

Oksidasi Elektrokimia Termediasi dengan Elektroda Timbal untuk Pengolahan Limbah Organik dari Industri Pulp

Mediated Electrochemical Oxidation with Lead as Electrode for Organic Waste Treatment from Pulp Industry

Haryono*, Juliandri, Atiek Rostika Noviyanti, Irwan Kurnia

Departemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Padjadjaran, Jl. Ir. Soekarno Km. 21 Jatinangor – Sumedang, Indonesia, 45363

**Corresponding Author: haryono@unpad.ac.id

ABSTRAK: Industri pulp merupakan salah satu jenis industri berbasis bahan alam, yaitu lignoselulosa, yang menghasilkan limbah cair organik relatif banyak. Pemanfaatan berbagai jenis bahan kimia sintetik pada proses produksi pulp mengakibatkan limbah dari industri tersebut termasuk sebagai limbah berbahaya dan beracun. Berbagai metode pengolahan limbah cair dapat diterapkan, salah satunya adalah metode Oksidasi Elektrokimia Termediasi (OET). Metode OET memungkinkan senyawa organik pada limbah cair untuk dioksidasi menjadi senyawa anorganik sederhana dan relatif ramah lingkungan, seperti karbon dioksida dan air. Tujuan penelitian ini adalah menentukan pengaruh beda potensial antar elektroda dan waktu terhadap kinerja metode OET dengan elektroda timbal pada pengolahan limbah cair organik dari industri pulp. Beda potensial antar elektroda dipelajari pada nilai 3,0, 4,5 dan 6,0 volt, sedangkan waktu elektrolisis pada OET dipelajari selama 60, 90 dan 120 menit. Kinerja metode OET pada pengolahan limbah cair organik ditentukan berdasarkan parameter efisiensi degradasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi degradasi limbah organik maksimum dicapai ketika OET dilakukan pada beda potensial antar elektroda dan waktu elektrolisis sebesar 6,0 volt dan 120 menit. Pada kondisi operasi OET tersebut dicapai efisiensi degradasi limbah organik sebesar 99,03%.

Kata kunci : industri pulp; efisiensi degradasi; elektroda timbal; limbah organik

ABSTRACT: The pulp industry is a type of industry based on natural materials, namely lignocellulose, which produces relatively large amounts of organic liquid waste. The use of various types of synthetic chemicals in the pulp production process results in waste from this industry being classified as hazardous and toxic waste. Various methods of liquid waste treatment can be applied, one of which is the Mediated Electrochemical Oxidation (MEO) method. The MEO method allows organic compounds in liquid waste to be oxidized into simple and relatively environmentally friendly inorganic compounds, such as carbon dioxide and water. The purpose of this study was to determine the effect of the potential difference between electrodes and time on the performance of the MEO method with lead electrodes in the treatment of organic liquid waste from the pulp industry. The potential difference between electrodes was studied at values of 3.0, 4.5 and 6.0 volts, while the electrolysis time in MEO was studied for 60, 90 and 120 minutes. The performance of the MEO method in the treatment of organic liquid waste was determined based on the degradation efficiency parameters. The results showed that the maximum degradation efficiency of organic waste was achieved when MEO was carried out at a potential difference between electrodes and an electrolysis time of 6.0 volts and 120 minutes. Under these MEO operating conditions, an organic waste degradation efficiency of 99.03% was achieved.

Keywords : pulp industry; degradation efficiency; lead electrode; organic waste

1. PENDAHULUAN

Industri pulp biasanya terintegrasi dengan industri kertas. Kedua industri tersebut sebagai satu kesatuan menghasilkan polutan dalam jumlah relatif banyak dalam proses produksinya. Pada produksi 1 ton kertas dibutuhkan sekitar 50–60 m³ air, dengan sekitar 2/3 bagiannya terbuang sebagai air limbah yang mengandung 240–250 bahan kimia (Ram *et al.*, 2020; Solomon *et al.*, 2009). Air limbah dihasilkan dalam berbagai jenis proses di industri pulp dan kertas, meliputi proses pengulitan kayu dan pembuatan serpihan, pembuatan dan pemutihan pulp, pembuatan kertas dan daur ulang serat (Ashrafi *et al.*, 2015). Air limbah ini mengandung berbagai kontaminan organik dan anorganik yang sebagian besar berasal dari senyawa tanin, lignin, resin, klorin, dan logam berat (Söderholm *et al.*, 2019; Buzzini & Pires, 2007). Karakteristik air limbah dari industri kertas pada umumnya memiliki warna, nilai pH, COD (*Chemical Oxygen Demand*), BOD (*Biochemical Oxygen Demand*), TDS (*Total Dissolved Solids*), dan SS (*Suspended Solids*) yang ekstrim (Kesalkar *et al.*, 2012). Sebagian besar industri pulp dan kertas menggunakan bahan kimia pemutih yang mengandung khlorin. Khlorin akan bereaksi dengan senyawa organik dari senyawa beracun, seperti dioksin (Mandeep *et al.*, 2019) yang berpotensi terikut bersama air limbah. Oleh karena itu, air limbah dari industri pulp dan kertas memiliki dampak buruk yang signifikan

