

REVIEW

TEKNOLOGI DAN METODE PENGOLAHAN LIMBAH CAIR SEBAGAI PENCEGAHAN PENCEMARAN LINGKUNGAN¹Muhammad Arif Firdaus, ²Suci Dhiya Mayra Suherman, ³Muhammad Hafidz Dwiky Ryansyah, ^{4*}Dessy Agustina Sari¹⁻³Mahasiswa Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang⁴Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang^{4*}dessy.agustina8@staff.unsika.ac.id**INFO ARTIKEL**

Diterima : 18 Juli 2020

Direvisi : 09 Agustus 2020

Disetujui : 02 September 2020

Kata Kunci :

Biofilm, *Dielectric barrier discharge*,Elektrokoagulasi, *Microbial fuel cell*, *Rotating**biological contactor*DOI: <http://dx.doi.org/10.35261/barometer.v4i2.3809>**ABSTRAK**

Pengolahan limbah cair sebagai pencegahan pencemaran lingkungan. Hal ini disebabkan oleh buangan tersebut memiliki kandungan BOD dan COD yang tinggi. Kegiatan ini bertujuan untuk mereduksi volume agar mempermudah dalam pengambilan sampel limbah cair, memenuhi baku mutu *effluent* limbah cair yang memudahkan penanganan selanjutnya. Berbagai metode teknologi pengolahan limbah cair telah dikembangkan seperti reaktor *microbial fuel cells*, *advanced oxidation process*, elektrokoagulasi, proses film mikrobiologis (biofilm), *rotating biological contactors*, plasma *dielectric barrier discharge*, maupun teknologi membran.

I. PENDAHULUAN

Pengolahan limbah cair dilakukan untuk menghindari pencemaran lingkungan yang fatal. Berdasarkan sumbernya pengelompokkan menjadi empat jenis yaitu limbah cair domestik dan industri, rembesan dan luapan, serta air hujan. Salah satu upaya untuk memelihara kelestarian lingkungan adalah penerapan teknologi pengolahan limbah cair sebagai solusi mengurangi pencemaran. Proses pengolahan limbah secara hakikatnya dilakukan sebelum dibuang ke perairan. Hal ini mencegah terjadinya masalah yang akan timbul akibat air limbah tersebut. Kegiatan pengolahan limbah cair bertujuan mengurangi zat yang beracun, mengurangi bau, dan juga memurnikan kandungan air agar kembali bersih. Beberapa parameter dalam pengolahan limbah cair berupa COD (*Chemical Oxygen Demand*). Perannya sebagai parameter untuk pencemaran air. Hal ini dikarenakan zat organik secara alami teroksidasi secara biologis dan mengurangi oksigen terlarut dalam limbah cair. Kedua adalah BOD (*Biological Oxygen Demand*) sebagai parameter untuk mengukur jumlah minimal oksigen yang dibutuhkan oleh bakteri atau mikroorganisme. Gas tersebut digunakan untuk mengurai zat organik yang telah bercampur dan bersuspensi dalam limbah cair yang dibuang. Keduanya bertugas sebagai penduga pencemaran bahan organik, dan berkaitan dengan penurunan kandungan oksigen yang terdapat di dalam perairan. COD dan BOD tidak menentukan limbah cair tersebut aman untuk dialirkan pada lingkungan atau belum, tetapi setara dengan parameter lainnya yang berhubungan dengan dugaan masalah pencemaran air tersebut [1], [2]. Saat ini berbagai metode dan teknologi pengolahan limbah cair telah ditemukan dan juga dikembangkan. Harapannya adalah mampu mencegah terjadinya pencemaran yang akan berdampak fatal pada lingkungan dan kesehatan manusia serta makhluk hidup lainnya.

A. Teknologi *microbial fuel cells*

Microbial Fuel Cell (MFC) merupakan teknologi yang dikembangkan untuk menyelesaikan permasalahan pencemaran lingkungan dan juga krisis energi di masa yang akan datang. MFC menghasilkan listrik dari berbagai senyawa seperti asetat, laktat, dan glukosa. Material ini berasal dari air limbah domestik yang saat bersamaan mampu menghasilkan listrik dan penyelesaian pengolahan air limbah untuk kandungan biologisnya [3].

MFC merupakan salah satu metode pengolahan limbah cair yang mengandung bahan organik [4]. *Microbial Fuel Cells* (MFCs) adalah bioreaktor yang mengubah energi kimia dari senyawa organik menjadi energi listrik melalui reaksi katalitik mikroorganisme dalam kondisi anaerob. Energi listrik yang dihasilkan pada proses pengolahan limbah metode ini memiliki potensi untuk menyalurkan sumber energi. Polutan dan limbah cairnya mempunyai keuntungan sebagai sumber karbon untuk memproduksi energi listrik [5].

Umumnya suatu reaktor MFC terdiri atas ruang anoda dan katoda yang dipisahkan oleh membran penukar proton. Penggunaannya ditujukan untuk mencegah perpindahan oksigen dari ruang katoda ke anoda dan perpindahan mikroba dari ruang anoda ke katoda. Permasalahan ini dapat terjadi jika tingginya harga membran dan pengotoran (*fouling*).

