



Pengaruh Waktu Kontak dan Luas Permukaan Elektroda pada Pengolahan Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit Menggunakan Metode EAPR (*Electro-assisted Phytoremediation*) dengan Tanaman Eceng Gondok (*Eichhornia crassipes*)

Effect of Contact Time and Electrode Surface Area for Wastewater Treatment of Palm Oil Mill Effluent (POME) using Electro-assisted Phytoremediation (EAPR) Method with Hyacinth Plants (*Eichhornia crassipes*)

PANCA NUGRAHINI FEBRININGRUM^{*}, KHANSA ARIKAH AZALPA¹, MUHAMMAD HAVIZ¹

¹Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro No. 1, Bandar Lampung, Lampung, 35145, Indonesia

*pancanugrahini@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received 27 February 2024
Accepted 25 November 2024
Published 31 January 2025

Keywords:

EAPR
Eichhornia crassipes
Electrocoagulation
Phytoremediation
Palm Oil Mill Effluent

ABSTRACT

POME wastewater treatment remains a significant area of research due to the industry's large scale and high potential for wastewater pollution. This research investigated the effect of variations in contact time and surface area of Zinc (Zn) electrodes on the parameters of pH, COD, BOD, TSS, VSS, and oil and fat values in the POME wastewater. POME wastewater treatment was conducted using the EAPR method with an electric voltage of 9 (nine) volts and utilizing 3 (three) water hyacinth plants, each with 5–8 leaves. The treatment process was terminated once the reduction in pollutant concentration reached a constant number. The results showed that the values that met quality standards were pH values in all treatments and BOD values in the 45-minute contact time variation across all electrode surface areas. As for the other analysis values, they did not meet the quality standards, with the highest COD reduction of 91.46%, the highest TSS reduction of 96.77%, the highest VSS reduction of 24.92%, and the highest oil and fat reduction of 98.89% observed in the 75 minutes contact time variation using a cathode surface area of 500 cm² and anode 14 cm². It can be concluded that this method is currently ineffective for POME wastewater treatment as not all parameters meet quality standards. This research is expected to provide valuable insights for future experiments in wastewater treatment. Recommendations for further research include adding a method to increase oxygen levels in wastewater or adding microorganisms to enhance organic breakdown.

INFORMASI ARTIKEL

Histori artikel:

Diterima 27 Februari 2024
Disetujui 25 November 2024
Diterbitkan 31 Januari 2025

Kata kunci:

EAPR
Eichhornia crassipes
Elektrokoagulasi
Fitoremediasi
Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit

ABSTRAK

Penelitian mengenai pengolahan limbah cair industri minyak kelapa sawit terus dilakukan karena industri ini merupakan industri yang besar dan menghasilkan banyak limbah cair dengan potensi pencemaran yang tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh waktu kontak dan luas permukaan elektroda seng (Zn) terhadap konsentrasi nilai pH, COD, BOD, TSS, VSS, serta minyak dan lemak. Pengolahan limbah cair pabrik kelapa sawit dilakukan dengan menggunakan metode EAPR bertegangan 9 volt dengan 3 tanaman eceng gondok berdaun 5–8 helai. Perlakuan dihentikan jika penurunan sudah mencapai angka yang konstan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai yang memenuhi baku mutu yaitu nilai pH pada seluruh perlakuan dan nilai BOD pada variasi waktu kontak 45 menit di seluruh variasi luas area permukaan elektroda. Sedangkan untuk nilai analisis yang lain masih belum sesuai dengan baku mutu, dengan penurunan COD tertinggi sebesar 91,46%, penurunan TSS tertinggi sebesar 96,77%, penurunan VSS tertinggi sebesar 24,92%, serta penurunan minyak dan lemak tertinggi sebesar 98,89% pada variasi waktu kontak 75 menit dengan luas permukaan katoda 500 cm² dan anoda 14 cm². Dapat disimpulkan bahwa metode ini belum efektif untuk pengolahan limbah cair pabrik kelapa sawit karena belum seluruh analisis memenuhi baku mutu. Penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat untuk dikaji lebih lanjut untuk pengolahan limbah cair. Saran untuk penelitian selanjutnya yaitu menambahkan metode aerasi supaya dapat meningkatkan kandungan oksigen dalam air limbah atau menambahkan mikroorganisme untuk mengurai kandungan organik.