terhadap ekosistem perairan dan daratan. Paparan air limbah industri pulp dan kertas berdampak toksik terhadap berbagai spesies ikan, termasuk kerusakan hati dan perubahan fisiologis (Mehmood *et al.*, 2019).

Ada banyak proses pengolahan limbah industri pulp dan kertas, yaitu proses pengolahan aerobik, anaerobik, fotokatalisis, ozonasi, koagulasi-flokulasi, adsorpsi dan elektrokimia (Amor *et al.*, 2019; Hubbe *et al.*, 2016). Jenis, jumlah dan karakteristik air limbah penting untuk merancang teknologi pengolahan terbaik. Teknologi elektrokimia memberikan alternatif pengolahan air limbah yang lebih efektif dan efisien dengan memanfaatkan keunggulannya dalam hal keserbagunaan, kompatibilitas lingkungan, dan potensi efektivitas biaya (Martinez-Huitle & Ferro, 2006). Metode elektrokimia berprinsip pada reaksi reduksi dan oksidasi dengan potensial tertentu di antara kedua elektroda. Proses oksidasi di anoda dimanfaatkan untuk mengoksidasi polutan organik menjadi produk yang lebih sederhana dan tidak berbahaya. Oksidasi elektrokimia diakui sebagai teknologi pengolahan air limbah dengan efisiensi relatif tinggi, kesederhanaan desain, dan tingkat mineralisasi polutan organik relatif tinggi (Kislyi *et al.*, 2023).

Salah satu mekanisme proses oksidasi di anoda adalah oksidasi tidak langsung. Oksidasi tidak langsung terjadi melalui bantuan suatu agen pengoksidasi atau oksidator berupa spesi radikal. Spesi

radikal dapat diperoleh dari berbagai sumber, seperti asam hipoklorit, hidrogen peroksida, dan ozon (Sarkka & Sillampaa, 2020). Oksidator tersebut pada tahap reaksi di anoda, selanjutnya disebut sebagai mediator. Mediator akan mengalami reduksi sehingga bersifat lebih oksidatif untuk mengoksidasi limbah senyawa organik (Solomon *et al.*, 2009). Oleh karena itu metode oksidasi demikian dikenal sebagai Oksidasi Elektrokimia Termediasi (OET), atau *Mediated Electrochemical Oxidation*. Kinerja OET dalam mendegradasi senyawa organik dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti jenis elektroda, jenis mediator, beda potensial, dan desain sel elektrokimia (Cournoyer & Smith, 1999). Perbedaan material penyusun dari elektroda akan memberikan perbedaan tingkat selektivitas dan efisiensi dalam mengoksidasi senyawa organik (Anglada *et al.*, 2009). Sedangkan mediator harus bersifat mampu mensuplai spesi radikal tertentu, dan mampu diregenerasi atau dihasilkan kembali secara elektrokimia di dalam sel elektrolisis (Chen *et al.*, 2012).

Tujuan penelitian ini adalah menentukan pengaruh beda potensial antar elektroda dan waktu terhadap kinerja metode OET dengan elektroda timbal pada pengolahan limbah cair organik dari industri pulp.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan untuk pengaruh beda potensial antar elektroda

dan waktu operasi terhadap kinerja metode OET pada degradasi limbah organik dari industri pulp. Untuk mencapai tujuan penelitian tersebut digunakan alat, bahan, dan prosedur penelitian sebagai berikut:

2.1 Alat dan Bahan

Pada penelitian ini, metode OET dilakukan dengan seperangkat alat yang terdiri dari sel elektrokimia, konduktometer, elektroda timbal, catu daya listrik arus searah, pendingin refluks, *hot plate* berpengaduk magnet, termometer, corong pisah, kertas saring, buret, corong Buchner, dan alat gelas lainnya untuk keperluan titrasi.

