

## Pengolahan Air Limbah Industri Pulp dengan Metode Oksidasi Elektrokimia Termediasi

Haryono<sup>1</sup>, Juliandri<sup>2</sup>, Evy Ernawati<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Departemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Padjadjaran

Korespondensi: [haryono@unpad.ac.id](mailto:haryono@unpad.ac.id)

### ABSTRAK

Industri pulp mengolah bahan organik alam, khususnya senyawa dalam kelompok lignoselulosa, dengan memanfaatkan berbagai jenis bahan kimia. Oleh karena itu, industri pulp berpotensi menghasilkan limbah cair berbahaya dan beracun dengan warna relatif pekat. Oksidasi Elektrokimia Termediasi (OET) dapat diterapkan untuk mengolah limbah cair dari industri pulp tersebut. Metode OET memungkinkan senyawa organik pada limbah cair untuk dimineralisasi menjadi karbondioksida dan air. Tujuan penelitian ini adalah menentukan pengaruh beda potensial antar elektrode grafit dan volume larutan natrium hipoklorit sebagai mediator terhadap efisiensi mineralisasi dan penurunan intensitas warna dari air limbah industri pulp. Beda potensial antar elektrode divariasikan pada 4,5; 6,0; dan 7,5 volt, sedangkan volume mediator dipelajari pada variasi 50 dan 100 mL. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi mineralisasi tertinggi dicapai sebesar 82,5% ketika elektrolisis pada sel OET dilakukan beda tegangan 7,5 volt dan volume mediator sebesar 100 mL, Sedangkan penurunan intensitas warna tertinggi dicapai pada beda potensial sel sebesar 4,5 volt dan volume mediator 100 mL, dengan penurunan intensitas warna sebesar 61,61%.

Kata kunci: industri pulp, intensitas warna, limbah cair organik, mineralisasi

### ABSTRACT

*The pulp industry processes natural organic materials, especially compounds in the lignocellulosic group, by utilizing various types of chemicals. Therefore, the pulp industry has the potential to produce hazardous and toxic liquid waste with a relatively dark color. Mediated Electrochemical Oxidation (MEO) can be applied to treat the wastewater from the pulp industry. The MEO method allows organic compounds in wastewater to be mineralized into carbon dioxide and water. The purpose of this study was to determine the effect of the potential difference between graphite electrodes and the volume of sodium hypochlorite solution as a mediator on the efficiency of mineralization and the reduction of color intensity from pulp industry wastewater. The potential difference between the electrodes is varied at 4.5; 6.0; and 7.5 volts, while the volume of the mediator was studied at variations of 50 and 100 mL. The results showed that the highest mineralization efficiency was achieved at 82.5% when electrolysis of the MEO cell was carried out at a voltage difference of 7.5 volts and a mediator volume of 100 mL, while the highest decrease in color intensity was achieved at a cell potential difference of 4.5 volts and a mediator volume of 100 mL, with a decrease in color intensity of 61.61%.*

**Keyword:** pulp industry, color intensity, organic wastewater, mineralization

### PENDAHULUAN

Industri pulp dan kertas merupakan salah satu jenis industri yang menghasilkan polutan dalam jumlah relatif banyak. Pada produksi 1 ton kertas dibutuhkan sekitar 50–60 m<sup>3</sup> air, dengan sekitar 2/3 bagiannya terbuang sebagai air limbah yang mengandung 240–250 bahan kimia [1, 2]. 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 [3]. Air limbah ini mengandung berbagai kontaminan organik dan anorganik yang sebagian besar berasal dari senyawa tanin, lignin, resin, klorin, dan logam berat [4, 5]. 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 [6]. Sebagian besar industri pulp dan kertas menggunakan bahan kimia pemutih yang mengandung khlorin. Khlorin akan bereaksi dengan senyawa organik dari senyawa beracun, seperti dioksin [7] 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 dilaporkan memberikan efek toksik terhadap berbagai spesies ikan, termasuk kerusakan hati dan perubahan fisiologis [8].

