

Pengaruh Variasi Tegangan dan Rasio $[H_2O_2]/[COD]$ terhadap Penurunan COD pada Vinasse dengan Proses Elektro-Fenton

The Effect Variation of Voltage and Ratio of $[H_2O_2]/[COD]$ on COD Reduction in Vinasse by Using Electro-Fenton Process

Arista Dwi Rahmawati^{1*}, Sarto¹, Muhammad Mufti Azis¹

¹Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika No. 2, Sleman, Yogyakarta, Indonesia
*email : arista.dwi.rahmawati@mail.ugm.ac.id

(Submitted: 15 November 2020; Reviewed: 17 November 2020; Accepted: 19 November 2020)

Abstrak

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk menentukan pengaruh tegangan dan rasio $[H_2O_2]/[COD]$ pada penurunan kebutuhan oksigen kimiawi (COD) pada pengolahan vinasse menggunakan Elektro-Fenton. Vinasse, salah satu limbah industri bioethanol memiliki kandungan bahan organik yang tinggi dengan ditandai tingginya kadar COD hingga lebih dari 100 g/L. Proses Elektro-Fenton (EF) merupakan salah satu metode proses oksidasi lanjutan (AOP) untuk menurunkan konsentrasi senyawa organik beracun yang dapat menghambat pengolahan air limbah proses biologis dengan meningkatkan proses reaksi fenton yang memanfaatkan proses elektrokimia. Metode elektrokimia yang digunakan dalam penelitian ini yaitu elektrolisis dengan menggunakan elektroda besi. Penelitian ini mempelajari pengaruh tegangan dan rasio $[H_2O_2]/[COD]$ untuk mengevaluasi efektivitas reaksi Elektro-Fenton. Hasil dari percobaan menggunakan reaksi Elektro-Fenton menunjukkan penurunan COD sebesar 59,25% pada tegangan 6 dan rasio $[H_2O_2]/[COD]$ sebesar 0,7 yang menunjukkan bahwa perlakuan EF efektif untuk mereduksi bahan organik dalam vinasse yang dapat menghambat pengolahan air limbah proses biologis. Studi ini menghasilkan bahwa perlakuan Elektro-Fenton mampu menurunkan COD dalam vinasse dan mengurangi dampak lingkungan yang dihasilkan oleh vinasse.

Kata Kunci : proses oksidasi lanjutan, vinasse, elektro-fenton, *wastewater treatment*, kebutuhan oksigen kimiawi

Abstract

The main objective of this research is to determine the effect of voltage and ratio of $[H_2O_2]/[COD]$ in decreasing chemical oxygen demand (COD) in vinasse processing using Electro-Fenton. Vinasse, one of the bioethanol industrial wastes contains high organic matter characterized by a high COD of up to 100 g/L. The Electro-Fenton (EF) process is one of the advanced oxidation process (AOP) methods to reduce the concentration of organic compounds that can inhibit wastewater treatment biological process by enhancing the fenton reaction process that utilizes electrochemical processes. The electrochemical method used in this research is electrolysis using iron electrodes. This study investigates the effect of the voltage and ratio $[H_2O_2]/[COD]$ to evaluate the effectiveness of the Electro-Fenton reaction. The results of the experiment using the Elektro-Fenton reaction showed that can decreased the COD of vinasse as much 59,25% at a voltage of 6 and a ratio of $[H_2O_2]/[COD]$ of 0.7 which indicates that EF treatment is effective in reducing organic matter in vinasse which can inhibit wastewater treatment biological process. This study resulted that the Electro-Fenton treatment was able to reduce COD in vinasse and the environmental impact generated by vinasse.