Bahan pada penelitian ini adalah sampel air limbah industri pulp, larutan mediator (campuran ferro sulfat 1,0 N dan hidrogen peroksida 0,1 M dengan rasio 1:1), dan barium hidroksida oktahidrat (p.a., Merck) sebagai penangkap gas karbon dioksida. Sedangkan untuk keperluan analisis digunakan asam oksalat (p.a., Merck), asam sulfat (98%, Merck), besi (II) amonium sulfat (p.a., Merck), kalium dikromat (p.a., Merck), kalium iodat (p.a., Merck), kalium iodida (p.a., Merck), akuades, amilum, indikator difenilamina, dan indikator phenolphthalein.

2.2 Prosedur

Penelitian diawali dengan penentuan nilai COD (*Chemical Oxygen Demand*) dari sampel air limbah industri pulp. Penentuan nilai COD dilakukan

berdasarkan metode refluks tertutup 5200-D (Sawyer *et al.*, 2003). Selain dilakukan penentuan nilai COD, konduktivitas atau daya hantar listrik air limbah juga ditentukan dengan konduktometer (Mettler Toledo, S700-Std-Kit).

Tahap berikutnya dilakukan percobaan utama, yaitu oksidasi terhadap polutan organik di dalam air limbah industri pulp. Air limbah industri pulp sebanyak 150 mL dicampurkan dengan 10 mL larutan mediator. Campuran air limbah dan larutan mediator selanjutnya dimasukkan ke dalam labu leher tiga yang berperan sebagai bak sel elektrolisis. Kedua elektroda (anoda dan katoda) dari bahan timbal berbentuk batang silinder ditempatkan pada sel elektrolisis di kedua leher samping labu leher tiga sampai tertutup dengan baik. Kedua elektroda dihubungkan dengan catu daya arus searah (Nagoya, tegangan output: 3–12 volt). Sel elektrolisis dihubungkan dengan saluran pipa gelas ke labu erlenmeyer berisi larutan barium hidroksida 0,0928 N sebagai media untuk “menangkap” gas karbon dioksida yang terbentuk selama proses OET berlangsung. Gas karbon dioksida tersebut terbentuk dari degradasi limbah organik. Proses OET terhadap air limbah industri pulp dioperasikan pada variasi beda potensial antar elektroda sebesar 3,0, 4,5 dan 6,0 volt, dengan variasi waktu elektrolisis pada OET selama selama 60, 90 dan 120 menit.

Kinerja atau kemampuan OET dalam mendegradasi limbah organik pada

setiap variasi operasi (beda potensial dan waktu elektrolisis) ditentukan berdasarkan parameter efisiensi degradasi. Efisiensi degradasi dihitung dengan Persamaan (1). Efisiensi degradasi tersebut pada prinsipnya merupakan rasio mol gas karbon dioksida yang dihasilkan sebagai produk degradasi limbah organik terhadap mol limbah organik awal (sebelum diolah). Konsentrasi limbah organik awal diwakili oleh parameter COD. Sedangkan jumlah gas karbon dioksida yang terbentuk ditentukan dengan metode titrasi menggunakan titran berupa larutan asam oksalat 0,04 N untuk menghitung perubahan konsentrasi dari larutan barium hidroksida (antara sebelum dengan setelah proses OET) yang berperan sebagai “penangkap” gas karbon dioksida tersebut.

$$ED = \frac{(M_{MP,1} - M_{MP,2}) V_{MP}}{COD_L V_L} \times 100\% \quad \dots(1)$$

dengan: ED = efisiensi degradasi (%);

$M_{MP,1}$, $M_{MP,2}$, V_{MP} = molaritas awal, molaritas akhir (mol/L), dan volume (L) dari media penangkap ($Ba(OH)_2$) gas CO_2 ; COD_L , V_L = *Chemical Oxygen Demand* (mg/L) dan volume (L) limbah organik.