MFC membutuhkan kondisi yang berbeda di kedua kutub. Katoda membutuhkan kondisi aerobik, dan sebaliknya di anoda. Langkah menciptakan dua lingkungan tersebut maka bagian katoda diaerasi melalui penggunaan *Proton Exchange Membrane* (PEM) sebagai pemisah kedua kutub tersebut. Penggunaan PEM memungkinkan terjadinya perpindahan proton, tetapi menghambat perpindahan oksigen dari katoda ke anoda yang memberikan efek penurunan potensial di bagian anoda. Hal ini disebabkan oleh limbah yang terurai secara aerobik dan menghasilkan gas metana. Sistem dengan membran pemisah seperti ini dikenal dengan nama *two-chambered* MFC [6].

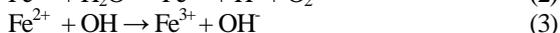
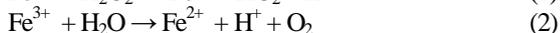
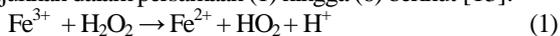
Kemampuan MFC menghasilkan listrik secara simultan dan menjadikan teknologi ini berbeda dengan pengolahan limbah lainnya.

B. *Advanced oxidation process*

Salah satu langkah alternatif penanggulangan limbah adalah penggunaan metode degradasi dengan proses AOPs (*Advanced Oxidation Processes*). Caranya dikategorikan lebih sederhana, cepat, efisien, dan murah. Kelebihannya adalah kemampuannya yang mampu mendegradasi sejumlah senyawa berbahaya yang dimiliki suatu limbah melalui proses oksidasi (*oxidative degradation*) [7]. Selain itu, teknologi ini menjadi sorotan lain karena kinerjanya yang mutakhir mampu menguraikan berbagai senyawa organik dan merupakan momok bagi metode mikrobiologi ataupun membrane filtrasi. Selain itu, AOPs tidak hanya diimplementasikan ke pengolahan limbah cair hasil industri, tetapi juga berperan di air minum atau penyediaan air bersih [8].

Teknologi AOPs adalah satu atau kombinasi dari sejumlah proses seperti ozonasi, hidrogen peroksida, sinar UV (Ultra Violet), titanium oksida, fotokatalis. Sejumlah proses lainnya juga merupakan bagian dari AOPs yang mampu menghasilkan radikal (spesies aktif dengan oksidasi potensial tinggi hingga 2,8 V yang melebihi ozon yang hanya 2,07 V). Hal ini mengakibatkan radikal bebas OH sangat mudah mengoksidasi sejumlah senyawa organik maupun non-organik [9]. Usia pakai (*lifetime*) dari OH bergantung pada konsentrasinya. Sebagai contoh, konsentrasi OH sebesar 1 μM , maka usianya sekitar 200 μs . Kecepatan reaksi antara OH dengan senyawa organik atau non-organik adalah sekitar $10^7 - 10^{10} \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$ [10].

Reaksi fenton merupakan salah satu sistem AOP. Kegiatannya melibatkan gugus reaktif yaitu radikal hidroksil yang dihasilkan dari reaksi oksidasi atas hidrogen peroksida dan garam Fe(II) [9,10]. Radikal hidroksil mempunyai potensial oksidasi yang tinggi sehingga dapat mengurangi kadar COD dan TSS (*Total Solid Suspended*) dalam limbah cair. Reaksi fenton ditunjukkan dalam persamaan (1) hingga (6) berikut [13].



Keuntungan proses AOP dengan reaksi Fenton adalah memiliki waktu reaksi yang pendek diantara proses AOP lainnya, reagen hidrogen peroksida yang digunakan lebih sedikit, mampu mendegradasi komponen organik yang sulit terurai dan dapat mengubah senyawa organik yang terkandung menjadi air dan karbondioksida [14], [15]. Pemanfaatan proses fenton untuk pengolahan limbah cair industri minyak zaitun diketahui bahwa penyisihan COD mencapai 81%. Parameter yang berpengaruh di proses ini adalah konsentrasi besi (II) dan hidrogen peroksida, serta pH. Desain yang digunakan untuk pencapaian respon optimum di setiap variabelnya adalah penggunaan *Response Surface Methodology* (RSM) yang didasarkan pada rancangan Box Behnkn [16].

C. Elektrokoagulasi

Proses elektrokoagulasi merupakan adaptasi dari proses elektrokimia dan proses koagulasi - flokulasi yang digabungkan. Hal ini diduga dapat menjadi pilihan alternatif untuk pengolahan limbah radioaktif dan limbah B3 fase cair [17]. Pengoperasiannya menggunakan energi listrik melalui air untuk melangsungkan proses destabilisasi suspensi, emulsi dan larutan yang mengandung kontaminan. Tujuannya adalah pembentukan gumpalan dan pengendapan partikel halus yang terdapat di air. [18]. Prinsip dasarnya menggunakan reaksi reduksi dan oksidasi [19]. Sejalan dengan hal tersebut, elektrokoagulasi merupakan peristiwa oksidasi di elektroda positif (anoda), dan reduksi di sisi sebaliknya. Bagian pertama mengalami pelepasan koagulan aktif (ion logam berupa aluminium dan besi) ke dalam larutan. Kemudian, segmen katoda merupakan reaksi elektrolisis berupa pelepasan gas hidrogen. Selain elektroda, air yang telah diolah juga terlibat di proses tersebut.