Ada banyak proses pengolahan limbah industri pulp dan kertas, yaitu proses pengolahan aerobik,

anaerobik, fotokatalisis, ozonasi, koagulasi-flokulasi, adsorpsi dan elektrokimia [9, 10]. 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 [11]. Metode elektrokimia berprinsip pada reaksi reduksi dan oksidasi dengan potensial tertentu di antara kedua elektrode. Proses oksidasi di anode 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 [12].

Salah satu mekanisme proses oksidasi di anode 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 [13]. Oksidator tersebut pada tahap reaksi di anode, selanjutnya disebut sebagai mediator. Mediator akan mengalami oksidasi sehingga bersifat lebih oksidatif untuk mengoksidasi limbah senyawa organik [2]. Oleh karena itu metode oksidasi demikian dikenal sebagai Oksidasi Elektrokimia Termediasi, atau *Mediated Electrochemical Oxidation* (MEO). Kinerja MEO dalam mendegradasi senyawa organik dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti jenis elektroda, jenis mediator, beda potensial, dan desain sel elektrokimia [14]. Perbedaan material penyusun dari elektrode akan memberikan perbedaan tingkat selektivitas dan efisiensi dalam mengoksidasi senyawa organik [15]. Sedangkan mediator harus bersifat mampu menyuplai spesi radikal tertentu, dan mampu meregenerasi atau dihasilkan kembali secara elektrokimia di dalam sel elektrolisis [16].

Tujuan penelitian adalah menentukan pengaruh beda potensial antar elektrode grafit dan volume larutan natrium hipoklorit sebagai mediator terhadap efisiensi mineralisasi dan penurunan intensitas warna dari air limbah industri pulp.

## METODE PENELITIAN

Bahan untuk percobaan degradasi limbah dengan metode MEO pada penelitian ini adalah sampel air limbah industri pulp, natrium hipoklorit (teknis, 5,25%), dan barium hidroksida (p.a., Merck) sebagai penangkap gas karbon dioksida, hasil degradasi limbah organik pulp. Sedangkan untuk keperluan analisis digunakan asam oksalat, asam sulfat, besi (II) amonium sulfat, kalium dikromat, kalium iodat, kalium iodide (semua grade p.a., Merck), aquades, amilum, indikator difenilamina, dan indikator phenolphthalein.

Kemudian untuk alat yang digunakan antara lain sel elektrokimia, konduktometer, elektrode grafit, 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.

Penelitian diawali dengan penentuan nilai COD dari sampel air limbah industri pulp. Penentuan nilai COD dilakukan berdasarkan metode refluks tertutup 5200-D [17]. Selain dilakukan penentuan nilai COD, konduktivitas atau daya hantar listrik air limbah juga ditentukan dengan konduktometer (Mettler Toledo, S700-Std-Kit). Selanjutnya dilakukan percobaan utama, yaitu oksidasi terhadap polutan organik di dalam air limbah industri pulp. Air limbah industri pulp sebanyak 200 mL dicampurkan dengan 100 mL larutan natrium hipoklorit 5,25%. Campuran air limbah dan larutan natrium hipoklorit selanjutnya dimasukkan ke dalam labu leher tiga yang berperan sebagai bak sel elektrolisis. Kedua elektrode (anode dan katode) dari bahan grafit berbentuk batang silinder (kadar grafit 90% dari PT Rimi Teknik Bandung) ditempatkan pada sel elektrolisis di kedua leher samping labu leher tiga sampai tertutup dengan baik. Kedua elektrode 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 0,5 N. Pipa penghubung digunakan sebagai saluran untuk aliran gas karbon dioksida yang terbentuk selama proses MEO. Proses MEO terhadap air limbah industri pulp dioperasikan pada variasi beda potensial 4,5, 6,0, dan 7,5 V selama 60 menit.