Satuan COD_L yang awalnya adalah mg/L, sebelum digunakan untuk perhitungan dengan Persamaan (1), diubah terlebih dahulu menjadi mol/L dengan pendekatan bahwa senyawa organik pada limbah merupakan glukosa (Davis *et al.*, 2020).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Nilai COD Limbah Cair Organik dari Industri Pulp

Pada penelitian ini digunakan sampel air limbah industri pulp dari salah satu pabrik pembuatan pulp di daerah Purwakarta, Jawa Barat. COD atau *Chemical Oxygen Demand* merupakan parameter untuk memperkirakan konsentrasi senyawa organik di dalam larutan dengan mengukur jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi senyawa organik tersebut dengan oksidator kuat (Sawyer *et al.*, 2003). Berdasarkan hasil analisis COD terhadap sampel air limbah industri pulp diperoleh hasil bahwa sampel air limbah memiliki nilai COD sebesar 818,8 mg/L. Nilai COD tersebut melampaui batas maksimal syarat air limbah buangan dari industri tekstil. Syarat maksimum nilai COD dari Baku Mutu Air Limbah bagi Usaha dan/ Kegiatan Pulp dan Kertas adalah sebesar 120–350 mg/L, tergantung pada jenis proses pembuatan pulp (Peraturan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 16 tahun 2019).

Nilai COD dari air limbah industri pulp pada penelitian ini, untuk keperluan menghitung efisiensi degradasi, selanjutnya diubah satuannya menjadi molaritas sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (1). Jika diambil ketentuan bahwa senyawa organik pada limbah didekati sebagai glukosa, sesuai hasil perhitungan, nilai COD dari air limbah

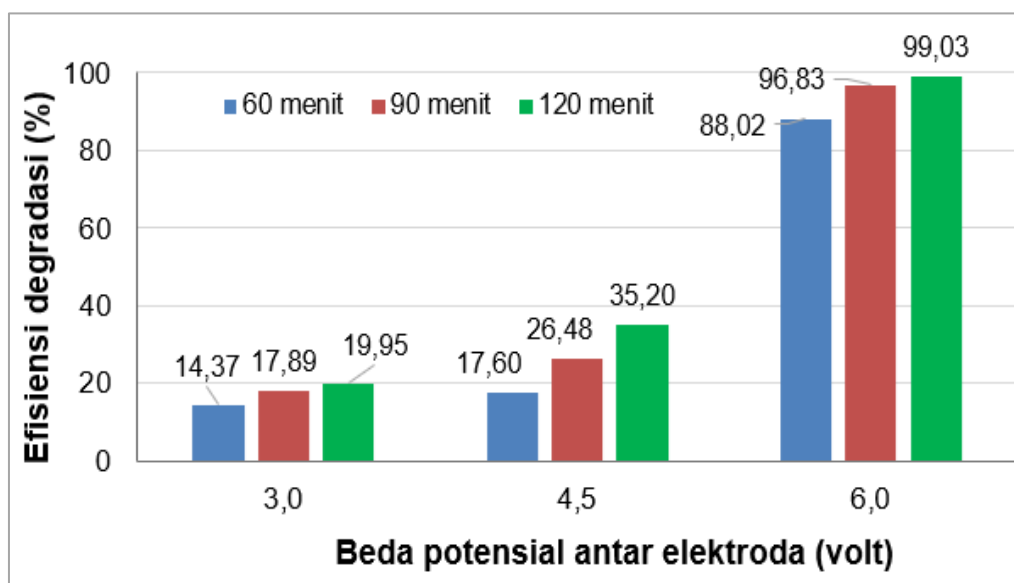
tersebut setara dengan konsentrasi sebesar $4,54 \times 10^{-3}$ mol/L atau molar (M).

3.2. Pengaruh Beda Potensial antar Elektroda terhadap Efisiensi Degradasi Limbah Organik

Pada proses oksidasi elektrokimia, degradasi senyawa organik pada limbah sering kali dinyatakan dengan istilah mineralisasi. Mineralisasi tersebut mengandung pengertian perubahan struktur molekul organik pada limbah melalui reaksi oksidasi, baik dengan atau tanpa mediator, menjadi gas karbon dioksida dan produk oksidasi lainnya (Kislyi *et al.*, 2023).

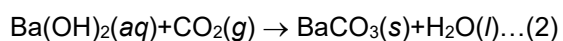
Timbal sering digunakan sebagai elektroda karena memiliki beberapa kelebihan, diantaranya adalah daya hantar listrik tinggi, stabil, overpotensial evolusi oksigen relatif tinggi, dan harga relatif murah (Sarkka & Sillampaa, 2020). Permukaan anoda non aktif dengan nilai over potensial evolusi oksigen yang tinggi akan memfasilitasi pembentukan spesi kimia reaktif, misalnya radikal hidroksil ($\cdot\text{OH}$) yang mampu mengoksidasi sebagian besar polutan organik kompleks (Mousset *et al.*, 2018).