Kelebihan elektrokoagulasi adalah peralatannya sederhana dan mudah dioperasikan, menghasilkan *effluent* yang jernih, tidak berwarna - berbau dari air limbah yang diolah, flok yang terbentuk serupa dengan koagulasi kimia. Flok yang berukuran besar dengan kandungan air sedikit bersifat lebih stabil dan mudah dipisahkan melalui filtrasi, dan lebih cepat mereduksi kandungan koloid yang paling kecil. Hal ini disebabkan penggunaan medan listrik dalam air untuk meningkatkan pergerakan ke arah proses koagulasi. *Total Dissolved Solid* (TDS) yang terkandung pada *effluent* yang dihasilkan dari proses elektrokoagulasi lebih sedikit dibandingkan dengan pengolahan kimiawi. Kandungan TDS yang rendah akan mengurangi biaya *recovery*. Kelebihan lain dari proses elektrokoagulasi yaitu tidak memerlukan bahan kimia sehingga tidak bermasalah dengan netralisasi, polutan mudah dibersihkan karena dapat dibawa ke permukaan air oleh gelembung gas yang dihasilkan pada proses elektrokoagulasi ini, tidak dipengaruhi oleh temperatur sehingga dapat memberikan efisiensi proses yang cukup tinggi untuk berbagai kondisi, menggunakan sel elektrolisis yang tidak bergerak sehingga pemeliharaannya lebih mudah. Sedangkan, kelemahan dalam proses ini tidak dapat digunakan untuk mengolah limbah cair yang bersifat elektrolit tinggi dikarenakan akan terjadi hubungan singkat antar elektroda, besarnya reduksi logam berat dalam limbah cair dipengaruhi oleh besar kecilnya arus voltase listrik searah pada elektroda, luas bidang kontak elektroda dan jarak antar elektroda sempit, elektroda yang digunakan dalam proses elektrokoagulasi harus diganti secara teratur, terbentuknya lapisan di elektroda dapat mengurangi efisiensi pengolahan.

D. Proses film mikrobiologis (biofilm)

Proses biofilm merupakan proses pengolahan air limbah yang memanfaatkan bakteri. Pengertian biofilm itu sendiri merupakan sekumpulan mikroorganisme khususnya bakteri, yang melekat pada permukaan tertentu dengan pelekat karbohidrat yang dihasilkan bakteri sebagai selimutnya. Pengembangan bakteri pada proses ini dapat dilakukan dengan atau tanpa aerasi, dengan cara mengalirkan air limbah ke dalam reaktor biologis yang di bagian dalamnya diisi media penyangga. Pengolahan limbah dengan proses biofilm dapat dilakukan dalam beberapa kondisi, diantaranya seperti kondisi anaerobik, aerobik, ataupun kombinasi keduanya. Pada proses anaerobik dilakukan tanpa pemberian udara atau oksigen. Media filter diletakkan dengan posisi tercelup di bawah permukaan air [20].

Secara sederhana, biofilm aerobik dapat digambarkan sebagai suatu sistem biofilm yang terdiri dari medium penyangga, lapisan biofilm yang melekat pada medium, lapisan alir limbah dan lapisan udara yang terletak di luar. Di lapisan biofilm senyawa polutan yang terdapat pada limbah akan terdifusi. Senyawa-senyawa tersebut terdiri atas senyawa organik (BOD dan COD), amonia, fosfor, dan senyawa lainnya. kemudian di saat bersamaan senyawa polutan tersebut akan diuraikan oleh mikroorganisme yang terdapat pada lapisan biofilm dengan menggunakan oksigen yang terlarut dalam limbah dan energi yang dihasilkan akan berubah menjadi biomasa. Ketika lapisan mikroorganisme cukup tebal, maka bagian luar lapisan biofilm akan berada pada kondisi aerobi. Sedangkan, bagian dalam biofilm akan berada pada kondisi anaerobik. Gas H_2S akan terbentuk pada kondisi anaerobik, kemudian gas H_2S tersebut akan diubah menjadi sulfat oleh bakteri sulfat yang terdapat di dalam biofilm apabila konsentrasi oksigen terlarut cukup besar. Selain itu, nitrogen amonium akan diubah menjadi nitrit dan nitrat pada zona aerobik, dan selanjutnya terjadi proses denitrifikasi nitrat yang terbentuk menjadi nitrogen pada zona anaerobik. Oleh karena itu, kondisi aerobik dan anaerobik dapat terjadi secara bersamaan di dalam sistem biofilm agar proses penghilangan senyawa nitrogen menjadi lebih mudah.

Proses biofilm ini memiliki beberapa keunggulan dibandingkan proses pengolahan limbah lainnya seperti pengoperasiannya yang lebih mudah, dapat digunakan untuk mengolah air limbah dengan konsentrasi rendah hingga tinggi, tahan terhadap jumlah fluktuasi air limbah ataupun fluktuasi konsentrasi, pengaruh penurunan suhu terhadap efisiensi pengolahan skala kecil.

E. Rotating biological contactors

Rotating Biological Contactors (RBC) merupakan teknologi pengolahan limbah yang memanfaatkan mikroorganisme dengan biofilm sebagai tempat melekat dan tumbuhnya mikroorganisme tersebut, sehingga teknologi ini mampu menurunkan parameter organik bahkan mampu menurunkan nitrit dan nitrat [21]. Reaktor kontak biologis putar atau *rotating biological contactors* diadaptasi dari proses pengolahan air limbah dengan *attached growth* (biakan melekat). Prinsip kerja RBC ini menggunakan media piringan yang dilapisi mikroorganisme yang melekat pada biofilm di suatu reaktor, yang kemudian akan dikontakan dengan air limbah yang mengandung polutan organik. Media piringan tersebut terbuat dari polimer yang disusun pada poros secara sejajar, 40% dari bagian kumpulan piringan tercelup di dalam air dan diputar dengan kecepatan tertentu agar tiap bagian dari piringan bergantian terkena air dan oksigen secara kontinyu. Pada piringan yang berputar tersebut bakteri akan tumbuh dengan mengambil oksigen dari udara, sehingga kandungan organik air limbah menjadi berkurang untuk dialirkan ke daerah pembuangan atau ke proses pengolahan selanjutnya [22].

