

STUDI KINETIKA DEGRADASI POLUTAN DI DALAM LIMBAH CAIR INDUSTRI SARUNG DENGAN METODE FENTON

¹Oki Setiawan*, ¹Hapusan Vincentius Manalu, ¹Siti Adriani, ¹Insan Kamil, ¹Darti Purnama Sari, ¹Ifti Luthviana Dewi

¹Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Batam

*Penulis korespondensi: oki@polibatam.ac.id

Abstrak. Limbah cair dari industri tekstil, khususnya sarung tenun, mengandung senyawa organik kompleks yang sulit diuraikan melalui proses biologis konvensional. Salah satu indikator pencemar utamanya adalah Chemical Oxygen Demand (COD) yang tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk memahami kinetika reaksi degradasi polutan di dalam air limbah industri sarung dengan metode fenton. Proses Fenton melibatkan reaksi antara besi (Fe^{2+}) dan hidrogen peroksida (H_2O_2) yang menghasilkan radikal hidroksil (OH^*) sebagai oksidator kuat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rasio H_2O_2/COD sebesar 10 memberikan efisiensi degradasi COD tertinggi, mencapai 89,07% dalam waktu 60 menit pada pH 3. Analisis kinetika reaksi dilakukan menggunakan tiga model: orde satu, orde dua, dan Behnajady Modirshahla Ghanbery (BMG). Model BMG menunjukkan kecocokan terbaik untuk menggambarkan laju degradasi polutan dalam air limbah, dengan nilai (R^2) sebesar 0,9932. Model ini juga menunjukkan bahwa kecepatan degradasi COD tinggi terjadi pada menit-menit awal, dan cenderung menurun seiring berkurangnya konsentrasi senyawa organik.

Kata Kunci: Limbah cair tekstil, proses Fenton, COD, AOP, kinetika reaksi, model BMG

Abstract. Liquid waste from the textile industry, particularly woven sarong production, contains complex organic compounds that are difficult to degrade through conventional biological processes. One of the primary pollution indicators is high Chemical Oxygen Demand (COD). This study aims to understand the kinetics of pollutant degradation reactions in woven sarong industrial wastewater using the Fenton method. The Fenton process involves a reaction between iron (Fe^{2+}) and hydrogen peroxide (H_2O_2), generating hydroxyl radicals (OH^*) as powerful oxidizing agents. The results showed that an H_2O_2/COD ratio of 10 yielded the highest COD degradation efficiency, reaching 89.07% within 60 minutes at pH 3. Reaction kinetics analysis was conducted using three models: first order, second order, and the Behnajady Modirshahla Ghanbery (BMG) model. The BMG model demonstrated the best fit for describing the rate of pollutant degradation in wastewater, with a coefficient of determination (R^2) of 0.9932. This model also indicated that the COD degradation rate was highest during the initial minutes and gradually declined as the concentration of organic compounds decreased.

Keywords: Textile wastewater, Fenton process, COD, AOP, reaction kinetics, BMG model

1. Pendahuluan

Saat ini, di Indonesia, pengolahan limbah cair dari industri tekstil umumnya menggunakan kombinasi sistem Fisika-Kimia dan Biologi Lumpur Aktif. Salah satu masalah yang sering ditemui dalam pengolahan limbah ini adalah pembentukan sludge yang digolongkan sebagai limbah B3 Contoh pengolahan limbah secara biologis termasuk sistem anaerobik dan aerobik. Pengolahan limbah secara anaerob mempunyai beberapa keunggulan, seperti hasil biomassa yang lebih rendah dibandingkan sistem aerob, tidak memerlukan aerasi sehingga biaya investasi dan energi lebih rendah, gas metana yang dihasilkan memiliki nilai ekonomis, dan sistem ini dapat menangani beban organik yang lebih tinggi dibandingkan sistem aerob. Namun, proses anaerob juga memiliki sejumlah kelemahan, misalnya terkadang muncul bau tidak sedap akibat produksi gas H₂S dan merkaptan, serta membutuhkan waktu *start up* yang cukup lama, yaitu sekitar 8-12 minggu (Moertinah dkk., 2020).