Keywords: *advanced oxidation process, vinasse, electro-fenton, wastewater treatment, chemical oxygen demand.*

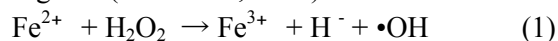
1. PENDAHULUAN

Vinasse biasa dikenal dengan *stillage* atau *distillery wastewater* merupakan limbah yang dihasilkan dari proses distilasi setelah fermentasi karbohidrat pada industri bioethanol. Air limbah ini merupakan masalah yang besar dari industri bioethanol karena dalam proses produksinya menghasilkan vinasse dalam jumlah yang besar. Industri bioethanol menghasilkan vinasse sebanyak 9 hingga 13 kali lipat untuk setiap liter produksi (Wilkie et al., 2000). Karakteristik dari vinasse memiliki kondisi pH asam (3,5 – 5) berwarna coklat gelap/tua dan mengandung bahan organik, hara nitrogen serta kalium yang melimpah menyebabkan kebutuhan oksigen kimiawi (*Chemical Oxygen Demand/COD*) tinggi berkisar 100 – 150 g/L (España-Gamboa et al., 2011). Karakteristik tersebutlah yang menyebabkan vinasse memiliki dampak negatif terhadap lingkungan karena dengan tingginya kadar COD dapat mengakibatkan menipisnya oksigen terlarut pada air permukaan di sungai maupun sumber air dan dapat mencemari tanah (Beltran de Heredia et al., 2005). Dengan demikian, vinasse tidak dapat langsung dibuang ke lingkungan.

Beberapa proses pengolahan vinasse telah dilakukan dengan mendegradasi bahan organik menjadi zat yang lebih sederhana, antara lain dengan menggunakan koagulan, elektrokoagulan, fisika dengan menggunakan sedimentasi dan adsorpsi, biologi dengan menggunakan jenis mikroba *chrysosporium*. Seperti yang telah dilakukan oleh (Irmanto et al., 2013) dengan menggunakan metode *Multi Soil Layering* (MSL) dengan hasil penurunan yang cukup signifikan yaitu sebesar 80,85% tetapi kurang baik karena membutuhkan waktu yang cukup lama yaitu 40 hari dan biaya cukup besar untuk menurunkan COD vinasse.

Proses oksidasi lanjutan (*advanced oxidation processes/AOP*) merupakan metode pengolahan yang telah berhasil digunakan sebagai metode *pretreatment* untuk mengurangi konsentrasi senyawa organik yang menghambat pengolahan air limbah proses biologis dengan pembentukan radikal hidroksil ($\bullet OH$). Radikal hidroksil ($\bullet OH$) efektif dalam mendegradasi senyawa organik karena merupakan salah satu radikal bebas

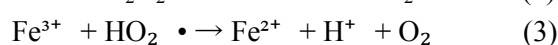
yang paling reaktif ($\pm 2,8V$) mampu mendegradasi berbagai macam zat kontaminan dan polutan, terutama polutan organik (Stasinakis, 2008) :



Reaksi fenton, salah satu metode proses oksidasi yang mudah dijalankan, waktu proses singkat dan efisien untuk mengolah air limbah dengan kadar polutan yang tinggi dibandingkan metode AOP lainnya seperti ozon atau radiasi ultrasonik (Hakika et al., 2019). Tetapi reaksi fenton memiliki kekurangan yaitu pada suplai ion besi yang harus ditambahkan dengan senyawa kimia seperti *ferric nitrate nonahydrate* ($Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$) dapat menghasilkan senyawa lain yang akan mengganggu proses degradasi senyawa organik serta tidak stabil ketersediaan ion besi (Vatanpour et al., 2009).

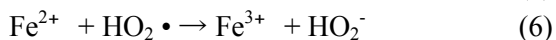
Dalam beberapa tahun terakhir, metode elektro-kimia diterapkan dalam pendegradasian bahan organik yang memiliki toksisitas tinggi dan kemampuan penguraian biologis rendah. Reaksi Elektro-Fenton merupakan metode yang digunakan untuk mengatasi kekurangan reaksi fenton, dengan mekanisme fenton dan elektrokoagulasi yang dilakukan bersamaan. Suplai ion besi yang diperlukan dalam reaksi fenton akan stabil karena dihasilkan dari elektroda. Kelebihan dari reaksi Elektro-Fenton yaitu kemampuannya dalam mendegradasi senyawa organik menjadi karbon dioksida (CO_2), air (H_2O) dan ion anorganik (Atmaca, 2009). Mekanisme oksidasi Fenton menghasilkan radikal hidroksil ($\bullet OH$) dari reaksi katalis antara ion besi (Fe^{2+}/Fe^{3+}) hasil elektroda dengan hidrogen peroksida (H_2O_2) dalam kondisi asam (pH 2-6) (Hakika et al., 2019).