Nilai efisiensi degradasi polutan organik pada limbah cair dari industri pulp sebagai dampak perubahan beda potensial antar elektroda ditampilkan pada Gambar 1. Data penelitian pada Gambar 1 menunjukkan bahwa peningkatan beda potensial antar elektroda pada berbagai



Gambar 1. Pengaruh perubahan beda potensial antar elektroda timbal pada berbagai waktu terhadap efisiensi degradasi limbah organik pada metode OET

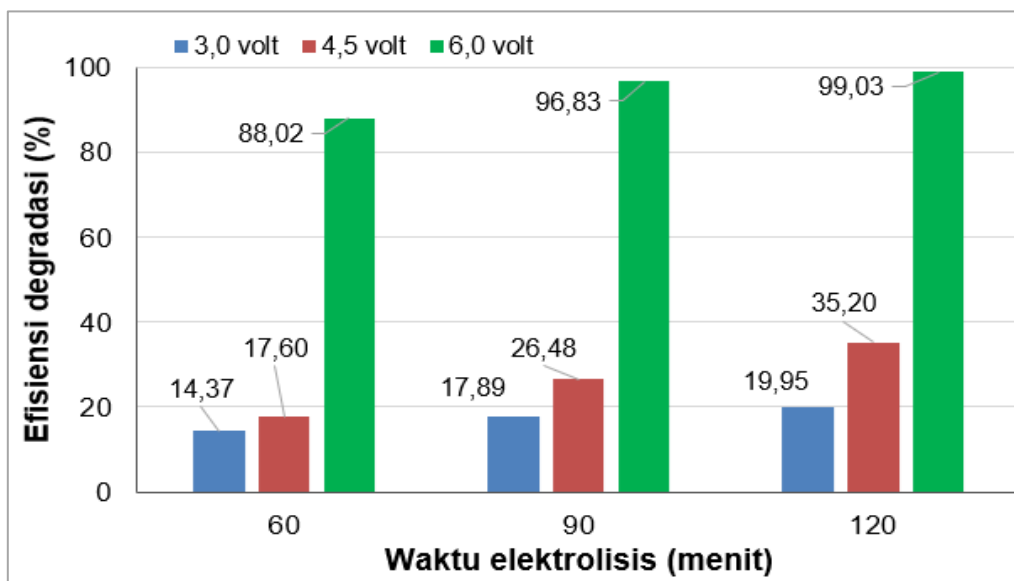
variasi waktu elektrolisis mengakibatkan semakin meningkatnya efisiensi degradasi, sehingga semakin banyak senyawa organik pada limbah yang teroksidasi menjadi gas karbon dioksida. Gas karbon dioksida selama proses degradasi polutan organik dialirkan, dan kemudian bereaksi dengan larutan barium hidroksida atau $\text{Ba}(\text{OH})_2$ sebagai media penangkap gas menurut Persamaan (2) berikut:



Oleh karena itu, selama larutan $\text{Ba}(\text{OH})_2$ “menangkap” gas CO_2 , konsentrasi $\text{Ba}(\text{OH})_2$ sisa di dalam larutannya akan semakin mengalami penurunan.

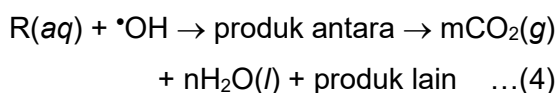
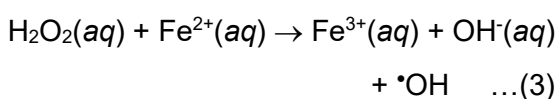
Peningkatan beda potensial antar elektroda, sesuai dengan hukum Ohm, dengan hambatan diasumsikan konstan, akan meningkatkan kuat arus listrik secara linier yang mengalir melalui sirkuit

konduktor eksternal yang menghubungkan antar kedua elektroda tersebut (Chang, 2010). Arus listrik merupakan banyaknya muatan listrik yang dibawa oleh elektron per satuan waktu. Oleh karena itu, peningkatan beda potensial mengakibatkan semakin meningkatnya jumlah elektron yang berpindah di antara kedua elektroda untuk memfasilitasi terjadinya reaksi oksidasi di anoda dan reduksi di katoda. Pada proses EOT, degradasi polutan organik kompleks terjadi melalui reaksi oksidasi, sehingga semakin banyaknya jumlah elektron tersebut akan meningkatkan probabilitas pembentukan spesi kimia radikal. Akibatnya, jumlah polutan organik kompleks yang berhasil termineralisasi menjadi gas karbon dioksida juga semakin meningkat.