Advanced Oxidation Processes (AOPs) adalah metode inovatif dalam oksidasi untuk memecah polutan dalam air limbah, dengan menghasilkan produk akhir yang aman dan ramah lingkungan. AOP ini menggunakan *oxidants* yang sangat kuat dari radikal hidroksil (OH^{*}). Radikal ini dapat terbentuk melalui kombinasi radiasi UV dengan salah satu dari zat berikut: Ozon (O₃), Hidrogen Peroksida (H₂O₂), dan Titanium Dioksida (TiO₂). Radikal tersebut juga bisa dihasilkan dari gabungan hidrogen peroksida dan ion fero (Fe²⁺), yang dikenal sebagai reagen Fenton (Deng and Zhao, 2015). Memahami tingkat COD dan BOD dalam air sangat penting untuk menggambarkan berapa banyak zat organik yang ada. COD mengukur kebutuhan oksigen kimiawi yang diperlukan untuk menghancurkan semua bahan organik dalam air. Sementara itu, BOD menunjukkan jumlah oksigen terlarut yang diperlukan oleh bakteri untuk menguraikan (mengoksidasi) hampir semua zat organik yang terlarut serta sebagian yang tersuspensi dalam air (Pratiwi and Indah Agustiorini, 2023).

Kadar COD pada limbah dari industri tekstil sarung cenderung tinggi dan dapat mencemari lingkungan, terutama sumber air. Oleh karena itu, penelitian ini merumuskan masalah seperti bagaimana rasio H₂O₂ mempengaruhi kadar COD, serta bagaimana tingkat pH berpengaruh pada proses fenton. Penelitian ini bertujuan untuk memahami kinetika reaksi degradasi polutan di dalam air limbah industri sarung. Limbah yang berasal dari industri tekstil ini mengandung zat warna senyawa organik seperti *procion*, *erionyl*, *auramin*, dan *rhodamin* yang apabila dibuang ke dalam air akan mengurangi kadar oksigen terlarut bagi organisme, karena oksigen tersebut digunakan untuk mengoksidasi senyawa organik zat warna (Agustina. and Amir, 2012).

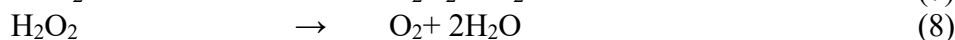
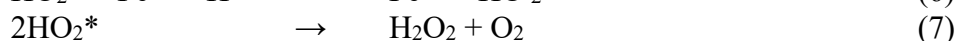
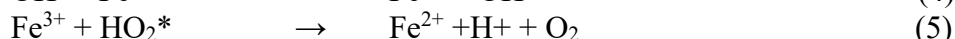
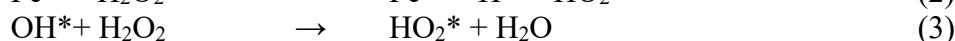
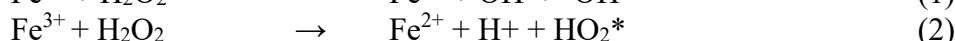
Tabel 1. Karakteristik Awal Limbah Cair Pewarnaan Sarung

No	Parameter	Nilai
1	COD (mg/L)	352,3
2	BOD (mg/L)	97,3
3	TSS (mg/L)	137
4	pH	7,31
5	Suhu (Celcius)	29

Parameter permintaan oksigen kimiawi (COD) digunakan untuk menentukan kebutuhan oksigen dalam air limbah. Uji COD dilakukan dengan cara menguraikan komponen-komponen yang tidak mudah diolah secara biologi atau yang tidak dapat diurai oleh mikroorganisme. COD dibutuhkan agar limbah bisa mengalami oksidasi di dalam air melalui proses kimia. Kalium dikromat bertindak sebagai sumber oksigen yang mengoksidasi limbah organik menjadi CO₂, H₂O, dan sejumlah ion Krom. Dengan demikian, COD bisa dijadikan parameter kunci dalam

menilai tingkat pencemaran air (Sitorus dkk., 2022). Penggunaan *Advanced Oxidation Processes* (AOPs) untuk mengolah air limbah dari industri tekstil dengan proses Fenton diterapkan oleh beberapa industri seperti *textile, pulp and papper* dan kelapa sawit (Sari dkk., 2021). AOP memakai energi tambahan dan/atau bahan kimia untuk mempercepat pembentukan spesies pengoksidasi yang sangat reaktif, terutama radikal hidroksil ($\cdot\text{OH}$) yang efektif dalam penguraian oksidatif berbagai senyawa organik. Efisiensi produksi radikal hidroksil menjadi elemen krusial dalam proses AOP. Penelitian tentang AOPs saat ini menjadi topik yang cukup menarik di kalangan ilmuwan yang bertujuan untuk menurunkan kadar bahan kimia dalam air limbah dan meningkatkan efektivitas penghilangan zat warna (Cetinkaya dkk., 2018).