Metode EF yang digunakan dalam penelitian ini, ion Fe (II) diproduksi secara elektrokimia dari anoda besi dan juga dapat beregenerasi dengan reaksi berikut yang meningkatkan efisiensi EF (Atmaca, 2009) :

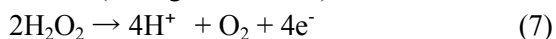


Konsentrasi H_2O_2 optimal dapat memberikan hasil yang sesuai harapan daripada dosis oksidan berlebih. Jika dosis H_2O_2 meningkat

secara berlebihan, dua reaksi (5) dan (6) dapat terbentuk dan menyebabkan pembentukan radikal yang kurang reaktif dari radikal hidroksil yaitu terbentuknya radikal peroksil.



Selain itu, reaksi elektroda kompetitif berikut mungkin menghambat dan mengurangi efisiensi reaksi Elektro-Fenton jika menggunakan arus DC yang tinggi. Reaksi pengganggu ini dapat diatasi dengan pengaturan pH awal dari reaksi Elektro-Fenton (Zhang et al., 2006).



Reaksi Elektro-Fenton telah digunakan untuk mengurangi bahan organik atau toksisitas pada berbagai macam air limbah, seperti limbah penyamakan kulit, rumah sakit, farmasi, industri tekstil dan pengolahan air lindi. Seperti yang telah dilakukan oleh (Kurt et al., 2007) dan (Fatihah, 2015) dengan penurunan COD 70-90% yang menunjukkan bahwa reaksi Elektro-Fenton dapat mereduksi bahan organik yang terkandung didalam air limbah. Tetapi penurunan COD pada percobaan tersebut masih cukup rendah karena COD awal sebelum dilakukan percobaan berkisar 2.000 hingga 20.000 mg/L. Pada percobaan ini nilai COD vinasse sangat tinggi lebih dari 100.000 mg/L dan nilai ini dapat menjadi tantangan untuk dapat menentukan efektivitas dari proses Elektro-Fenton pada pengolahan vinasse. Efektivitas proses tergantung pada tegangan dan rasio $[H_2O_2]/[COD]$ yang digunakan.

Tujuan dari percobaan ini adalah untuk mengetahui pengaruh tegangan dan rasio $[H_2O_2]/[COD]$ terhadap reaksi Elektro-Fenton serta menentukan efektivitas reaksi Elektro-Fenton sebagai metode yang efisien dan ekonomis untuk pengolahan vinasse. Efektivitas reaksi Elektro-Fenton dievaluasi dalam kaitannya dengan nilai penurunan COD.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu Vinasse yang diperoleh dari PS Madukismo, sebuah industri bioetanol molase yang berlokasi di Yogyakarta, Indonesia. Karakteristik vinasse disajikan pada Tabel 1. Hidrogen peroksida (H_2O_2) dengan

konsentrasi 50% berat diperoleh dari PT Peroksida Indonesia Pratama (PIP) sebagai oksidator, dan elektroda besi sebagai sumber ion besi. Bahan lain yang digunakan yaitu aquadest, kalium dikromat ($K_2Cr_2O_4$), asam sulfat (H_2SO_4), perak sulfat (Ag_2SO_4), ferro ammonium sulfat ($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$), indikator feroin.

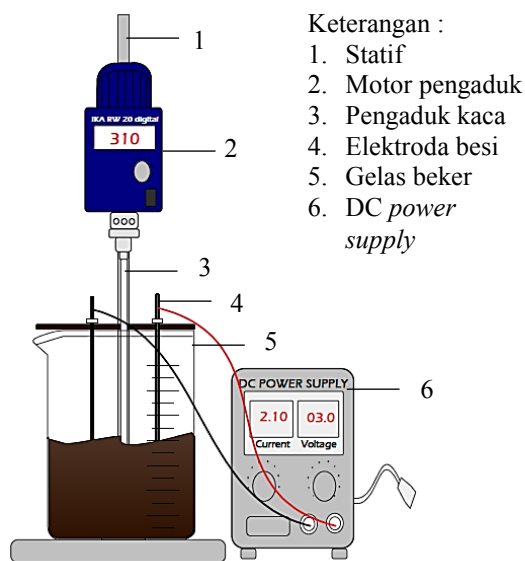
Tabel 1. Karakteristik Vinasse

Parameter	Satuan	Nilai
COD	mg/L	117.600
BOD ₅	mg/L	31.250
pH	-	4
Warna	-	Coklat gelap