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pengolahan limbah cair pabrik kelapa sawit atau *palm oil mill effluent* (POME) saat ini masih banyak dilakukan, di mana dalam 1 ton tandan buah segar akan menghasilkan POME sebanyak 50% (Badan Pusat Statistik, 2020). Salah satu pengolahan POME adalah dengan menggunakan *activated carbon* sebagai koagulan. Namun, metode ini belum memenuhi standar baku mutu yang ditetapkan pemerintah (Stefany et al., 2023). Selain itu, jika pengolahan air limbah dilakukan dengan menggunakan bahan kimia maka dapat menimbulkan masalah pencemaran baru (Affandi et al., 2024). Sedangkan pengolahan POME dengan *advanced oxidation, ion exchange*, atau *membrane separation* memerlukan biaya peralatan dan operasional yang besar (Juniar, 2018). Oleh karena itu, diperlukan teknologi pengolahan POME yang tepat guna, ekonomis, dan ramah lingkungan. Salah satu cara pengolahan air limbah yang ekonomis dan ramah lingkungan adalah dengan metode fitoremediasi.

Metode fitoremediasi dilakukan dengan menggunakan tumbuhan untuk mendegradasi kontaminan pada air, tanah, maupun lumpur (Pandey & Pandey, 2020). Seperti yang telah dilakukan oleh Ilmannafian et al. (2020) yaitu mengenai pengolahan limbah cair kelapa sawit dengan metode filtrasi dan fitoremediasi menggunakan tanaman eceng gondok yang memvariasikan konsentrasi limbah cair kelapa sawit sebesar 100%, 75%, dan 25%. Namun, penurunan kandungan BOD (*biological oxygen demand*) pada konsentrasi 100% dan 75%, COD (*chemical oxygen demand*) pada semua variasi, serta TSS (*total suspended solid*) pada konsentrasi 100% belum memenuhi standar baku mutu. Selain itu, metode fitoremediasi untuk pengolahan limbah cair kelapa sawit telah dilakukan oleh Lestari & Siregar (2024) untuk menguji nilai pH dan COD, tetapi hasil yang diperoleh setelah perlakuan masih belum sesuai dengan baku mutu. Kekurangan metode fitoremediasi yaitu membutuhkan waktu yang cukup lama, sehingga seiring dengan penelitian yang terus dilakukan, fitoremediasi akhirnya mulai digabungkan dengan beberapa metode lain seperti aerasi, elektrokoagulasi, filtrasi, dan sebagainya.

Metode elektrokoagulasi dengan memvariasikan jenis elektroda yaitu aluminium (Al), seng (Zn), dan besi (Fe) telah dilakukan untuk pengolahan limbah cair kelapa sawit oleh Koto (2021), di mana jenis elektroda yang dapat memberikan hasil terbaik ialah seng (Zn). *Electro-assisted phytoremediation* (EAPR) merupakan salah satu metode pengolahan limbah cair yang memanfaatkan tanaman (fitoremediasi) dan bantuan arus listrik (elektrokoagulasi). Arus listrik pada metode EAPR berfungsi untuk meningkatkan transportasi zat-zat hara dan air yang dibutuhkan bagi pertumbuhan tanaman (Putra et al., 2018).

Metode EAPR sudah dilakukan oleh Putra et al. (2014) yang dibandingkan dengan metode fitoremediasi untuk remediasi logam Cu dengan menggunakan 2 jenis elektroda, yaitu titanium dan *stainless steel*, serta menggunakan tanaman eceng gondok. Hasil yang didapatkan ialah remediasi logam Cu lebih efektif menggunakan metode EAPR dengan penurunan sebesar 50%, sedangkan dengan metode fitoremediasi, penurunan hanya sebesar 39%. Dengan

demikian, metode EAPR dianggap layak untuk diteliti dalam pengolahan limbah cair lainnya.

Metode EAPR telah diteliti untuk pengolahan limbah cair batik, limbah cair laboratorium kimia, serta untuk menghilangkan logam berat dari air. Namun, belum ditemukan pengolahan limbah cair kelapa sawit dengan metode EAPR. Melihat kemampuan metode EAPR yang mampu menurunkan konsentrasi COD dari 214,8 mg/L menjadi 42,2 mg/L (penurunan sebesar 80,4%) pada pengolahan limbah cair batik yang telah dilakukan oleh Putra et al. (2020), maka metode EAPR layak untuk dikaji lebih lanjut sebagai alternatif untuk pengolahan limbah cair lainnya, termasuk limbah cair pabrik kelapa sawit.

Berdasarkan kajian di atas, pada penelitian ini akan dilakukan metode EAPR untuk pengolahan limbah cair industri kelapa sawit pada reaktor *batch* dengan menggunakan tanaman eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) dan elektroda seng (Zn). Waktu kontak EAPR dan luas permukaan elektroda pada penelitian ini akan divariasikan dan pelaksanaan akan dihentikan pada saat penurunan kandungan limbah telah mencapai kondisi maksimal. Dengan penelitian ini dapat diketahui apakah metode EAPR efektif untuk pengolahan limbah cair industri kelapa sawit.