Mekanisme dekomposisi H_2O_2 pada larutan asam tanpa adanya senyawa organik terdiri dari urutan reaksi :



Pada serangkaian reaksi ini, pembentukan radikal hidroksil berlangsung dalam siklus antara Fe^{2+} menjadi Fe^{3+} , serta pendinginan radikal OH^* oleh Fe^{2+} dan H_2O_2 . Meningkatkan dosis H_2O_2 biasanya menghasilkan lebih banyak radikal hidroksil, meskipun ada titik optimal di mana produksi OH^* tidak lagi bertambah banyak. Penggunaan H_2O_2 secara berlebihan dapat menurunkan jumlah generasi radikal $\cdot\text{OH}$ karena terbentuknya radikal yang kurang reaktif seperti HO_2^* , seperti yang diperlihatkan oleh reaksi 2 dan 3, sehingga proses oksidasi Fenton menjadi kurang efektif dalam pengolahan senyawa organik atau anorganik (Apaydin, 2014) Mekanisme Fenton, secara sederhananya, diwakili oleh formula 1-9. Proses ini dijuluki reaksi Fenton dan melibatkan oksidasi besi (III) menjadi ion besi (II) guna mengurai H_2O_2 menjadi radikal hidroksil. Ini umumnya dianggap sebagai inti dasar dari kimia Fenton. Selanjutnya, reaksi lain harus dipertimbangkan untuk memahami seluruh proses :



Fe (II) teroksidasi menjadi Fe (III), dan radikal hidroksil diproduksi. senyawa ini (OH^*) adalah pengoksidasi yang kuat dan cenderung bereaksi dengan penambahan ikatan rangkap atau dengan ekstraksi atom hidrogen. Dalam literatur, proses ini disebut proses Fenton yang melibatkan reaksi homogen. Hal ini dapat diterima secara lingkungan, dan sistem yang didasarkan pada generasi radikal bebas pengoksidasi yang sangat reaktif, yaitu radikal hidroksil (Cetinkaya dkk., 2018)

2. Bahan dan Metode

2.1. Alat dan Bahan

Studi ini dilaksanakan dengan mengolah air limbah dari industri Sarung Tenun Tradisional di Medangan Gresik. Aquadest digunakan sebagai pelarut dalam proses ini, sementara reagen Fenton berfungsi sebagai bahan kimia utama. Sebagai katalis, digunakan $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ merek SMART-LAB dengan nomor CAS 7781-63-0. Hidrogen peroksida dari merek Merck KGA dengan nomor CAS 7722-84-1 juga digunakan. Dalam tahap pengujian COD, diperlukan larutan Ferro Ammonium Sulfat (FAS), Kalium Dikromat ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), aquadest, Indikator Ferroin, larutan titrasi FAS, serta larutan reagen Asam Sulfat (H_2SO_4 dan Ag_2SO_4). Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini mencakup magnetic stirrer, stopwatch, pH meter 3210 set 2 (Sentix 41), kertas saring Whatman 42, gelas beaker berukuran 1000 dan 250 mL, pipet

volume, labu ukur 1000 mL, gelas ukur 1000 mL, timbangan analitik digital, vacuum filter, dan wadah sampel.