Proses pengolahan air limbah dengan RBC yaitu air limbah dimasukan secara teratur dan mengalir ke dalam tangki tempat piringan tersebut, kemudian piringan diputar, ketika melalui cakram akan terdapat lendir yang disebut biofilm. Pada permukaan piringan dalam bentuk biofilm ini mikroorganisme akan tumbuh dan melekat. Mikroorganisme inilah yang akan menguraikan atau menghilangkan kandungan organik dari air limbah dengan mengadsorpsi dan menguraikan zat organik yang terlarut dalam air.

Multi-stage RBC dapat digunakan untuk mendegradasi dan penghilangan toluena, fenol, trikloroetilen, dan tiosianat dari air limbah [21], [24]. Limbah cair organik dengan kekuatan tinggi diperlakukan dalam sel darah merah anaerob dengan kinerja tinggi dan penghilangan polutan yang efisien [23], [26]. Teknologi pengolahan air limbah RBC memiliki beberapa kelebihan yaitu pengoperasiannya sederhana, perawatannya mudah, konsumsi energi rendah, proses nitrifikasi lebih mudah terjadi dan penghilangan amonium pada air limbah lebih besar, serta dapat dipasang dengan beberapa tahap (*multi-stage*) sehingga mampu menahan fluktuasi beban pengolahan [27], [28].

F. Plasma dengan *dielectric barrier discharge*

Dielectric Barrier Discharge (DBD) merupakan peluahan listrik antara dua elektroda terpisah dengan menggunakan isolator dielektrik. DBD dapat dibuat dalam beberapa konfigurasi diantaranya tipe planar dengan plat paralel yang terpisah dengan sebuah dielektrik silinder, dan planar menggunakan plat koaksial dengan dielektrik tabung di antara keduanya. Elektroda positif merupakan elektroda jarum, sedangkan elektroda negatif berupa logam berbentuk silinder tabung, dan dielektrik berupa tabung berbahan kaca Pyrex yang berfungsi sebagai penghalang *discharge*. Kondisi jarak elektroda pada reaktor DBD sangat berpengaruh pada kualitas proses pengolahan limbah cair [29]. Cara plasma dapat memasangkan kekuatan ke dalam aktuatur adalah melalui interaksi antara medan listrik dengan partikel bermuatan dalam plasma. Pada dasarnya muatan dalam "dorongan" plasma pada gas latar dan muatan gambar dalam elektroda, melengkapi rantai gaya yang mengarah ke pengurangan gaya dorong [30]. Di sini plasma dekat dengan permukaan cairan sehingga spesies aktif yang dihasilkan dapat berinteraksi dengan cairan. Interaksi plasma dengan cairan yang menghasilkan peluahan dengan cairan itu sendiri, menjadikan metode ini sangat cepat [31].

Teknologi plasma DBD mampu menurunkan 48% warna, 77% COD, dan 71% TTS pada limbah cair tekstil [32]. Teknologi plasma merupakan teknologi yang ramah lingkungan dan dapat melakukan degradasi senyawa yang mengandung racun. Proses ini merupakan alternatif pengolahan untuk mengurangi lahan, menurunkan waktu pengolahan dan dapat mengurangi bau. Konfigurasi plasma DBD dianggap sebagai salah satu teknik yang paling menjanjikan untuk degradasi senyawa organik yang mudah menguap dalam pembersihan fase gas [33], [34]. Namun, pembuangan dalam air berbeda dengan di udara karena karakteristik fisik pada air dan udara yang berbeda [35], [36], [37].

Pelepasan listrik di antarmuka udara dan udara-air menghasilkan plasma yang dapat menyebabkan berbagai bahan kimia dan fisik. Derajat ionisasi plasma ditentukan oleh variasi tegangan dari plasma dengan menggunakan generator bertegangan tinggi. Efisiensi penurunan BOD, COD dan minyak lemak bisa ditingkatkan dengan dinaikannya tegangan plasma yang diberikan. Konsumsi energi yang diperlukan untuk pengolahan limbah cair kelapa sawit dengan teknologi plasma DBD dalam kisaran 3,6 – 7,2 kWh/L [38]. DBD adalah teknologi yang efisien untuk menghilangkan pewarna dan menunjukkan kinerja yang baik, terutama pada konsentrasi pewarna 100 mg/L. Keuntungan dari proses ini antara lain pembentukan spesies aktif berbasis oksigen seperti hidrogen peroksida, radikal hidroksil dan ozon, hidrogen peroksida yang dikuantifikasi dan di amati bahwa penambahan Fe^{2+} selanjutnya

mendorong degradasi melalui reaksi jenis fenton. Mineralisasi pewarna dikonfirmasi oleh penurunan kandungan karbon. Diamati bahwa degradasi pewarna mengikuti kinetika orde pertama [39].