Sedangkan alat yang digunakan dalam penelitian antara lain DC *power supply* (cody 3005DT), motor pengaduk (IKA RW 20 Digital), gelas beker (*pyrex*), labu takar (*pyrex*), gelas ukur (*pyrex*), buret (*pyrex*), pipet volume (*pyrex*), pipet ukur (*pyrex*), pipet tetes, bola hisap, erlenmeyer (*pyrex*), pendingin bola, pH meter (ATC pH-009(I)A) dan kompor listrik (*maspion elektrik stove*).

2.1 Proses Elektro-Fenton

Pengolahan vinasse pada penelitian ini menggunakan metode Elektro-Fenton dengan langkah pertama 1 L vinasse diambil dan dimasukkan dalam gelas beker 2000 mL. Kemudian disiapkan 2 buah elektroda besi sebagai katoda dan anoda dimasukkan ke dalam gelas beker dengan jarak elektroda masing-masing 4 cm kemudian disambungkan dengan DC *power supply*. DC *power supply* diatur sesuai kondisi yaitu dengan variasi tegangan 3, 6 dan 9 volt. Limbah diaduk dengan *stirer* pada kecepatan 300 rpm. Larutan H_2O_2 dimasukkan dengan variasi rasio $[H_2O_2]/[COD]$ 0,3; 0,5 dan 0,7. Waktu elektrolisis dan pengadukan dilakukan selama 1 jam. Untuk setiap variasi parameter, dilakukan analisis kadar COD vinasse sebelum dan sesudah dilakukan proses Elektro-Fenton. Rangkaian alat proses Elektro-Fenton terdapat pada gambar 1.



- Keterangan :
1. Statif
 2. Motor pengaduk
 3. Pengaduk kaca
 4. Elektroda besi
 5. Gelas beker
 6. DC power supply

Gambar 1. Rangkaian alat Elektro-Fenton

2.2 Analisis COD

Analisis COD yang dilakukan menggunakan metode refluks terbuka (SNI 06-6989.15-2004) secara titrimetri.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa selama proses Elektro-Fenton, terbentuk senyawa radikal hidroksil ($\bullet OH$) dan terjadi penurunan COD pada vinasse. Pembentukan radikal hidroksil ($\bullet OH$) bergantung pada beberapa faktor seperti tegangan dan rasio $[H_2O_2]/[COD]$. Oleh karena itu, pengaruh dari parameter tersebut diselidiki.

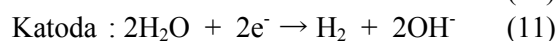
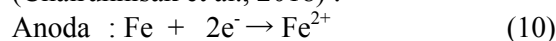
3.1. Pengaruh Tegangan

Parameter operasi dari proses Elektro-Fenton salah satunya yaitu tegangan. Tegangan pada sel elektrokimia yang terdiri dari anoda dan katoda sangat mempengaruhi reaksi pada masing-masing elektroda. Gambar 2 menunjukkan adanya pengaruh pada nilai COD. Pada tegangan 6 menunjukkan penurunan COD paling baik dibandingkan dengan tegangan yang lain.

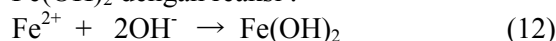
Tegangan akan mempengaruhi kuat arus yang dihasilkan dari DC power supply. Berdasarkan hukum ohm, semakin besar tegangan maka kuat arus yang dihasilkan akan semakin besar pula. Hal tersebut jika dikaitkan dengan Hukum Farady I yang menyatakan bahwa massa zat yang terbentuk

pada masing-masing elektroda akan berbanding lurus dengan kuat arus listrik yang akan mengalir pada elektroda tersebut, menunjukkan bahwa semakin besar kuat arus yang dihasilkan maka akan semakin banyak proses oksidasi yang terjadi pada anoda. Dengan demikian, pada anoda jumlah Fe yang teroksidasi menjadi ion Fe^{2+} semakin banyak dan di katoda jumlah air yang akan tereduksi menjadi OH^- juga semakin banyak. Jumlah ion Fe^{2+} dan OH^- pada proses tersebut akan mempengaruhi proses degradasi pada vinasse.