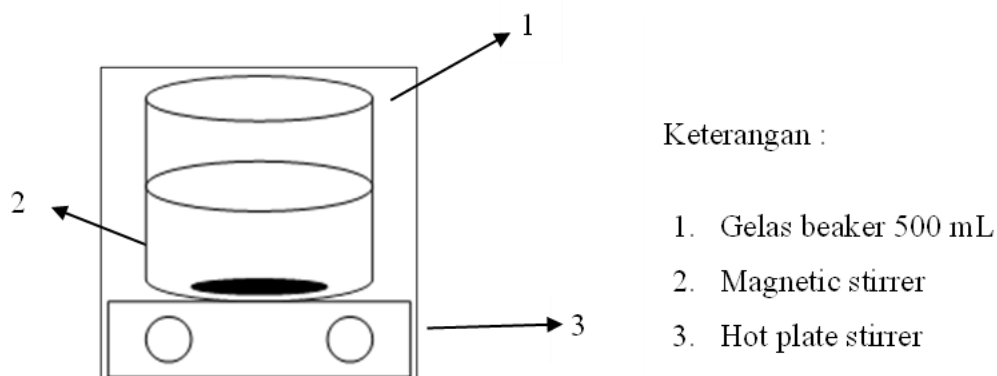
2.2. Metode

Analisa Awal Limbah Sarung

Sebelum dilakukannya percobaan maka perlu dilakukannya analisa awal berupa pengecekan pH, warna dari limbah sampel (visual), dan *Chemical Oxygen Demand*.

Prosedur Percobaan Pengaturan pH Limbah

Melakukan pengetesan pH awal sampel yang diperoleh dari penampungan limbah. Menambahkan H_2SO_4 jika pH sampel terlalu basa atau menambahkan NaOH jika pH sampel terlalu asam. Penambahan H_2SO_4 atau NaOH dilakukan agar pH sampel menjadi 3. Reaktor yang digunakan berupa gelas beaker bervolume 500 mL. Reaktor terlebih dahulu dilakukan pencucian dengan asam sulfat 10% yang berguna untuk meminimalisir adanya kontaminasi yang dapat mengganggu proses analisis limbah. Selama mengoperasikan reaktor digunakan magnetic stirrer yang berfungsi untuk menghomogenkan larutan. Kecepatan pengadukan sebesar 200 rpm selama 60 menit dengan sampel yang diambil setiap interval 10 menit. Reaktor dibungkus menggunakan aluminium foil yang berfungsi untuk mencegah cahaya masuk dan mengganggu proses analisis limbah.



Gambar 1. Rangkaian Alat Penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

Pigmen dalam limbah buatan ini adalah turunan dari pigmen Azo. Pewarna azo dibedakan oleh kehadiran ikatan istimewa yang disebut ikatan nitrogen ganda ($-N=N-$). Reagen Fenton memicu pembentukan radikal hidroksil (OH^*) yang sangat oksidatif untuk mendegradasi pewarna tekstil dengan memutus ikatan gugus azo pada molekul pewarna tersebut, menyebabkan intensitas warnanya berangsur-angsur menurun (Tunç, Gürkan and Duman, 2012). Persamaan matematis degradasi bahan organik dalam Limbah Cair Industri Sarung dapat di jelaskan secara kuantitatif dengan kinetika reaksi. Ada 3 model kinetik yang digunakan untuk menguji data eksperimen pengolahan Limbah Cair Industri Sarung dengan metode fenton yaitu orde pertama, orde kedua, dan *Behnajady Modirshahla Ghanbery* (BMG). Degradasi bahan organik dalam limbah cair industri sarung dilihat dari parameter nilai COD, dimana COD mencerminkan keseluruhan konsentrasi bahan organik yang ada dalam air limbah (Hakika dkk, 2019).

3.1. Kinetika Reaksi

Untuk menganalisis kinetika reaksi, berdasarkan data dalam grafik tersebut konsentrasi terhadap waktu dapat memeriksa apakah data tersebut sesuai dengan model kinetika reaksi tertentu, seperti orde pertama, orde kedua atau BMG Model.

1. Grafik Konsentrasi Terhadap Waktu:

Jika data menunjukkan penurunan eksponensial, reaksi tersebut mungkin mengikuti kinetika reaksi orde pertama. Jika data menunjukkan penurunan yang lebih linier terhadap waktu, reaksi tersebut mungkin mengikuti kinetika reaksi orde kedua. Jika data menunjukkan kinetika yang lebih kompleks, memperhitungkan berbagai faktor yang mempengaruhi laju reaksi dalam sistem *multiphasic*, reaksi tersebut mungkin mengikuti kinetika reaksi BMG Model.