G. Teknologi membran

Membran adalah fase permeabel atau semipermeabel, yang dikenal juga sebagai padatan polimer tipis, yang membatasi gerak tertentu dari sebuah spesies. Membran merupakan penghalang yang digunakan dalam proses penghilangan zat warna dari limbah industri [40]. Teknologi membran (MBR) merupakan teknologi pengolahan air yang dapat digunakan sebagai alat yang efisien untuk air limbah. Hasil menunjukkan efisiensi tinggi pada MBR untuk pengolahan air limbah. Teknologi MBRs adalah kombinasi dari *biotreatment* dan *membrane separation* oleh mikrofiltrasi atau ultrafiltrasi. Biasanya, membran ditempatkan di dalam bioreaktor atau eksternal. MBRs sanggup menyingkirkan TSS sebagai polutan-polutan tertentu termasuk permintaan oksigen kimia (COD) dan permintaan oksigen biologis (BOD) dengan efisien. Dalam satu tahap pada MBRs dapat menghasilkan zat yang bermutu tinggi dan umumnya desinfeksi [41].

Membran merupakan alat pemisah yang dapat memisahkan dua fase dari berbagai campuran. Campuran tersebut dapat bersifat homogen atau heterogen dan dapat berupa padatan, cairan atau gas. Transportasi pada membran terjadi karena adanya *driving force* berupa konveksi atau difusi dari setiap molekul, adanya gaya tarik menarik antar muatan komponen atau konsentrasi larutan, dan perbedaan suhu atau tekanan [42], [43], [44]. Pemisahan yang dilakukan membran dengan mengalirkan feed ke dalam membran kemudian akan terpisah sesuai *driving force* yang digunakan. Pada membran, proses pemisahan menghasilkan dua aliran yaitu *permeate* dan *retentate*. *Permeate* merupakan hasil yang diinginkan, sedangkan *retentate* adalah sisa dari proses pemisahan. Permeabilitas mempengaruhi efisiensi pada pemisahan membran, yang tergantung pada struktur membran seperti distribusi ukuran pori, bentuk pori, tortuositas dan porositas [45], [46]. Kecepatan aliran komponen yang akan di pisahkan bergantung kepada jenis gaya pendorong (*driving force*) dan karakteristik membran. Jenis gaya pendorong yang ada pada proses pemisahan dengan menggunakan membran yaitu perbedaan tekanan, perbedaan konsentrasi, dan perbedaan temperatur [47].

Dalam operasinya membran dikenal dengan dua jenis aliran umpan, yaitu aliran *cross-flow* dan aliran *dead-end*. Pada aliran *cross flow*, aliran umpan yang melewati pori membran hanya sebagian saja lalu memproduksi *permeate*, sedangkan aliran pelarut atau cairan pembawa akan melewati permukaan membran sehingga larutan, koloid dan padatan yang tertahan tersuspensi oleh membran dan akan terus terbawa menjadi aliran balik. Pada sistem *dead end*, keseluruhan dari aliran umpan melewati membran lalu partikel akan tertahan, dengan demikian aliran umpan mengalir melalui membran dan tahanan penumpukan partikel pada permukaan membran [48].

Kinerja atau efisiensi perpindahan di dalam membran ditentukan oleh dua parameter yaitu fluks dan rejeksi. Permeabilitas sering di sebut juga sebagai kecepatan *permeate* atau fluks adalah ukuran kecepatan suatu umpan melewati membran persatuan luas dan waktu dengan gradien tekanan sebagai gaya pendorong. Faktor yang mempengaruhi permeabilitas adalah jumlah, ukuran pori, interaksi antar

membran, larutan umpan, viskositas larutan, serta tekanan dari luar. Proses pemisahan membran menghasilkan *permeate* dengan lebih dari 99% warna dan hilangnya kandungan tembaga, sementara 85% garam dan 85% air murni yang dapat digunakan kembali [49]. Pada pengolahan limbah cair pada industri kelapa sawit yang menggunakan membran ultrafiltrasi dapat menurunkan kadar COD sebesar 97,66% dan kadar SS 98% - *Suspended Solid*, tetapi tidak dapat menghilangkan warna sehingga memerlukan *treatment* kembali [50], [51].

II. KESIMPULAN

Teknologi dalam pengolahan limbah cair cukup banyak dengan proses dan hasil pengurangan BOD dan COD yang beraneka ragam. Dari berbagai macam teknologi pengolahan air limbah yang telah dijelaskan di atas, metode *Advanced Oxidation Process* (AOP) merupakan metode yang paling efektif, terbukti dari angka penyisihan COD hingga 81% dengan reaksi fenton dalam prosesnya. Proses *Advanced Oxidation Process* (AOP) dengan reaksi fenton juga memiliki waktu reaksi yang pendek, penggunaan reagen hidrogen peroksida lebih sedikit, dan dapat mendegradasi komponen organik yang sulit terurai serta dapat mengubah senyawa organik yang terkandung menjadi karbondioksida dan air.