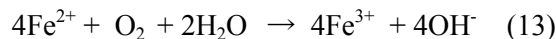
Proses yang terjadi dengan menggunakan elektroda besi pada anoda dan katoda pada Elektro-Fenton yaitu (Chairunnisak et al., 2018) :



Ion Fe^{2+} bereaksi dengan OH^- membentuk $Fe(OH)_2$ dengan reaksi :

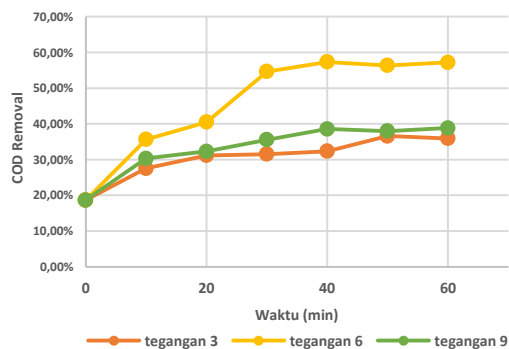


Pada kondisi asam maka akan terbentuk :



Kemudian reaksi Elektro-Fenton berjalan seperti pada persamaan (2) – (4).

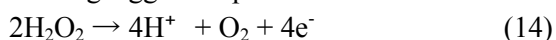
Dengan adanya variasi tegangan maka suplai dari Fe^{3+} dan Fe^{2+} dalam reaksi tersebut juga akan berbeda. Semakin besar tegangan maka ion Fe yang terbentuk akan semakin banyak. Hal tersebut berpengaruh pada reaksi terhadap senyawa H_2O_2 untuk mendegradasi bahan organik. Tetapi reaksi tersebut tidak selalu berjalan sesuai teori yang ada karena kemungkinan terjadinya reaksi gangguan.



Gambar 2. Pengaruh tegangan terhadap penurunan COD pada vinasse dengan reaksi Elektro-Fenton

Dari penelitian ini, Gambar 2 menunjukkan tegangan 6 yang paling baik untuk penurunan COD pada vinasse karena

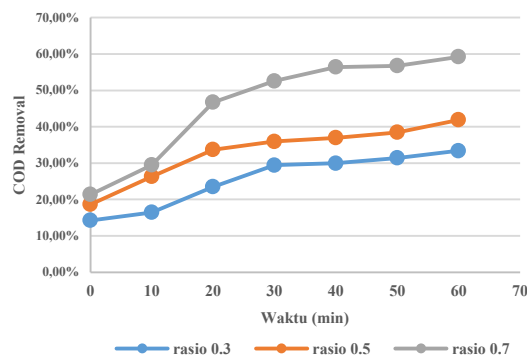
dengan tegangan yang tidak terlalu tinggi dan rendah dapat meningkatkan efisiensi dari reaksi Elektro-Fenton dengan tersedianya ion Fe yang cukup dan reaksi gangguan yang minimal. Kemudian untuk tegangan rendah yaitu pada tegangan 3 penurunan COD tidak terjadi signifikan karena dengan tegangan yang rendah maka suplai ion Fe juga akan sedikit. Dengan demikian kebutuhan ion Fe untuk mendegradasi bahan organik dalam vinasse belum tercukupi. Sedangkan pada tegangan 9 menunjukkan hasil yang tidak efektif untuk penurunan COD vinasse disebabkan kecenderungan terbentuknya reaksi gangguan seperti :



Reaksi gangguan tersebut biasa terjadi pada tegangan yang tinggi dan akan menghalangi reaksi antara ion Fe dan senyawa H_2O_2 yang kemudian akan menyebabkan ion Fe yang bersisa tidak mendegradasi bahan organik dari vinasse serta radikal hidroksil yang terbentuk tidak mencukupi kebutuhan. Hal ini dapat diatasi dengan pengaturan pH awal dari air limbah jika memang diharuskan untuk menggunakan tegangan yang tinggi (Atmaca, 2009).