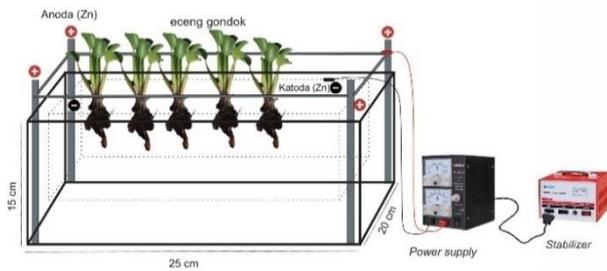
1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk menginvestigasi pengaruh waktu kontak dan luas permukaan elektroda seng (Zn) pada pengolahan limbah cair pabrik kelapa sawit (POME) menggunakan metode EAPR dengan tanaman eceng gondok. Variasi perlakuan metode EAPR dibandingkan terhadap kualitas limbah cair POME dengan parameter pH (*potential hydrogen*), COD (*chemical oxygen demand*), BOD (*biological oxygen demand*), TSS (*total suspended solid*), VSS (*volatile suspended solid*), serta minyak dan lemak.

2. METODE

2.1 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada penelitian ini yaitu reaktor EAPR berjenis *batch* dengan ukuran 25 cm (panjang) × 20 cm (lebar) × 15 cm (tinggi), elektroda seng (Zn), DC power supply Longwei PS-1502D, stabilizer AVS SCORE SC-7608, desikator DURAN DN-200, neraca analitik Pioneer, gelas beaker Pyrex (100 ml, 250 ml, 500 ml, 1.000 ml), pH meter Hanna HI 98107, oven Panasonic, gelas ukur Pyrex 50 ml, spektrofotometer Hach DR/2010, COD reaktor Hach, cawan *porcelain* 30 ml, corong gelas Pyrex 50 ml dan 100 ml, corong pisah Pyrex 250 ml, pipet ukur Pyrex 20 ml, labu destilasi Pyrex 250 ml, rotary evaporator IKA, erlenmeyer Pyrex 50 ml dan 100 ml, spatula, furnace Nabertherm, bola hisap, water cooler Labtech, botol *winkler* Pyrex 100 ml, DO meter DO-9100, dan rak tabung reaksi. Sedangkan bahan-bahan yang digunakan ialah limbah cair industri kelapa sawit (POME), eceng gondok, COD reagent HR Hach 2125925, *aquadest*, n-heksana, dan sodium sulfat anhidrat.



Gambar 1. Skema alat proses EAPR

2.2 Prosedur Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan Maret hingga Agustus 2023 di Laboratorium Mikrobiologi Teknik, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Penelitian menggunakan kombinasi metode elektrokoagulasi dan fitoremediasi (EAPR) pada reaktor *batch* berukuran 25 cm (panjang) × 20 cm (lebar) × 15 cm (tinggi) yang berisi 5 liter limbah cair industri kelapa sawit. Penelitian dimulai dengan proses pemilihan dan aklimatisasi tanaman eceng gondok, diikuti dengan analisis awal kandungan limbah cair kelapa sawit yaitu uji pH, COD, BOD, TSS, VSS, serta minyak dan lemak. Selanjutnya dilakukan metode EAPR hingga mencapai penurunan nilai kadar limbah yang konstan. Setelah itu, dilakukan analisis akhir untuk menguji kandungan limbah cair kelapa sawit yang telah diolah menggunakan uji yang sama seperti pada analisis awal. Jika selama perlakuan tanaman eceng gondok mengalami kematian, maka tanaman akan diganti dengan tanaman yang segar.

Variabel terikat pada penelitian ini ialah tegangan listrik sebesar 9 volt, 3 buah tanaman eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) dengan jumlah daun 5–8 helai dalam satu reaktor, serta elektroda yang digunakan berbahan seng (Zn). Sedangkan untuk variabel bebasnya yaitu waktu kontak EAPR selama 45, 60, dan 75 menit/hari, serta luas permukaan elektroda dengan variasi pertama yang terdapat pada reaktor 1 ialah katoda berukuran 400 cm² (74 cm × 5,4 cm) dan 4 buah anoda berukuran 11 cm² (10 cm × 1,1 cm), kemudian variasi kedua yang terdapat pada reaktor 2 ialah katoda berukuran 500 cm² (74 cm × 6,8 cm) dan 4 buah anoda berukuran 14 cm² (10 cm × 1,4 cm).