UCAPAN TERIMA KASIH

Tim penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu penyelesaian artikel ini, terutama kepada ibu Dessy Agustina Sari selaku Koordinator Program Studi Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Singaperbangsa Karawang atas bimbingannya.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] D. A. Sari, S. Sukanta, and A. Hakiim, "Anaerobic wastewater treatments: Prediction of retention time on RT/RW plant," *INSIST*, vol. 3, no. 1, p. 134, Apr. 2018, doi: 10.23960/ins.v3i1.134.
- [2] D. A. and S. Sukanta, "Kajian kualitas limbah cair secara anaerobik melalui COD, BOD5, dan TDS : studi kasus pada PT JKLMN," *Journal Of Chemical Process Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 52–56, Nov. 2017, doi: 10.33536/jcpe.v2i2.167.
- [3] H. Liu, R. Ramnarayanan, and B. E. Logan, "Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell," *Environmental Science & Technology*, vol. 38, no. 7, pp. 2281–2285, Apr. 2004, doi: 10.1021/es034923g.
- [4] W. Habermann and E. H. Pommer, "Biological fuel cells with sulphide storage capacity," *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 35, no. 1, pp. 128–133, Apr. 1991, doi: 10.1007/BF00180650.
- [5] B. Li, K. Scheible, and M. Curtis, "Electricity Generation from Anaerobic Wastewater Treatment in Microbial Fuel Cells," University of Connecticut, HydroQual, Inc, Alexandria, OWSO8C09, 2011. [Online]. Available: <https://www.nyserda.ny.gov/-/media/Files/Publications/Research/Environmental/a>

- naerobic-wastewater-treatment-in-microbial-fuel-cells.pdf.
- [6] W. Rinaldi, Y. Nurdin, S. Syahiddin, W. Windari, and C. P. Agustina, "Pengolahan limbah cair organik dengan microbial fuel cell," *Jurnal Rekayasa Kimia & Lingkungan*, vol. 10, no. 2, pp. 92–98, Dec. 2014, doi: 10.23955/rkl.v10i2.2425.
- [7] R. Munter, "Advanced oxidation processes – current status and prospects," *Proc. Estonian Acad. Sci. Chem.*, vol. 50, no. 2, pp. 59–80, 2001, [Online]. Available: https://www.kirj.ee/public/va_ke/k50-2-1.pdf.
- [8] M. Mohajerani, M. Mehrvar, and F. Ein-Mozaffari, "An overview of the integration of advanced oxidation technologies and other processes for water and wastewater treatment," *International Journal of Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 120–146, 2009, [Online]. Available: <https://www.cscjournals.org/manuscript/Journals/IJE/Volume3/Issue2/IJE-40.pdf>.
- [9] R. Pešoutová, P. Hlavínek, and J. Matysíková, "Use of advanced oxidation processes for textile wastewater treatment – a review," *Food and Environment Safety*, vol. X, no. 3, pp. 59–65, 2011.
- [10] R. Nugroho and I. Ikbali, "Pengolahan air limbah berwarna industri tekstil dengan proses aops," *Jurnal Air Indonesia*, vol. 1, no. 2, pp. 163–172, 2005, doi: 10.29122/jai.v1i2.2344.
- [11] A. K. Tiwari and V. K. Upadhyay, "Fenton's reagents dose calculation with respect to COD value and the process requirement optimization for effective oxidation of aqueous mother liquor effluent of an API manufacturing industry at large scale," *International journal of advanced research*, vol. 1, no. 7, pp. 158–164, 2013, [Online]. Available: <http://www.journalijar.com/article/340/fenton%E2%80%99s-reagent-dose-calculation-with-respect-to-cod-value-and-the-process-requirement-optimization-for-effective-oxidation-of-aqueous-mother-liquor-effluent-of-an-api-manufacturing-industry-at-large-scale/>.
- [12] A. Alver, E. Baştürk, A. Kılıç, and M. Karataş, "Use of advance oxidation process to improve the biodegradability of olive oil mill effluents," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 98, pp. 319–324, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.psep.2015.09.002.
- [13] S. Hashemian, "Fenton-like oxidation of malachite green solutions: kinetic and thermodynamic study," *Journal of Chemistry*, vol. 2013, pp. 1–7, 2013, doi: 10.1155/2013/809318.
- [14] M. G. Alalm and A. Tawfik, "Fenton and solar photo-fenton oxidation of industrial wastewater containing pesticides," Istanbul, 2013, pp. 1–11, [Online]. Available: <https://pdfs.semanticscholar.org/7259/67710fa58c6410ec86cb898d0666de0693f4.pdf>.
- [15] A. D. Bokare and W. Choi, "Review of iron-free Fenton-like systems for activating H₂O₂ in advanced oxidation processes," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 275, pp. 121–135, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.jhazmat.2014.04.054.
- [16] B. Kiril Mert, T. Yonar, M. Yalili Kiliç, and K. Kestioğlu, "Pre-treatment studies on olive oil mill effluent using physicochemical, Fenton and Fenton-like oxidations processes," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 174, no. 1–3, pp. 122–128, Feb. 2010, doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.09.025.
- [17] B. Rachmawati, Y. Surya, and M. Mirwan, "Proses elektrokoagulasi pengolahan limbah laundry," *Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan*, vol. 6, no. 1, pp. 15–22, 2014, [Online]. Available: http://eprints.upnjatim.ac.id/6818/1/3._Budiany%2C_Yayok_dan_Mirwan.pdf.
- [18] E. R. Ananda, D. Irawan, S. D. Wahyuni, A. D. Kusuma, J. Buadiarto, and R. Hidayat, "Pembuatan alat pengolah limbah cair dengan metode elektrokoagulasi untuk industri tahu kota Samarinda," *JTT (Jurnal Teknologi Terpadu)*, vol. 6, no. 1, p. 54, Apr. 2018, doi: 10.32487/jtt.v6i1.439.
- [19] N. Suwanto, S. Sudarno, A. A. Sari, and H. Harimawan, "Penyisihan Fe, warna, dan kekeruhan pada air gambut menggunakan metode elektrokoagulasi," *Jurnal Teknik Lingkungan*, vol. 6, no. 2, pp. 1–12, 2017, [Online]. Available: <https://media.neliti.com/media/publications/192423-ID-penyisihan-fe-warna-dan-kekeruhan-pada-a.pdf>.
- [20] N. I. Said, "Teknologi pengolahan air limbah dengan proses biofilm tercelup," *Jurnal Teknologi Lingkungan*, vol. 1, no. 2, pp. 101–113, 2000, [Online]. Available: <http://ejournal.bppt.go.id/index.php/JTL/article/view/169>.
- [21] S. Sirianuntapiboon, "Treatment of wastewater containing Cl₂ residue by packed cage rotating biological contactor (RBC) system," *Bioresource Technology*, vol. 97, no. 14, pp. 1735–1744, Sep. 2006, doi: 10.1016/j.biortech.2005.07.030.
- [22] D. Resel, S. Sudrajat, and E. Kusumawati, "Efisiensi kinerja sistem IPAL RBC (rotating Biological Contactor) di kelurahan Bontang Kuala, Kota Bontang dalam menurunkan nilai total fecal coliform," *Journal Science East Borneo*, vol. 3, no. 4, pp. 1–6, 2015, [Online]. Available: <https://fmipa.unmul.ac.id/jurnal/detail/51>.
- [23] G. Banerjee, "Phenol- and tmcyanate-based wastewater treatment in rbc reactor," *Journal of Environmental Engineering*, vol. 122, no. 10, pp. 941–948, 1996, [Online]. Available: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9372%281996%29122%3A10%28941%29>.
- [24] I. Alemzadeh and M. Vossoughi, "Biodegradation of toluene by an attached biofilm in a rotating biological contactor," *Process Biochemistry*, vol. 36, no. 8–9, pp. 707–711, Mar. 2001, doi: 10.1016/S0032-9592(00)00232-6.
- [25] A. C. Yeh, C. Lu, and M.-R. Lin, "Performance of an anaerobic rotating biological contactor: Effects of flow rate and influent organic strength," *Water Research*, vol. 31, no. 6, pp. 1251–1260, Jun. 1997, doi: 10.1016/0043-1354(95)00294-4.
- [26] C. Lu, A. C. Yeh, and M.-R. Lin, "Treatment of high-strength organic wastewaters using an anaerobic rotating biological contactor,"