Gambar 2. Pengaruh waktu elektrolisis pada berbagai perubahan beda potensial antar elektroda timbal terhadap efisiensi degradasi limbah organik pada metode OET

Tahapan keterlibatan mediator, yaitu besi (II) sulfat dan hidrogen peroksida, pada pembentukan radikal hidroksil ($\cdot\text{OH}$), kemudian dilanjutkan dengan reaksi degradasi senyawa organik (R) dari polutan oleh $\cdot\text{OH}$ tersebut ditunjukkan pada Persamaan (3) dan (4) (Barrera-Diaz *et al.*, 2014).



Nilai m dan n pada Persamaan (4) bergantung pada komposisi unsur dari senyawa organik polutan R.

3.2. Pengaruh Waktu Elektrolisis Elektroda terhadap Efisiensi Degradasi Limbah Organik

Arus listrik merupakan banyaknya muatan listrik yang mengalir tiap satu satuan waktu. Oleh karena itu, pada beda potensial atau kuat arus listrik tertentu, semakin lama waktu reaksi reduksi-oksidasi, maka semakin besar muatan listrik yang mengalir antar elektroda (Chang, 2010). Dan sesuai dengan hukum Faraday dalam elektrokimia, semakin besar muatan listrik antar elektroda tersebut berarti semakin banyak elektron yang terlibat pada reaksi reduksi-oksidasi selama proses OET terhadap senyawa organik, sehingga semakin lama waktu elektrolisis dilakukan, maka semakin banyak senyawa organik yang terdegradasi. Penjelasan tersebut sesuai dengan studi hubungan antara waktu elektrolisis dengan efisiensi degradasi senyawa organik polutan yang diperoleh

pada penelitian ini. Hasil penelitian tersebut ditampilkan pada Gambar 2.

Data penelitian pada Gambar 2 menunjukkan bahwa pada semua beda potensial antar elektroda, terdapat pengaruh yang konsisten antara waktu elektrolisis terhadap efisiensi degradasi. Semakin lama waktu elektrolisis, maka efisiensi degradasi polutan organik pada proses OET semakin meningkat.

KESIMPULAN

Metode OET dengan mediator dalam bentuk campuran antara besi (II) sulfat dan hidrogen peroksida telah berhasil diterapkan untuk mengolah limbah cair organik dari industri pulp. Keberhasilan tersebut direpresentasikan dengan parameter efisiensi degradasi.

Efisiensi degradasi senyawa organik pada limbah cair menjadi gas karbon dioksida dipengaruhi oleh beda potensial antar elektroda dan waktu operasi elektrolisis. Semakin besar beda potensial antar elektroda pada berbagai waktu elektrolisis, efisiensi degradasi juga semakin meningkat. Efisiensi degradasi tersebut juga semakin meningkat seiring dengan semakin lamanya waktu elektrolisis pada setiap nilai beda potensial antar elektroda yang diterapkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada Riza Rizkiah atas keterlibatannya dalam pengkoleksian data. Terima kasih juga kami haturkan kepada

Departemen Kimia FMIPA Universitas Padjadjaran atas dukungan fasilitas untuk penyelesaian penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Amor, C., Marchão, L., Lucas, M. S., & Peres, J. A. 2019. Application of advanced oxidation processes for the treatment of recalcitrant agro-industrial wastewater: a review. *Water*, 11(issue 2), 205.
- Anglada, A., Urtiaga, A., & Ortiz, I. 2009. Contributions of electrochemical oxidation to wastewater treatment: fundamentals and review of applications. *Journal of Chemical Technology*, 84, 1747–1755.
- Ashrafi, O., Yerushalmi, L., & Haghighat, F. 2015. Wastewater treatment in the pulp-and-paper industry: a review of treatment processes and the associated greenhouse gas emission. *Journal of Environmental Management*, 1, 1–12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.05.010>
- Barrera-Díaz, C., Cañizares, P., Fernández, F. J., Natividad, R., & Rodrigo, M. A. 2014. Electrochemical advanced oxidation processes: an overview of the current applications to actual industrial effluents. *Journal of the Mexican Chemical Society*, 58(3), 256–275.
- Buzzini, A. P., & Pires, E. C. 2007. Evaluation of a upflow anaerobic sludge blanket reactor with partial recirculation of effluent used to treat wastewaters from pulp and paper plants. *Bioresource Technology*, 98(issue 9), 1838–1848.
- Chang, R. (2010). *Chemistry*, 10th edition. Singapore: McGraw-Hill Companies Inc.
- Chen, T., Huang, K., & Pan, Y. 2012. Electrochemical versus Ce(IV)-