2.3 Analisis

Analisis yang dilakukan pada penelitian ini yaitu analisis derajat keasaman (SNI 6989.11:2019), COD (metode 8000 pada Hach Chemical Company) untuk menentukan kebutuhan oksigen yang diperlukan untuk mengoksidasi senyawa organik dan anorganik pada limbah, BOD (SNI 6989.72:2009) untuk mengetahui kebutuhan oksigen yang diperlukan untuk menguraikan senyawa organik pada limbah, TSS (SNI 6989.3:2019) untuk mengetahui jumlah partikel padat yang tersuspensi pada air limbah, VSS (metode 1684 pada U.S. Environmental Protection Agency (USEPA)) untuk mengetahui jumlah senyawa organik yang menguap dari padatan tersuspensi pada suhu 500 °C, serta minyak dan lemak (SNI 6989.10:2011) untuk mengetahui kandungan minyak dan lemak yang masih terkandung pada limbah cair industri kelapa sawit.

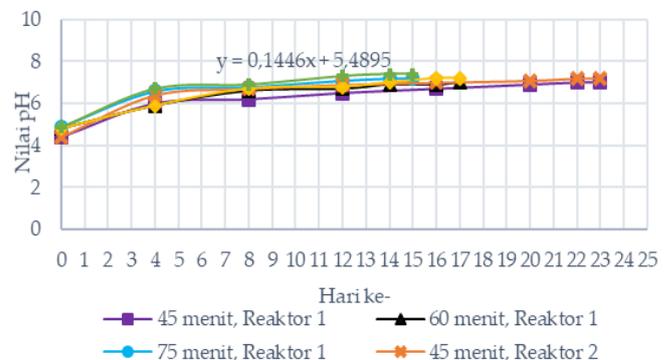
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengaruh Waktu Kontak dan Luas Permukaan Elektroda terhadap Derajat Keasaman

Perubahan derajat keasaman (pH) menuju pH netral merupakan salah satu indikator yang menandakan bahwa proses pendegradasian limbah cair kelapa sawit berjalan dengan baik. Metode yang digunakan untuk pengukuran pH adalah SNI 6989.11:2019. Kondisi awal pH limbah cair kelapa sawit yaitu 4,4–4,9. Namun, seiring berjalannya waktu pH limbah berubah menjadi 7,0–7,4.

Nilai pH pada setiap perlakuan yang telah dilakukan untuk pengolahan limbah cair kelapa sawit dengan metode EAPR ini telah memenuhi baku mutu yang sesuai dengan Permen LH No.5 Tahun 2014, yaitu pH bernilai 6,0–9,0. Pada setiap perlakuan, didapat bahwa pada reaktor 2 dengan luas permukaan katoda berukuran 500 cm² (74 cm × 6,8 cm) dan 4 buah anoda berukuran 14 cm² (10 cm × 1,4 cm) memiliki nilai pH lebih tinggi daripada reaktor 1 dengan luas permukaan katoda berukuran 400 cm² (74 cm × 5,4 cm) dan 4 buah anoda berukuran 11 cm² (10 cm × 1,1 cm).

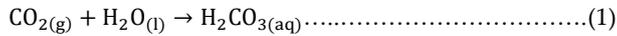
Pada waktu tinggal 45 menit, didapat nilai pH awal limbah sebesar 4,4 dan kemudian naik menjadi 7,0 dan 7,2 berturut-turut pada reaktor 1 dan 2. Pada waktu kontak 60 menit, nilai pH awal sebesar 4,8 kemudian naik pada reaktor 1 menjadi 7,0 dan pada reaktor 2 menjadi 7,2. Sedangkan pada waktu kontak 75 menit, nilai pH awal sebesar 4,9 lalu naik menjadi 7,2 dan 7,4 pada reaktor 1 dan reaktor 2 berturut-turut.



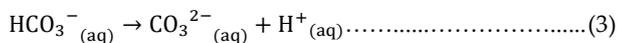
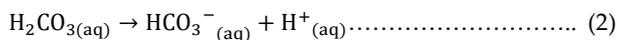
Gambar 2. Hubungan waktu kontak dan luas permukaan elektroda terhadap derajat keasaman (pH)

Dari data hasil penelitian diperoleh bahwa pengolahan limbah cair kelapa sawit dengan menggunakan metode EAPR dapat menaikkan pH karena dua faktor, yaitu adanya proses fitoremediasi dan proses elektrokoagulasi. Ilmannafian *et al.* (2020) mengatakan bahwa yang menyebabkan pH mengalami kenaikan yaitu reaksi CO₂ dengan H₂O. Sedangkan Koto (2021) menyatakan bahwa ion OH⁻ yang dihasilkan oleh katoda akibat proses elektrokoagulasi dapat menyebabkan terjadinya kenaikan pH. Proses fitoremediasi pada penelitian ini menggunakan tanaman eceng gondok, di mana tanaman eceng gondok membutuhkan CO₂ untuk melakukan proses fotosintesis. Oleh karena itu, berkurangnya CO₂ dapat menaikkan nilai pH karena CO₂ dapat bereaksi dengan air untuk membentuk asam karbonat (H₂CO₃) (Lestari & Siregar, 2024). Asam karbonat adalah zat yang bersifat asam dan dapat meningkatkan konsentrasi ion hidrogen (H⁺) dalam