- Environment International*, vol. 21, no. 3, pp. 313–323, Jan. 1995, doi: 10.1016/0160-4120(95)00027-1.
- [27] G. M. L and S. S. V, “Modified rotating biological contactor,” *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, vol. 2, no. 8, pp. 8–11, 2014, [Online]. Available: http://iraj.in/journal/IJMPE/paper_detail.php?paper_id=1131&name=Modified_Rotating_Biological_Contactor.
- [28] N. I. Said, “Pengolahan air limbah dengan sistem reaktor biologis putar (rotating biological contactor) dan parameter disain,” *Jurnal Air Indonesia*, vol. 1, no. 2, pp. 178–188, 2005, doi: 10.29122/jai.v1i2.2345.
- [29] A. Khoiriyah, M. C. T. W. Utami, and I. Istadi, “Studi reaktor plasma dielectric barrier discharge (dbd) planar to planar untuk pre-treatment konversi limbah plastik polipropilen menjadi bahan bakar cair,” vol. 1, no. 1, pp. 213–221, 2012, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jtki/article/view/876>.
- [30] C. L. Enloe, T. E. McLaughlin, R. D. VanDyken, K. D. Kachner, E. J. Jumper, and T. C. Corke, “Mechanisms and responses of a single dielectric barrier plasma actuator: plasma morphology,” *AIAA Journal*, vol. 42, no. 3, pp. 589–594, Mar. 2004, doi: 10.2514/1.2305.
- [31] P. Bruggeman and C. Leys, “Non-thermal plasmas in and in contact with liquids,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 42, no. 5, pp. 1–28, 2009, [Online]. Available: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/42/5/053001/meta>.
- [32] M. Hadiwidodo and H. S. Huboyo, “Penurunan warna, cod dan tss limbah cair industri tekstil menggunakan teknologi dielectric barrier discharge dengan variasi tegangan dan flow rate oksigen,” *Jurnal Presipitasi*, vol. 7, no. 2, pp. 16–23, 2009, [Online]. Available: <https://ejournal.undip.ac.id/index.php/presipitasi/article/download/2830/2514>.
- [33] Ch. Subrahmanyam, A. Renken, and L. Kiwi-Minsker, “Novel catalytic non-thermal plasma reactor for the abatement of VOCs,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 134, no. 1–3, pp. 78–83, Nov. 2007, doi: 10.1016/j.cej.2007.03.063.
- [34] J. Karuppiah, L. Sivachandiran, R. Karvembu, and Ch. Subrahmanyam, “Catalytic nonthermal plasma reactor for the abatement of low concentrations of isopropanol,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 165, no. 1, pp. 194–199, Nov. 2010, doi: 10.1016/j.cej.2010.09.017.
- [35] M. Magureanu, D. Piroi, F. Gherendi, N. B. Mandache, and V. Parvulescu, “Decomposition of methylene blue in water by corona discharges,” *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, vol. 28, no. 6, pp. 677–688, Dec. 2008, doi: 10.1007/s11090-008-9155-x.
- [36] B. R. Locke, M. Sato, P. Sunka, M. R. Hoffmann, and J.-S. Chang, “Electrohydraulic discharge and nonthermal plasma for water treatment,” *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 45, no. 3, pp. 882–905, Feb. 2006, doi: 10.1021/ie050981u.
- [37] F. Abdelmalek, S. Gharbi, B. Benstaali, A. Addou, and J. L. Brisset, “Plasmachemical degradation of azo dyes by humid air plasma: Yellow Supranol 4 GL, Scarlet Red Nylosan F3 GL and industrial waste,” *Water Research*, vol. 38, no. 9, pp. 2339–2347, May 2004, doi: 10.1016/j.watres.2004.02.015.
- [38] Y. Yulastri, A. Hazmi, and R. Desmiarti, “Aplikasi plasma dengan metode dielectric barrier discharge (dbd) untuk pengolahan limbah cair kelapa sawit,” *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, vol. 2, no. 2, pp. 46–50, 2013, [Online]. Available: https://onsearch.id/Record/IOS1751.article-85?widget=1&repository_id=680.
- [39] P. Manoj Kumar Reddy, B. Rama Raju, J. Karuppiah, E. Linga Reddy, and Ch. Subrahmanyam, “Degradation and mineralization of methylene blue by dielectric barrier discharge non-thermal plasma reactor,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 217, pp. 41–47, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.cej.2012.11.116.
- [40] T. Robinson, R. Marchant, and P. Nigam, “Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative,” *Bioresource Technology*, vol. 77, pp. 247–255, 2001, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096085240000808>.
- [41] H. I. Abdel-Shafy and S. H. Abdel Shafy, “Membrane technology for water and wastewater management and application in Egypt,” *Egyptian Journal of Chemistry*, vol. 60, no. 3, pp. 347–360, Jun. 2017, doi: 10.21608/ejchem.2017.3480.
- [42] S. Nasir, A. Hartaty, and D. Sulaiman, “Pengaruh koagulan polyaluminium chloride dan sodium alginate terhadap kualitas air bersih yang dihasilkan pada pengolahan air sungai dan air rawa dengan filter keramik,” *Jurnal Teknik Kimia*, vol. 19, no. 4, pp. 7–13, 2013, [Online]. Available: <http://jtk.unsri.ac.id/index.php/jtk/article/view/152>.
- [43] S. Nasir, Y. E. Putri, and I. Elita, “Penyisihan ion kadmium pada limbah cair pabrik pulp & paper dengan menggunakan membran keramik,” *Jurnal Teknik Kimia*, vol. 20, no. 2, pp. 7–16, 2014, [Online]. Available: <http://jtk.unsri.ac.id/index.php/jtk/article/view/173>.
- [44] S. Nasir, R. W. Putri, and J. Intan, “Peningkatan kualitas air domestik di kampus unsri indralaya menggunakan filter keramik berbahan tanah liat alam dan abu terbang batubara,” *Jurnal Teknik Kimia*, vol. 17, no. 5, pp. 9–18, 2011, [Online]. Available: <http://jtk.unsri.ac.id/index.php/jtk/article/view/341>.
- [45] H. P. Hsieh, R. R. Bhave, and H. L. Fleming, “Microporous alumina membranes,” *Journal of Membrane Science*, vol. 39, no. 3, pp. 221–241, Dec. 1988, doi: 10.1016/S0376-7388(00)80931-X.
- [46] Y. S. Dewi, “Efektivitas filtrasi membran selulosa dalam pengelolaan limbah tekstil,” *Jurnal Ilmiah Fakultas Teknik*, vol. 5, no. 1, pp. 27–33, 2009, [Online]. Available: <http://portal.kopertis3.or.id/handle/123456789/953>.