Proses MEO ditentukan kinerjanya berdasarkan efisiensi mineralisasi dan penurunan intensitas warna dari air limbah industri pulp. Efisiensi mineralisasi dihitung berdasarkan Persamaan (1), sedangkan penurunan intensitas warna dihitung dengan Persamaan (2) berdasarkan perubahan absorbansi dari sampel air limbah antara sebelum dengan setelah proses MEO. Jumlah gas karbon dioksida yang dihasilkan sebagai ukuran kinerja mineralisasi senyawa organik dari air limbah diukur dengan metode titrasi (dengan larutan asam oksalat 0,2 N) untuk menentukan perubahan mol dari larutan barium hidroksida 0,5 N antara sebelum dengan setelah proses MEO. Absorbansi dari air limbah diukur dengan spektrofotometer sinar tampak (Genesys-10) pada panjang gelombang 460 nm. Percobaan proses MEO diulang kembali (dengan tahapan sama) terhadap campuran air limbah industri pulp sebanyak 200 mL dan 50 mL larutan natrium hipoklorit 5,25%.

$$\% \text{ Efisiensi mineralisasi} = \frac{(M_{\text{Ba(OH)}_2 \text{ Awal}} - M_{\text{Ba(OH)}_2 \text{ Akhir}}) \times V_{\text{Ba(OH)}_2}}{M_{\text{Nilai COD}} \times V_{\text{Limbah}}} \times 100\% \quad \dots(1)$$



$$\% \text{ Penurunan warna} = \frac{(A_{\text{Limbah Awal}} - A_{\text{Limbah Akhi}})}{A_{\text{Limbah Awal}}} \times 100\% \quad \dots(2)$$

Dengan: M = molaritas (mol/L), V = volume (liter), A = absorbansi

## HASIL DAN ANALISIS

### Nilai COD, Intensitas Warna, dan Konduktivitas dari Air Limbah Industri Pulp

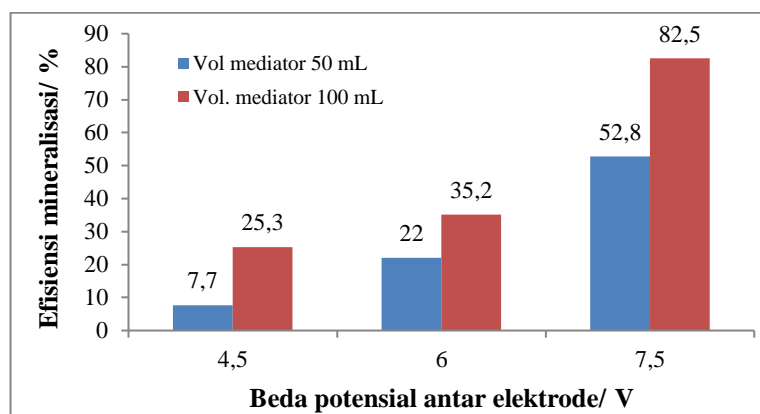
Pada penelitian ini digunakan sampel air limbah industri pulp dari salah satu pabrik pembuatan pulp di daerah Purwakarta, Jawa Barat. COD atau *Chemical Oxygen Demand* merupakan parameter untuk memperkirakan konsentrasi senyawa organik di dalam larutan dengan mengukur jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi senyawa organik tersebut dengan oksidator kuat. 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. Peraturan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 16 tahun 2019 tentang Baku Mutu Air Limbah bagi Usaha dan/ Kegiatan Pulp dan Kertas mensyaratkan nilai maksimum nilai COD sebesar 120–350 mg/L, tergantung pada jenis proses pembuatan pulp. Air limbah dari industri pulp dengan proses Kraft dikelantang memiliki batas maksimum nilai COD sebesar 350 mg/L.