larutan sehingga menurunkan pH larutan (Ilmannafian *et al.*, 2020). Ketika CO₂ berkurang, jumlah asam karbonat yang dihasilkan dari reaksinya dengan air akan berkurang sehingga dapat mengurangi konsentrasi ion hidrogen (H⁺) dalam limbah. Pengurangan konsentrasi ion hidrogen ini menyebabkan kenaikan pH larutan. Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut:



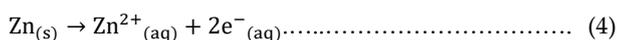
Namun, untuk CO₂ yang sudah bereaksi dengan air juga dapat menghasilkan ion karbonat yang bersifat basa. Hal ini karena H₂CO₃ akan terdisosiasi menjadi ion hidrogen karbonat (HCO₃⁻) dan ion hidrogen (H⁺). Lalu, HCO₃⁻ akan terdisosiasi dalam bentuk ion karbonat (CO₃²⁻) dan ion hidrogen H⁺.



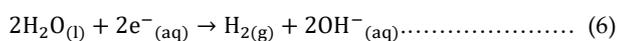
H₂CO₃ merupakan ion karbonik dan CO₃²⁻ merupakan ion karbonat. Di mana H₂CO₃ bersifat asam dan CO₃²⁻ bersifat basa. Dari reaksi di atas maka jumlah ion karbonat akan terus meningkat, sedangkan ion karbonik akan berkurang sehingga ion hidrogen akan menurun dan ion hidroksida akan meningkat, kemudian akan meningkatkan nilai pH. Namun, peningkatan pH yang disebabkan oleh reaksi H₂O dengan CO₂ akan terjadi hanya dalam situasi di mana CO₂ larut dalam air dalam jumlah yang cukup besar (Ilmannafian *et al.*, 2020).

Faktor selanjutnya karena terdapat proses elektrokoagulasi yang menggunakan elektroda seng, di mana kenaikan pH dapat terjadi karena produksi ion OH⁻ pada saat proses elektrolisis berlangsung. Pada proses tersebut, anoda seng akan menghasilkan ion logam sebagai agen koagulan. Kation yang dihasilkan yaitu Zn²⁺ akan berikatan dengan ion hidroksida (OH⁻) yang dihasilkan pada katoda dan membentuk senyawa hidroksida berupa flok, yaitu seng hidroksida (Zn(OH)₂) (Husni, 2010). Sehingga, semakin lama waktu kontak dan semakin luas permukaan logam maka akan semakin baik dalam menetralkan pH karena semakin banyak ion hidroksida yang dihasilkan. Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut:

Pada anoda:



Pada katoda:

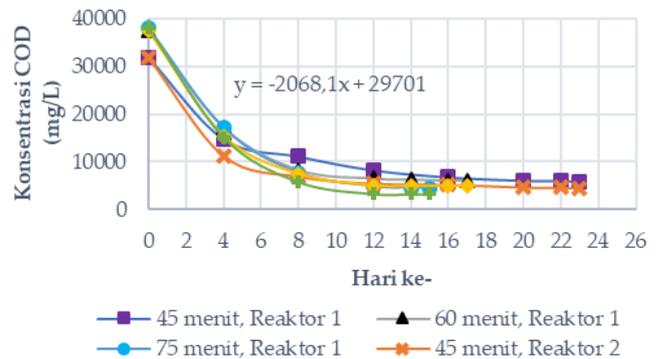


Pada anoda terbentuk senyawa Zn(OH)₂ di mana senyawa ini bersifat basa, serta pada katoda terbentuk ion hidroksida (OH⁻). Oleh karena itu, semakin lama waktu kontak dan semakin luas permukaan elektroda dapat menaikkan pH yang sebelumnya bersifat asam.

3.2 Pengaruh Waktu Kontak dan Luas Permukaan Elektroda terhadap COD

Konsentrasi COD menunjukkan jumlah bahan organik dan anorganik yang dapat dioksidasi dalam limbah (Atima, 2015). Metode pengukuran COD adalah COD metode 8000 pada Hach Chemical Company. Konsentrasi awal COD berkisar antara 31.000–38.000 mg/L dan COD setelah perlakuan berkisar antara 3.000–5.000 mg/L.