- Mediated Electrochemical Oxidation (MEO) degradation of acetaminophen in aqueous solutions. *International Journal of Electrochemical Science*, 7, 11191–11205.
- Cournoyer, M. E., & Smith, W. H. 1999. Parametric optimization of the MEO process for treatment of mixed waste residues. *Waste Management '99 Conference*, February 28–March 4, USA.
- Davis, T. L., Dirks, B., Carnero, E. A., Corbin, K. D., Krakoff, J., et al. 2021. Chemical Oxygen Demand (COD) can be converted to gross energy for food items using a linear regression model. *Journal of Nutrition*, 151(2), 445–453. <https://doi.org/10.1093/jn/nxaa321>
- Hubbe, M. A., Metts, J. R., Hermosilla, D., Blanco, M. A., Yerushalmi, L., Haghighat, F., Lindholm-Lehto, P., Khodaparast, Z., Kamali, M., & Elliott, A. 2016. Wastewater treatment and reclamation: a review of pulp and paper industry practices and opportunities. *BioResources*, 11, 7953–8091.
- Kesalkar, V. P., Khedikar, I. P., & Sudame, A. M. 2012. Physico-chemical characteristics of wastewater from paper Industry. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2(issue 4), 137–143.
- Kislyi, A., Moroz, I., Guliaeva, V., Prokhorov, Y., Klevtsova, A., & Mareev, S. 2023. Electrochemical oxidation of organic pollutants in aqueous solution using a Ti₄O₇ particle anode. *Membranes*, 13(521), 1–14 <https://doi.org/10.3390/membranes13050521>
- Mandeep, Gupta, G. K. , Liu, H., & Shukla, P. 2019. Pulp and paper industry–based pollutants, their health hazards and environmental risk. *Current Opinion in Environmental Science and Health*, 12, 48–56. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2019.09.010>
- Martinez-Huitle, C. A., & Ferro, S. 2006. Electrochemical oxidation of organic pollutants for the wastewater treatment: direct and indirect processes. *Chemical Society Reviews*, 35, 1324–1340.
- Mehmood, K., Ur Rehman, S. K., Wang, J., Farooq, F., Mahmood, Q., Jadoon, A. M., Javed, M. F., & Ahmad, I. 2019. Treatment of pulp and paper industrial effluent using physicochemical process for recycling. *Water*, 11(2393), 1–15. <https://dx.doi.org/10.3390/w11112393>
- Mousset, E., Oturan, N., & Oturan, M. A. 2018. An unprecedented route of OH radical reactivity evidenced by an Eelectrocatalytical process: Ipso-substitution with perhalogenocarbon compounds. *Applied Catalysis B: Environmental*, 226, 135–146. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.12.028>
- Ram, C., Rani, P., Gebru, K., & Mariam Abraha, M. 2020. Pulp and paper industry wastewater treatment: use of microbes and their enzymes. *Physical Sciences Reviews*, 5(issue 10), 20190050. <https://doi.org/10.1515/psr-2019-0050>
- Sarkka, H., & Sillampaa, M. 2020. Electrooxidation treatment of pulp and paper mill circulating water and wastewaters. *Advanced Water Treatment*, 311–361, 2020. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819227-6.00005-X>
- Sawyer, C. N., McCarty, P. L., & Parkin, G. F. 2003. *Chemistry for environmental engineering and science* 5th edition, Singapore: McGraw-Hill Companies Inc.
- Solomon, P. A., Chiya, A. B., Manickam, V., & Natesan, B. 2009. Electrochemical degradation of pulp and paper industry wastewater.

Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 84, 1303–1313.
<https://doi.org/10.1002/jctb.2176>

Söderholm, P., Bergquist, A. K., & Söderholm, K. 2019. Environmental

regulation in the pulp and paper industry: impacts and challenges. *Current Forestry Reports*, 5(4), 185–198. <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00097-0>