Pengukuran intensitas warna dari sampel air limbah industri pulp diperoleh hasil bahwa sampel air limbah tersebut memiliki absorbansi sebesar 0,224%. Sedangkan pengukuran konduktivitas listrik terhadap sampel air limbah industri pulp diperoleh hasil sebesar 27,4  $\mu$ S/cm. Nilai konduktivitas listrik dari sampel air limbah industri pulp tersebut relatif kecil sehingga berpengaruh terhadap relatif lambatnya mobilitas ionik, khususnya ion-ion dari mediator oksidasi, di dalam larutan menuju anode. Fakta relatif rendahnya nilai konduktivitas listrik dari sampel air limbah industri pulp tersebut dapat dianggap wajar karena kandungan air limbah didominasi oleh senyawa-senyawa organik turunan lignin yang pada dasarnya memiliki kemampuan menghantarkan listrik relatif rendah.

### Pengaruh Beda Potensial dan Volume Mediator terhadap Efisiensi Mineralisasi Polutan Organik

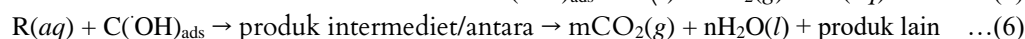
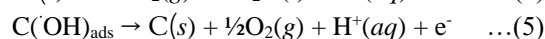
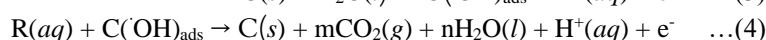
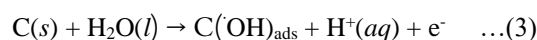
Mineralisasi polutan organik pada proses oksidasi elektrokimia mengandung pengertian perubahan struktur molekul polutan organik melalui reaksi oksidasi, baik dengan atau tanpa mediator, menjadi gas karbon dioksida dan produk oksidasi lainnya [12]. Elektrode untuk elektrolisis digunakan grafit dengan pertimbangan bahwa grafit bersifat stabil (elektrode non aktif), tahan korosi, harga relatif murah, mudah diperoleh, dan memiliki nilai overpotensial evolusi oksigen relatif tinggi, yaitu 1,7 V [13, 15]. Permukaan anode non aktif dengan nilai overpotensial evolusi oksigen tinggi akan memfasilitasi pembentukan spesi kimia reaktif hidroksil radikal (OH $\cdot$ ) yang mampu mengoksidasi sebagian besar polutan organik kompleks [18]. Pada proses MEO di penelitian ini digunakan natrium hipoklorit sebagai mediator. Ion hipoklorit dari natrium hipoklorit mampu menghasilkan spesi radikal oksigen reaktif melalui serangkaian tahap reaksi [11]. Nilai efisiensi mineralisasi polutan organik pada air limbah industri pulp sebagai dampak perubahan beda potensial antar elektrode dan volume mediator ditampilkan pada Gambar 1.



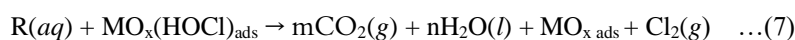
Gambar 1. Pengaruh beda potensial dan volume mediator terhadap efisiensi mineralisasi pada proses MEO terhadap polutan organik dalam air limbah industri pulp

Hasil penelitian pada Gambar 1 menunjukkan, peningkatan beda potensial antar elektrode akan meningkatkan secara konsisten nilai efisiensi mineralisasi. Hal tersebut mengindikasikan terjadinya peningkatan jumlah polutan organik yang berhasil dioksidasi menjadi gas karbon dioksida seiring dengan

diperbesarnya beda potensial antar elektrode. Peningkatan beda potensial antar elektrode, 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 elektrode tersebut [19]. Arus listrik merupakan banyaknya muatan listrik yang dibawa oleh elektron per satuan waktu. Oleh karena itu, semakin meningkat beda potensial, semakin meningkat pula jumlah elektron yang berpindah di antara kedua elektrode untuk memfasilitasi terjadinya reaksi oksidasi di anode dan reduksi di katode. Pada proses MEO, reaksi oksidasi dimana proses degradasi polutan organik kompleks terjadi, maka 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. Reaksi oksidasi polutan organik dengan mempertimbangkan bahwa grafit merupakan elektrode non aktif ditampilkan pada Persamaan (3) sampai (5) [20], sedangkan reaksi total mineralisasi atau degradasi polutan organik ditunjukkan pada Persamaan (6) [12].  $C(OH)_{ads}$  menunjukkan spesi radikal hidroksil teradsorpsi pada permukaan anode grafit. R merupakan simbol dari polutan organik di dalam air limbah. Nilai m dan n pada Persamaan (4) bergantung pada komposisi unsur dari polutan organik R.