- [47] F. Asip and T. Okta, "Adsorpsi H₂S pada gas alam menggunakan membran keramik dengan metode titrasi iodometri," *Jurnal Teknik Kimia*, vol. 19, no. 4, pp. 22–28, 2013, [Online]. Available: <http://jtk.unsri.ac.id/index.php/jtk/article/download/154/153>.
- [48] S. Notodarmojo, D. Mayasanthi, and T. Zulkarnain, "Pengolahan limbah cair emulsi minyak dengan proses membran ultrafiltrasi dua-tahap aliran cross-flow," *ITB Journal of Sciences*, vol. 36 A, no. 1, pp. 45–62, 2004, doi: 10.5614/itbj.sci.2004.36.1.4.
- [49] G. Ciardelli, L. Corsi, and M. Marcucci, "Membrane separation for wastewater reuse in the textile industry," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 31, no. 2, pp. 189–197, Feb. 2001, doi: 10.1016/S0921-3449(00)00079-3.
- [50] N. M. Nik Sulaiman and K. L. Chea, "Membrane ultrafiltration of treated palm oil mill effluent (pome)," *Jurnal Teknologi*, vol. 41, no. 1, pp. 113–120, Dec. 2004, doi: 10.11113/jt.v41.714.
- [51] S. Agustina, "Teknologi membran dalam pengolahan limbah cair industri," *Buletin Penelitian*, vol. 28, no. 1, pp. 18–24, 2006, [Online]. Available: <http://ejournal.kemenperin.go.id/jkk/article/view/3281/2511>.