Kadar COD pada setiap perlakuan mengalami penurunan seiring berjalannya waktu. Dari data pengamatan, didapatkan penurunan paling besar yaitu pada variasi waktu kontak 75 menit di reaktor 2 dengan luas permukaan katoda berukuran 500 cm² (74 cm × 6,8 cm) dan 4 buah anoda berukuran 14 cm² (10 cm × 1,4 cm), yaitu menjadi 3.240 mg/L dengan persentase penurunan 91,46%. Sedangkan, pada reaktor 1 dengan luas permukaan katoda berukuran 400 cm² (74 cm × 5,4 cm) dan 4 buah anoda berukuran 11 cm² (10 cm × 1,1 cm), yaitu menjadi 4.530 mg/L dengan persentase penurunan 88,05%. Penurunan konsentrasi COD masih belum memenuhi baku mutu sesuai dengan Permen LH No.5 Tahun 2014 yaitu COD sebesar 350 mg/L.



Gambar 3. Hubungan waktu kontak dan luas permukaan elektroda terhadap konsentrasi COD

Penurunan COD dapat terjadi disebabkan oleh dua jenis proses yang digunakan pada penelitian ini, yaitu dengan proses fitoremediasi dan proses elektrokoagulasi. Pada proses fitoremediasi digunakan tanaman eceng gondok, di mana tanaman eceng gondok akan menghasilkan oksigen ke dalam reaktor akibat proses fotosintesis. Oksigen yang disuplai oleh eceng gondok akan masuk ke reaktor melalui akar tanaman, yang mana pada akar tanaman terdapat mikroorganisme yang dapat mereduksi senyawa-senyawa kompleks yang terkandung di dalam limbah menjadi senyawa yang lebih sederhana seperti CO₂, NO₃, H₂O, dan sebagainya. Sehingga senyawa tersebut dapat diserap oleh tanaman untuk proses metabolisme tanaman tersebut. Semakin lama waktu tinggal maka tingkat penyerapannya semakin tinggi karena tanaman eceng gondok dan mikroorganisme memiliki waktu yang cukup untuk berkontak dengan air (Febriningrum & Nur, 2021). Selain itu, tanaman eceng gondok dapat menyerap senyawa anorganik dan logam berat (Djo *et al.*, 2017).

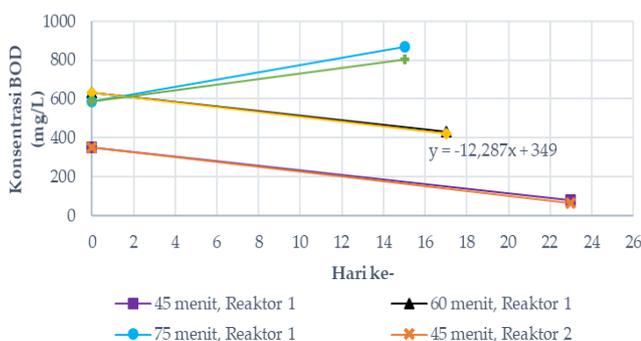
Pada proses elektrokoagulasi dengan menggunakan elektroda seng, penurunan konsentrasi COD dapat terjadi karena pada elektroda akan terbentuk gas hidrogen dan oksigen yang dapat membantu mengangkat partikel-partikel padat dan zat-zat terlarut dalam limbah cair ke permukaan. Selain itu, terdapat pengendapan yang berasal dari reaksi

antara flok hidroksida (OH⁻) dengan ion logam (Zn²⁺) yang akhirnya berperan sebagai koagulan seng hidroksida (Zn(OH)₂) yang dapat mengikat senyawa-senyawa organik maupun non organik, sehingga dapat membantu dalam penggumpalan partikel dan zat terlarut. Koagulan dapat mengikat partikel-partikel dalam limbah membentuk flok dan membantu menghilangkannya dari larutan. Hal ini yang menurunkan konsentrasi COD (Yuniarti & Widayatno, 2021). Oleh karena itu, semakin lama waktu kontak EAPR dan semakin luas permukaan elektroda, maka semakin kecil nilai COD. Nilai COD yang belum memenuhi baku mutu dapat disebabkan karena kurangnya kandungan oksigen dan mikroorganisme yang terdapat pada limbah.

3.3 Pengaruh Waktu Kontak dan Luas Permukaan Elektroda terhadap BOD

Konsentrasi BOD merupakan banyaknya oksigen yang dibutuhkan oleh mikroorganisme untuk menguraikan zat organik dalam kondisi aerobik. Konsentrasi BOD yang tinggi mengartikan rendahnya kandungan oksigen terlarut yang terkandung dalam limbah (Nurjanah et al., 2017). Metode yang digunakan untuk pengukuran BOD adalah SNI 6989.72:2009. Konsentrasi BOD limbah awal berkisar antara 300–650 mg/L dan konsentrasi BOD setelah perlakuan berkisar antara 60–900 mg/L. Hasil pengujian BOD ada yang mengalami kenaikan dan juga penurunan konsentrasi.