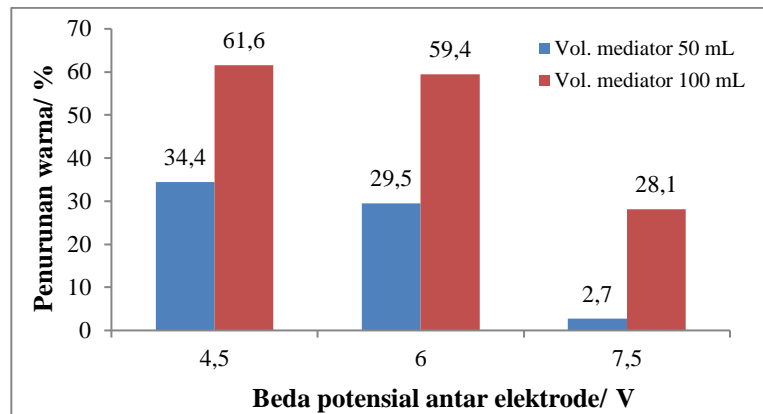
Volume mediator sodium hipoklorit pada proses MEO berpengaruh terhadap nilai efisiensi mineralisasi polutan organik. Data pada Gambar 1 menunjukkan bahwa pemakaian mediator dalam jumlah lebih banyak akan meningkatkan efisiensi mineralisasi. Penambahan volume natrium hipoklorit akan secara langsung meningkatkan jumlah spesi radikal untuk terlibat dalam proses oksidasi terhadap polutan organik. Persamaan (7) menunjukkan dugaan reaksi yang disederhanakan dari keterlibatan spesi hipoklorit pada proses MEO [11]. M adalah spesi kimia dari material anode.



Pengaruh keterlibatan mediator natrium hipoklorit dalam meningkatkan efisiensi mineralisasi limbah organik tersebut terkonfirmasi pula oleh peneliti lain. Zhang *et al.* [21] melaporkan bahwa penggunaan natrium hipoklorit pada proses MEO selama 50 menit dalam mendegradasi zat warna tekstil dari air limbah mampu memisahkan zat warna dan COD masing-masing sebesar 100 dan 87%. Persentase pemisahan zat warna dan COD tersebut akan berkurang jika tidak ada keterlibatan natrium hipoklorit (oksidasi langsung), yaitu berturut-turut sebesar 47 dan 50%.

#### **Pengaruh Beda Potensial dan Volume Mediator terhadap Penurunan Warna Air Limbah**

Pengaruh beda potensial dan volume mediator terhadap penurunan warna pada proses MEO air limbah ditampilkan pada Gambar 2. Data penelitian pada Gambar 2 menunjukkan hubungan berlawanan antara perubahan beda potensial dengan penurunan warna air limbah. Peningkatan nilai beda potensial antar elektrode justru berdampak terhadap berkurangnya persentase penurunan warna dari air limbah secara konsisten. Kecenderungan tersebut terjadi pada dua variasi volume mediator, 50 dan 100 mL. Hal tersebut disebabkan oleh terjadinya degradasi terhadap elektrode grafit sebagai akibat pemakaian beda potensial yang semakin tinggi pada proses MEO. Degradasi anode grafit tersebut menghasilkan partikel karbon yang selanjutnya bermigrasi ke air limbah, sehingga intensitas warna dari air limbah setelah oksidasi meningkat. Grafit pada dasarnya merupakan elektrode non aktif karena tidak terlibat langsung pada reaksi reduksi-oksidasi [15]. Namun partikel karbon penyusun grafit berpotensi terdegradasi pada beda potensial relatif tinggi. Pada beda potensial tinggi, suhu sel elektrokimia akan meningkat sehingga partikel karbon pada grafit akan mengalami oksidasi oleh oksigen dari udara yang berdifusi ke dalam sistem elektrolisis, menjadi gas karbon monoksida.



