluminum Electrocoagulation Parameters for Nutrient Removal from Hydroponic Wastewater Using Response Surface Methodology,” *Water (Switzerland)*, vol. 17, no. 23, pp. 1–23, 2025, doi: 10.3390/w17233346.
- [17] S. Gonawala, “Electro Fenton Process: Modern Method of Wastewater Treatment,” pp. 1–3, 2014.
- [18] U. T. Un, S. Topal, E. Oduncu, and U. B. Ogutveren, “Treatment of Tissue Paper Wastewater : Application of Electro-Fenton Method,” vol. 6, no. 6, pp. 415–418, 2015, doi: 10.7763/IJESD.2015.V6.628.
- [19] K. R. M. Senguttuvan, S. Kuppusamy, and K. Sellappa, “Comparative Study of Fenton and Photo-Fenton Processes for the Treatment of Distillery Wastewater: Pollutant Removal Efficiency and Kinetic Analysis,” *Glob. Nest J.*, vol. 27, no. 9, pp. 1–9, 2025, doi: 10.30955/gnj.07452.
- [20] L. F. Guerreiro, C. S. D. Rodrigues, R. M. Duda, R. A. de Oliveira, R. A. R. Boaventura, and L. M. Madeira, “Treatment of sugarcane vinasse by combination of coagulation/flocculation and Fenton’s oxidation,” *J. Environ. Manage.*, vol. 181, pp. 237–248, 2016, doi: 10.1016/j.jenvman.2016.06.027.
- [21] X. Li, S. Chen, I. Angelidaki, and Y. Zhang, “Bio-electro-Fenton processes for wastewater treatment: Advances and prospects,” *Chem. Eng. J.*, vol. 354, no. February, pp. 492–506, 2018, doi: 10.1016/j.cej.2018.08.052.