3.2. Pengaruh Rasio $[H_2O_2]/[COD]$

Rasio $[H_2O_2]/[COD]$ termasuk salah satu hal yang penting dalam reaksi Elektro-Fenton karena ketersediaan senyawa H_2O_2 akan mempengaruhi keberhasilan dalam mendegradasi bahan organik. Kelebihan H_2O_2 dapat mengais radikal hidroksil dan akan meningkatkan biaya dari pengolahan air limbah. Sementara itu, jika jumlah H_2O_2 tidak mencukupi maka tidak dapat menghasilkan radikal hidroksil yang dibutuhkan oleh reaksi Elektro-Fenton. Besarnya dosis H_2O_2 sangat bergantung pada nilai COD awal. Umumnya jika COD awal tinggi maka membutuhkan lebih banyak H_2O_2 , karena biaya H_2O_2 cukup tinggi maka diperlukan penentuan kebutuhan dari H_2O_2 yang tepat. Pengaruh rasio H_2O_2 terhadap COD berkisar antara 0,3 sampai 0,7 pada pH 4 dan tegangan 6. Dengan rasio yang berbeda maka titik 0 sebagai nilai awal pada saat hidrogen peroksida dimasukkan juga berbeda sesuai dengan hasil volume dari masing-masing rasio. Hasilnya disajikan dalam Gambar 3.



Gambar 3. Pengaruh rasio $[H_2O_2]/[COD]$ terhadap penurunan COD pada vinasse dengan reaksi Elektro-Fenton

Dari penelitian ini, efisiensi penghilangan nilai COD meningkat seiring dengan meningkatnya rasio $[H_2O_2]/[COD]$. Efisiensi penyisihan tertinggi pada rasio tertinggi (0,7) dengan presentase penurunan sebesar 59,25%. Pada rasio 0,3 dan 0,5 efisiensi penurunan lebih rendah karena presentase penurunan masing-masing 33,39% dan 41,88%. Hal ini dikarenakan semakin tinggi volume hidrogen peroksida maka pembentukan radikal hidroksil ($\bullet OH$) juga akan semakin cepat dihasilkan. Pada rasio yang lebih tinggi, radikal hidroksil yang melimpah akan bereaksi dengan lebih banyak zat organik dan laju degradasi akan semakin meningkat. Hal ini sejalan dengan studi sebelumnya yang telah dilakukan oleh Beltran de Heredia et al., (2005) yang menyelidiki pengaruh reaksi fenton sebagai perlakuan pada limbah industry penyulingan anggur dengan bahan organik yang lebih sedikit ($COD = 16,5 \text{ g/L}$ dan $pH = 3,76$). Rasio yang digunakan mulai dari 0,05 hingga 4,5 (g/g). Tren hasil yang diperoleh serupa dengan hasil dari penelitian ini, menyatakan bahwa dosis hidrogen peroksida yang lebih tinggi akan menurunkan COD air limbah. Dari rasio yang tertinggi $[H_2O_2]/[COD]$ menunjukkan penurunan COD sebesar 77%.

Penurunan COD selama proses Elektro-Fenton menunjukkan penurunan cepat selama 20 menit pertama dengan degradasi bahan organik yang lebih lambat hingga 60 menit. Dalam percobaan ini, persamaan (1) akan terjadi kemudian diikuti dengan terbentuknya persamaan (2) untuk menghasilkan radikal hidroksil dan konsentrasinya dalam larutan akan menurun. Setelah terbentuk radikal

hidroksil dalam larutan maka akan bereaksi dengan bahan organik dan kemudian mendegradasinya menjadi senyawa lebih sederhana. Namun jika jumlah radikal hidroksil dalam larutan berlebih seperti pada persamaan (5) yang akan menghasilkan radikal peroksil ($HO_2\bullet$) dengan kemampuan yang lebih rendah dibandingkan hidroksil. Hal tersebut juga menyebabkan H_2O_2 akan habis. Oleh karena itu, pada menit 60 produksi radikal hidroksil dihentikan dan laju penurunan COD juga terhenti.