Gambar 2. Pengaruh beda potensial dan volume mediator terhadap penurunan warna air limbah industri pulp pada proses MEO

Pemakaian mediator natrium hipoklorit dengan volume semakin banyak, sesuai data pada Gambar 2, tetap berdampak secara konsisten terhadap peningkatan penurunan warna dari air limbah. Pemakaian mediator yang semakin banyak akan mengakibatkan oksidasi terhadap polutan organik semakin intensif, karena suplai radikal pengoksidasi juga akan lebih banyak. Penurunan warna air limbah industri pulp tertinggi sebesar 61,6% dicapai ketika proses MEO diselenggarakan pada beda potensial 4,5 V dan digunakan mediator natrium hipoklorit sebanyak 100 mL.

#### KESIMPULAN

Elektrolisis dengan beda potensial antar elektrode semakin besar berdampak pada peningkatan efisiensi mineralisasi polutan organik dari air limbah, namun menyebabkan semakin rendahnya persentase penurunan warna air limbah. Peningkatan beda potensial akan memperbanyak partikel elektron yang terlibat dalam reaksi elektrokimia, namun suhu sistem reaksi mengalami kenaikan yang berakibat pada terjadinya degradasi partikel karbon penyusun anode grafit.

Semakin banyak penggunaan mediator natrium hipoklorit pada proses MEO, persentase efisiensi mineralisasi dan penurunan warna air limbah semakin meningkat secara konsisten untuk semua variasi beda potensial. Peningkatan jumlah mediator mengakibatkan suplai spesi kimia radikal sebagai agen pengoksidasi semakin banyak.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. Ram, P. Rani, K. Gebru, M. Mariam Abrha, "Pulp and Paper Industry Wastewater Treatment: Use of Microbes and Their Enzymes", *Physical Sciences Reviews*, vol. 5, issue 10, pp. 20190050, 2020. <https://doi.org/10.1515/psr-2019-0050>
- [2] P. A. Solomon, A. B. Chiya, V. Manickam, B. Natesan, "Electrochemical Degradation of Pulp and Paper Industry Wastewater", *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, vol. 84, p. 1303-1313, 2009. <https://doi.org/10.1002/jctb.2176>
- [3] O. Ashrafi, L. Yerushalmi, F. Haghightat, "Wastewater Treatment in the Pulp-and-Paper Industry: A review of treatment processes and the associated greenhouse gas emission", *Journal of Environmental Management*, pp. 1-12, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.05.010>
- [4] P. Söderholm, A. K. Bergquist, K. Söderholm, "Environmental Regulation in the Pulp and Paper Industry: Impacts and Challenges", *Current Forestry Reports*, vol. 5, no. 4, pp. 185-198, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00097-0>
- [5] A. P. Buzzini and E. C. Pires, "Evaluation of a Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor with Partial Recirculation of Effluent Used to Treat Wastewaters from Pulp and Paper Plants. *Bioresource Technology*, vol. 98, issue 9, pp. 1838-1848, 2007.
- [6] V. P. Kesalkar, I. P. Khedikar, A. M. Sudame, "Physico-Chemical Characteristics of Wastewater from Paper Industry", *International Journal of Engineering Research and Applications*, vol. 2, issue 4, pp. 137-143, 2012.
- [7] Mandeep, G. K. Gupta, H. Liu, P. Shukla, "Pulp and Paper Industry-Based Pollutants, Their Health Hazards and Environmental Risk", *Current Opinion in Environmental Science and Health*, vol. 12, pp. 48-56, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2019.09.010>
- [8] K. Mehmood, S. K. Ur Rehman, J. Wang, F. Farooq, Q. Mahmood, A. M. Jadoon, M. F. Javed, I. Ahmad, "Treatment of Pulp and Paper Industrial Effluent Using Physicochemical Process for Recycling", *Water*, vol. 11, no. 2393, pp. 1-15, 2019. <https://dx.doi.org/10.3390/w11112393>