Dari data penelitian, didapat bahwa semakin lama waktu kontak, maka semakin tidak baik juga penurunan BOD yang terjadi, bahkan mengalami kenaikan. Penurunan konsentrasi BOD terbaik yaitu terjadi pada variasi waktu kontak 45 menit di reaktor 2 dengan luas permukaan katoda berukuran 500 cm² (74 cm × 6,8 cm) dan 4 buah anoda berukuran 14 cm² (10 cm × 1,4 cm), yaitu menjadi 66,4 mg/L dengan persentase penurunan 80,97%. Sedangkan penurunan pada reaktor 1 dengan luas permukaan katoda berukuran 400 cm² (74 cm × 5,4 cm) dan 4 buah anoda berukuran 11 cm² (10 cm × 1,1 cm), yaitu sebesar 78,4 mg/L dengan persentase penurunan 77,54%. Berdasarkan Permen LH No.5 Tahun 2014 pada variasi 45 menit, baik pada reaktor 1 maupun reaktor 2 sudah mencapai baku mutu yaitu kadar BOD paling tinggi sebesar 100 mg/L. Namun, untuk variasi yang lainnya belum mencapai baku mutu.



Gambar 4. Hubungan waktu kontak dan luas permukaan elektroda terhadap konsentrasi BOD

Perubahan BOD dapat terjadi akibat dua proses yang digunakan, yaitu proses fitoremediasi dan proses

elektrokoagulasi. Pada proses fitoremediasi digunakan tanaman eceng gondok, di mana pada sekitar akar tanaman eceng gondok terdapat mikroorganisme yang dapat mendegradasi polutan berupa senyawa organik yang terkandung dalam limbah. Senyawa organik ini akan dijadikan sumber nutrisi untuk mikroba dan kemudian diubah menjadi senyawa yang lebih sederhana (Djo et al., 2017). Mikroorganisme pada akar eceng gondok, misalnya *Nitrosomonas* dan *Nitrobacter* dapat merombak amonia (NH₃) menjadi nitrit (NO₂) kemudian nitrit akan menjadi nitrat (NO₃) yang akhirnya dapat diserap tanaman (Novita et al., 2022). Selanjutnya, senyawa organik akan masuk ke bagian batang tanaman melalui pembuluh pengangkut yang akan menyebar ke seluruh bagian tanaman (Djo et al., 2017). Proses fotosintesis memperkuat kinerja mikroorganisme di akar tanaman eceng gondok, karena tanaman akan menyuplai oksigen yang cukup untuk mikroorganisme pada zona *rhizosphere* untuk mendegradasi limbah.

Pada proses elektrokoagulasi dengan menggunakan elektroda seng, perubahan BOD dapat terjadi karena ion hidroksida (OH⁻) berikatan dengan ion logam (Zn²⁺) yang berasal dari elektroda membentuk Zn(OH)₂ sebagai koagulan. Sifat dari koagulan tersebut dapat mengikat senyawa-senyawa organik sehingga terjadi pembentukan flok dan akhirnya flok tersebut dapat mengendap. Selain itu, pembentukan gas hidrogen dan oksigen pada elektroda dapat membantu mengangkat flok-flok dalam limbah cair ke permukaan.

Naiknya konsentrasi BOD disebabkan oleh kurangnya penyediaan oksigen di reaktor. Hal ini dapat terjadi karena berkurangnya kemampuan tanaman eceng gondok untuk melakukan fotosintesis akibat dialirkannya tegangan listrik sehingga eceng gondok menjadi lebih cepat mengalami kematian. Kematian eceng gondok menyebabkan berkurangnya suplai oksigen ke dalam reaktor. Selain itu, bagian atas dari reaktor tertutupi oleh flok-flok yang mengapung akibat proses elektrokoagulasi sehingga menyebabkan semakin sedikitnya oksigen yang masuk ke dalam limbah pada reaktor.