2. Perhitungan Konstanta Laju Reaksi:

Untuk reaksi orde pertama, kita dapat menggunakan persamaan:

$$\ln \frac{C_0}{C_t} = k_1.t \quad (2)$$

Untuk reaksi orde kedua, kita dapat menggunakan persamaan:

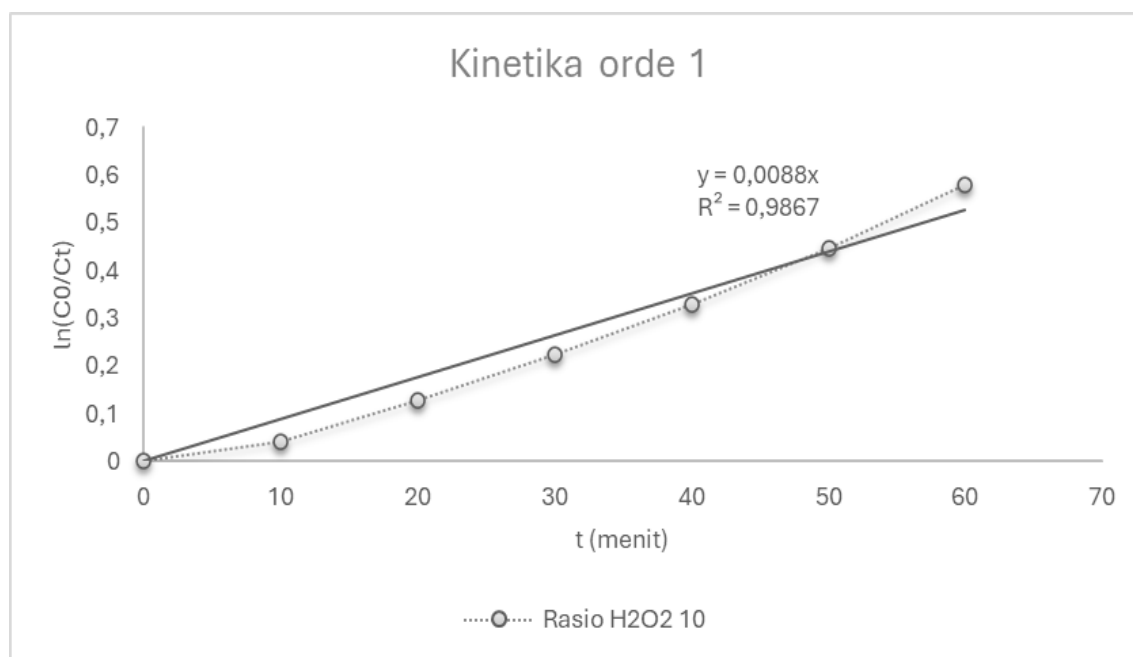
$$\frac{1}{C_t} - \frac{1}{C_0} = k_2.t \quad (3)$$

Untuk reaksi BMG Model, kita dapat menggunakan persamaan:

$$\frac{t}{1 - (C_t / C_0)} = m + b.t \quad (4)$$

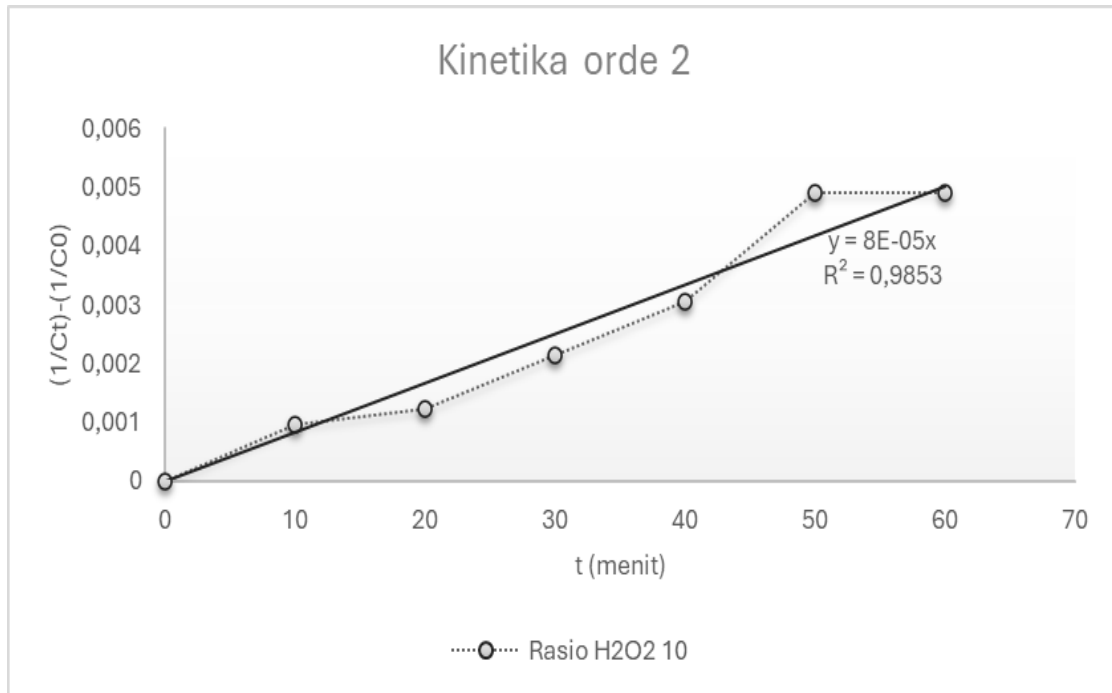
dimana C_0 adalah konsentrasi awal COD, C_t adalah konsentrasi COD terhadap waktu, k adalah konstanta laju reaksi, dan t adalah waktu (Hakika dkk., 2019).