- [9] C. Amor, L. Marchão, M. S. Lucas, J. A. Peres, "Application of Advanced Oxidation Processes for the Treatment of Recalcitrant Agro-Industrial Wastewater: A Review", *Water*, vol. 11, issue 2, p. 205, 2019.
- [10] M. A. Hubbe, J. R. Metts, D. Hermosilla, M. A. Blanco, L. Yerushalmi, F. Haghghat, P. Lindholm-Lehto, Z. Khodaparast, M. Kamali, A. Elliott, "Wastewater Treatment and Reclamation: A review of Pulp and paper Industry Practices and Opportunities", *BioResources*, vol. 11, pp. 7953-8091, 2016.
- [11] C. A. Martinez-Huitle and S. Ferro, "Electrochemical Oxidation of Organic Pollutants for the Wastewater Treatment: Direct and Indirect Processes", *Chemical Society Reviews*, vol. 35, pp. 1324-1340, 2006.
- [12] A. Kislyi, I. Moroz, V. Guliaeva, Y. Prokhorov, A. Klevtsova, S. Mareev, "Electrochemical Oxidation of Organic Pollutants in Aqueous Solution Using a  $Ti_4O_7$  Particle Anode", *Membranes*, vol. 13, no. 521, pp. 1-14, 2023. <https://doi.org/10.3390/membranes13050521>
- [13] H. Sarkka, M. Sillampaa, "Electrooxidation Treatment of Pulp and Paper Mill Circulating Water and Wastewaters", *Advanced Water Treatment*, pp. 311-361, 2020. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819227-6.00005-X>
- [14] M. E. Cournoyer, W. H. Smith, "Parametric Optimization of the MEO Process for Treatment of Mixed Waste Residues", *Waste Management '99 Conference*, February 28 – March 4, USA, 1999
- [15] A. Anglada, A. Urriagaand, I. Ortiz, "Contributions of Electrochemical Oxidation to Wastewater Treatment: Fundamentals and Review of Applications", *Journal of Chemical Technology*, vol. 84, pp. 1747-1755, 2009.
- [16] T. Chen, K. Huang, Y. Pan, "Electrochemical Versus Ce(IV)-Mediated Electrochemical Oxidation (MEO) Degradation of Acetaminophen in Aqueous Solutions", *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 7, pp. 11191-11205, 2012.
- [17] C. N. Sawyer, P. L. McCarty, G. F. Parkin, "Chemistry for Environmental Engineering and Science", 5<sup>th</sup> edition, McGraw-Hill Companies Inc., pp. 76-85, 523-524, 625-629, 2003.
- [18] E. Mousset, N. Oturan, M. A. Oturan, "An Unprecedented Route of OH Radical Reactivity Evidenced by an Electrocatalytical Process: Ipso-Substitution with Perhalogenocarbon Compounds", *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 226, pp. 135-146, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.12.028>
- [19] R. Chang, "Chemistry", 10<sup>th</sup> edition, McGraw-Hill Companies Inc., 2010.
- [20] F. García-Lugo, A. Medel, J. L. Jurado Baizaval, P. Mijaylova Nacheva, A. Durán Moreno, M. J. Cruz Gómez, L. Godínez Mora-Tovar, Y. Meas, "Mediated Electrochemical Oxidation of Pollutants in Crude Oil Desalter Effluent", *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 13, pp. 209-224, 2018.
- [21] X. M. Zhan, J. L. Wang, X. H. Wen, Y. Qian, "Indirect Electrochemical Treatment of Saline Dyestuff Wastewater", *Environmental Technology*, vol. 22, issue 9, pp. 1105-1111, 2001. <https://doi.org/10.1080/09593332208618222>