Pada *range* rasio $[H_2O_2]/[COD]$ yang digunakan dalam percobaan ini yaitu 0,3; 0,5 dan 0,7 didapatkan rasio optimal pada rasio tertinggi yaitu 0,7. Namun, karena dengan rasio tersebut masih dapat ditingkatkan jika ingin didapatkan efisiensi COD yang lebih tinggi atau jika COD awal lebih tinggi dengan mengatur parameter lain seperti pH awal.

4. KESIMPULAN

Proses Elektro-Fenton cukup efektif untuk mendegradasi kandungan bahan organik pada vinasse yang tinggi, ditandai dengan menurunnya kadar COD vinasse. Tegangan dan rasio $[H_2O_2]/[COD]$ merupakan faktor yang berpengaruh dalam pembentukan radikal hidroksil ($\bullet OH$) pada proses Elektro-Fenton. Radikal hidroksil yang memecah bahan organik vinasse menjadi lebih sederhana. Diperoleh kondisi operasi yang optimum pada tegangan 6 dan rasio $[H_2O_2]/[COD]$ sebesar 0,7 dengan penurunan COD vinasse hingga 59,25%.

DAFTAR PUSTAKA

Atmaca, E. (2009). Treatment of Landfill Leachate by Using Electro-Fenton Method. *Journal of Hazardous Materials*, 163(1), 109–114. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.06.067>

Beltran de Heredia, J., Dominguez, J. R., & Partido, E. (2005). Physico-Chemical Treatment for The Depuration of Wine Distillery Wastewaters (Vinasses). *Water Science and Technology*, 51(1), 159–166. <https://doi.org/10.2166/wst.2005.0020>

Chairunnisak, A., Arifin, B., Sofyan, H., Lubis, M. R., & Darmadi. (2018). Comparative Study on The Removal of COD from POME by Electrocoagulation and Electro-Fenton Methods: Process Optimization. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 334(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/334/1/012026>

España-Gamboa, E., Mijangos-Cortes, J., Barahona-Perez, L., Dominguez-Maldonado, J., Hernández-Zarate, G., & Alzate-Gaviria, L. (2011). Vinasses: Characterization and Treatments. *Waste Management and Research*, 29(12), 1235–1250. <https://doi.org/10.1177/0734242X10387313>

Fatihah, N. (2015). Landfill Leachate Treatment by Combination of Electro-Fenton and Sequencing Batch Reactor Method (Issue June). Tun Hussein Onn Malaysia.

Hakika, D. C., Sarto, S., Mindaryani, A., & Hidayat, M. (2019). Decreasing COD in Sugarcane Vinasse Using The Fenton Reaction: The Effect of Processing Parameters. *Catalysts*, 9(11). <https://doi.org/10.3390/catal9110881>

Irmanto, Suyata, & Zufahair. (2013). Optimasi Penurunan COD, BOD, dan TSS Limbah Cair Industri Etanol (Vinasse) PSA Palimanan dengan Metode Multi Soil Layering (MSL). 131–141.

Kurt, U., Apaydin, O., & Gonullu, M. T. (2007). Reduction of COD in Wastewater from an Organized Tannery Industrial region by Electro-Fenton process. *Journal of Hazardous Materials*, 143(1–2), 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.08.065>

Stasinakis, A. S. (2008). Use of Selected AOPs for Wastewater Treatment - A Mini-Review. *Global NEST Journal*, 10(3), 376–385.

Vatanpour, V., Daneshvar, N., & Rasoulifard, H. (2009). Electro-Fenton Degradation of Synthetic Dye Mixture: Influence of Intermediate. *Journal of Environmental Engineering Management*, 19(5), 277–

282.

<https://www.researchgate.net/publication/228829199>

Wilkie, A. C., Riedesel, K. J., & Owens, J. M. (2000). Stillage Characterization and Anaerobic Treatment of Ethanol Stillage from Conventional and Cellulosic Feedstocks. *Biomass and Bioenergy*, 19(2), 63–102. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00017-9](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00017-9)

Zhang, H., Zhang, D., & Zhou, J. (2006). Removal of COD from Landfill Leachate by Electro-Fenton Method. *Journal of Hazardous Materials*, 135(1–3), 106–111. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.11.025>