Pengambilan data kinetika diambil pada rasio optimal yaitu rasio 10 pada kinetika Orde 1, Orde 2, dan BMG Model. Untuk data yang telah diambil akan dilakukan pengolahan data menggunakan *Microsoft Excel* sehingga didapatkan grafik berikut.

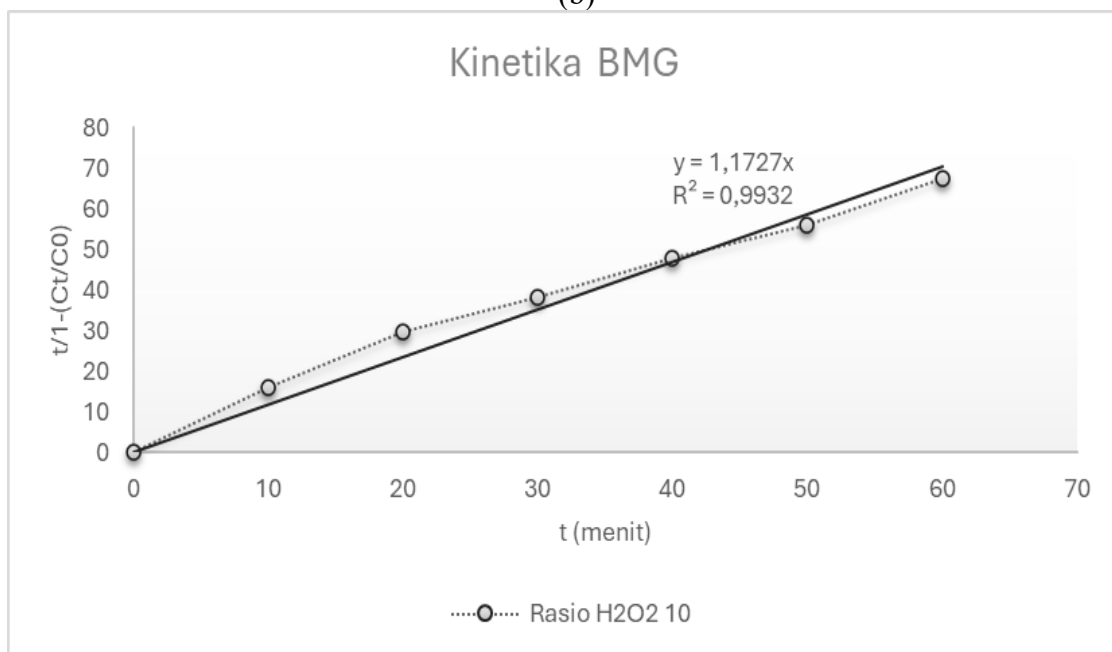


(a)

Oki Setiawan, Haposan Vincentius Manalu, Siti Adriani, Insan Kamil, Darti Purnama Sari,
 Ifti Luthviana Dewi
 oki@polibatam.ac.id: Studi Kinetika Degradasi Polutan di dalam Limbah Cair Industri
 Sarung dengan Metode Fenton



(b)



(c)

Gambar 2. (a) Kinetika pengujian COD dengan rasio H₂O₂/COD sebesar 10 (g/g) untuk Orde 1, (b) Orde 2, dan (c) Model BMG.

Dari hasil penelitian, telah ditetapkan bahwa kondisi yang paling optimal dalam mengurangi partikel organik adalah pada Rasio H₂O₂ 10, di mana nilai penurunan COD terendah tercatat sebesar 181.9 mg/L. Di Gambar 1, variabel X diwakili oleh parameter 1/COD dalam satuan mg/L, sementara variabel Y mewakili waktu dalam menit. Persimpangan pada grafik tersebut menghasilkan sebuah persamaan dengan

pilihan grafik secara linear (orde reaksi ke-1, orde reaksi ke-2, dan Model BMG) sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$Y = 0,0088 X \quad (5)$$

dengan $R^2 = 0,9867$

$$Y = 8E-05X \quad (6)$$

dengan $R^2 = 0,9853$

$$Y = 1,1727 X \quad (7)$$

dengan $R^2 = 0,9932$

Y dalam persamaan 7 diartikan sebagai $1/U$ yang merupakan penyederhanaan dari persamaan 4 dimana U adalah laju penyisihan polutan per satuan waktu, sedangkan X adalah $(1/COD)$. Dalam hal analisis menggunakan sistem regresi linear, diperolehnya nilai R^2 menunjukkan model kinetika tersebut semakin sesuai untuk menggambarkan laju degradasi polutan. Berdasarkan grafik kinetika orde 1 (a), terlihat bahwa semakin lama waktu reaksi, nilai kinetika semakin meningkat, didukung oleh nilai R^2 sebesar 0,9867 yang mendekati 1. Grafik kinetika orde 2 (b) juga menunjukkan peningkatan nilai kinetika dengan bertambahnya waktu reaksi, didukung nilai $R^2 = 0,9853$ yang juga mendekati 1. Sementara dari grafik kinetika BMG Model (c), peningkatan nilai kinetika dengan waktu reaksi yang lebih panjang dikonfirmasi oleh nilai $R^2 = 0,9932$ mendekati 1, nilai R^2 yang semakin mendekati 1 menggambarkan model kinetika yang sesuai untuk menggambarkan laju degradasi polutan didalam air limbah. Dari Hasil ini mengindikasikan bahwa laju degradasi pada reaksi fenton lebih cepat pada awal reaksi karena H_2O_2 dan katalis besi lebih banyak tersedia sehingga produksi OH^* juga semakin tinggi. Berdasarkan data eksperimen menunjukkan reaksi sangat cepat pada awal reaksi dan selanjutnya melambat, untuk itu degradasi bahan organik dengan metode fenton ini tidak cocok dimodelkan dengan kinetika orde pertama dan orde kedua karena data eksperimen tidak menghasilkan hasil yang baik dengan model tersebut (Zhang dkk., 2016).

Penelitian ini membuktikan bahwa saat rasio H_2O_2 terhadap COD bertambah, nilai kinetika juga bertambah secara linier bersamaan dengan rasio tersebut. Temuan ini mengindikasikan bahwa laju degradasi selama reaksi Fenton berlangsung lebih cepat pada rasio H_2O_2 terhadap COD yang lebih besar, disebabkan oleh pembentukan lebih banyak senyawa radikal hidroksil. Namun, pada saat rasio H_2O_2 mencapai angka 12, terjadi pengamatan bahwa kenaikan konsentrasi hidrogen peroksida (H_2O_2) ternyata memberikan efek negatif terhadap efektivitas pengurangan kebutuhan oksigen kimia (COD). Jumlah hidrogen peroksida yang berlebih ini berinteraksi dengan kalium dikromat, sehingga menyebabkan peningkatan jumlah senyawa organik.

Oksidasi senyawa organik dalam limbah cair industri sarung oleh reaksi Fenton, dalam penelitian ini, dapat dibagi menjadi dua fase. Fase pertama dikaitkan dengan reaksi cepat yang terjadi selama 40 menit pertama dan mewakili pembentukan cepat OH^* dari reaksi katalitik H_2O_2 dan Fe^{2+} yang lebih tersedia selama tahap awal reaksi, setelah itu secara langsung mendegradasi zat organik yang terkandung dalam limbah cair industri sarung. Fase kedua adalah reaksi yang lebih lambat ketika $t = 40$ hingga 60 menit menunjukkan laju pembentukan OH^* yang lebih rendah. Dalam penelitian sebelumnya terkait dengan degradasi air limbah oleh reaksi Fenton, perilaku serupa juga diamati, seperti karya (Xu dkk., 2016). Dari hasil

Oki Setiawan, Haposan Vincentius Manalu, Siti Adriani, Insan Kamil, Darti Purnama Sari,
Ifti Luthviana Dewi
oki@polibatam.ac.id: Studi Kinetika Degradasi Polutan di dalam Limbah Cair Industri
Sarung dengan Metode Fenton

eksperimen mereka menunjukkan adanya reaksi yang terjadi sangat cepat diikuti oleh reaksi yang lebih lambat.

4. Simpulan dan Saran

Kondisi optimal proses Fenton diperoleh pada rasio $\text{H}_2\text{O}_2/\text{COD}$ sebesar 10, dengan efisiensi degradasi COD mencapai 89,07% dalam waktu 60 menit pada pH 3. Berdasarkan kondisi optimal tersebut Model kinetika BMG (*Behnajady Modirshahla Ghanbery*) terbukti paling sesuai menggambarkan laju degradasi COD dibandingkan model orde pertama maupun orde kedua, dengan nilai $R^2 = 0,9932$ (mendekati 1). Selain itu Pola degradasi berlangsung dua fase fase cepat pada 40 menit pertama akibat melimpahnya H_2O_2 dan Fe^{2+} yang menghasilkan banyak radikal hidroksil (OH^*), diikuti fase lebih lambat pada menit ke 40 hingga 60 seiring berkurangnya reaktan.

References

- Agustina., T.E. and Amir, M. (2012) ‘Pengaruh Temperatur dan Waktu pada Pengolahan Pewarna Sintetis Fenton’, *Jurnal teknik kimia*, 18(3), pp. 54–61.
- Apaydin (2014) ‘Reduction of cod in wastewater from a textile industry by electro-fenton process’, *Global Nest Journal*, 16(3), pp. 536–542. Available at: <https://doi.org/10.30955/GNJ.001300>.
- Cetinkaya, S.G. *et al.* (2018) ‘Comparison of classic Fenton with ultrasound Fenton processes on industrial textile wastewater’, *Sustainable Environment Research*, 28(4), pp. 165–170. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.serj.2018.02.001>.
- Deng, Y. and Zhao, R. (2015) ‘Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Wastewater Treatment’, *Current Pollution Reports*. Springer, pp. 167–176. Available at: <https://doi.org/10.1007/s40726-015-0015-z>.
- Hakika, D.C. *et al.* (2019) ‘Decreasing COD in Sugarcane Vinasse Using the Fenton Reaction : The Effect of Processing Parameters’.
- Moertinah, S. *et al.* (2020) ‘Peningkatan Kinerja Lumpur Aktif Dengan Penambahan Karbon Aktif Dalam Pengolahan Air Limbah Industri ekstil Pewarnaan Dengan Zat Warna Indigo dan Sulfur’, *Riset Industri*, pp. 23–33.
- Pratiwi, I. and Indah Agustiorini (2023) ‘Penurunan Nilai Ph, Cod, Tds, Tss Pada Air Sungai Menggunakan Limbah Kulit Jagung Melalui Adsorben’, *Jurnal Redoks*, 8(1), pp. 55–62. Available at: <https://doi.org/10.31851/redoks.v8i1.10830>.
- Sari, D.N. *et al.* (2021) ‘Pemanfaatan Metode Fenton Dalam Pengolahan Limbah Cair Industri Sawit’, *Proceedings of ...*, pp. 145–148. Available at: <https://journal.ubb.ac.id/index.php/snppm/article/view/2725%0Ahttps://journal.ubb.ac.id/index.php/snppm/article/download/2725/1597>.

- Sitorus, E. *et al.* (2022) 'Pengantar Ilmu Lingkungan', (June 2023).
- Tunç, S., Gürkan, T. and Duman, O. (2012) 'On-line spectrophotometric method for the determination of optimum operation parameters on the decolorization of Acid Red 66 and Direct Blue 71 from aqueous solution by Fenton process', *Chemical Engineering Journal*, 181–182, pp. 431–442. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.11.109>.
- Xu, H. *et al.* (2016) 'Kinetics study of Fenton degradation of Acid Yellow G by online spectrometry technology', *Nature Environment and Pollution Technology*, 15(3), pp. 991–996.
- Zhang, Q., Wang, C. and Lei, Y. (2016) 'Fenton' s Oxidation Kinetics, Pathway, and Toxicity Evaluation of Diethyl Phthalate in Aqueous Solution', 19(1).