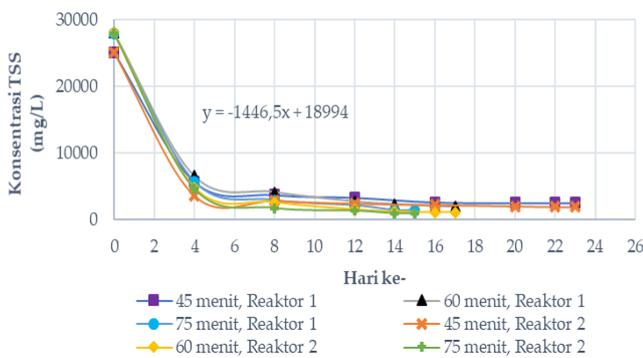
Berkurangnya oksigen juga menyebabkan terhambatnya pertumbuhan mikroorganisme bahkan dapat mengalami kematian sehingga mempengaruhi nilai BOD (Nurjanah et al., 2017). Akibat waktu kontak yang semakin lama dan semakin luas permukaan elektroda dapat menyebabkan beberapa hal. Pertama, dapat menghambat kemampuan mikroorganisme sehingga lebih cepat mengalami kematian, yang mengakibatkan semakin sedikitnya penguraian senyawa organik oleh mikroorganisme. Kedua, flok-flok yang terangkat ke atas akan menyebabkan bagian permukaan limbah tertutup yang menyebabkan oksigen sulit masuk ke air limbah. Ketiga, dapat menyebabkan tanaman eceng gondok semakin terhambat dalam melakukan fotosintesis, bahkan lebih cepat mengalami kematian.

Menurut Putra et al. (2018), metode EAPR ini dapat membantu meningkatkan aktivitas mikroorganisme dalam air limbah untuk penguraian bahan organik, membantu dalam pemindahan ion kontaminan organik dari air ke dalam tumbuhan melalui elektromigrasi, dan EAPR dapat merangsang tumbuhan untuk mengalami proses transpirasi,

yaitu proses penguapan air melalui daun. Hal ini dapat membantu pergerakan air dan nutrisi sehingga mampu mempengaruhi biodegradasi dan pengurangan BOD.

3.4 Pengaruh Waktu Kontak dan Luas Permukaan Elektroda terhadap TSS

Metode yang digunakan untuk pengukuran TSS adalah SNI 6989.3:2019. Konsentrasi TSS limbah awal berkisar antara 33.000–34.000 mg/L dan setelah diberi perlakuan sebesar 900–2.500 mg/L. Dari hasil pengamatan diperoleh bahwa hasil terbaik terdapat pada variasi waktu kontak 75 menit di reaktor 2 dengan luas permukaan katoda berukuran 500 cm² (74 cm × 6,8 cm) dan 4 buah anoda berukuran 14 cm² (10 cm × 1,4 cm), yaitu penurunan menjadi 900 mg/L dengan persentase penurunan 96,77%, sedangkan pada reaktor 1 dengan luas permukaan katoda berukuran 400 cm² (74 cm × 5,4 cm) dan 4 buah anoda berukuran 11 cm² (10 cm × 1,1 cm), yaitu sebesar 1.400 mg/L dengan persentase penurunan 94,98%. Penurunan konsentrasi TSS masih belum memenuhi baku mutu sesuai dengan Permen LH No.5 Tahun 2014 yaitu nilai TSS sebesar 250 mg/L.



Gambar 5. Hubungan waktu kontak dan luas permukaan elektroda terhadap konsentrasi TSS

Analisis TSS merupakan metode yang digunakan untuk mengetahui jumlah total padatan yang tersuspensi dalam limbah. TSS meliputi semua partikel padat yang dapat mengapung dalam limbah dan tidak larut sepenuhnya dalam limbah cair, seperti lumpur, debu, partikel organik, dan berbagai jenis zat padat lainnya yang dapat terapung.

Penurunan TSS dapat disebabkan oleh proses fitoremediasi dan proses elektrokoagulasi. Proses fitoremediasi yang menggunakan tanaman eceng gondok dapat terjadi karena akar tanaman mampu menangkap partikel padat dalam limbah dan mengendapkannya. Hal ini karena akar tanaman eceng gondok memiliki sistem akar yang sangat kompleks dengan banyak cabang dan rambut akar sehingga mampu menahan partikel padat dalam air yang mengalir melalui akar-akar tersebut. Selain itu, mikroorganisme dapat menguraikan partikel padat dalam limbah, terutama partikel yang berasal dari bahan organik. Proses ini dikenal dengan dekomposisi atau biodegradasi. Mikroorganisme dapat menghasilkan enzim yang dapat merombak berbagai senyawa organik kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana, sehingga senyawa organik tersebut lebih mudah dicerna oleh mikroorganisme (Widiyanti et al., 2020).

Selanjutnya penurunan TSS juga dapat disebabkan oleh proses elektrokoagulasi karena penggunaan elektroda yaitu anoda dan katoda yang dialiri arus listrik menghasilkan reaksi elektrokimia di sekitar elektroda. Ion logam yang dihasilkan dari elektroda (Zn²⁺) akan berikatan dengan ion hidroksida (OH⁻) yang sifatnya menarik senyawa-senyawa lain sehingga membentuk flok, di mana flok-flok ini akan ada yang mengendap ke bawah dan ada yang terapung ke atas. Oleh karena itu, semakin lama waktu kontak dan semakin luas permukaan elektroda penurunan TSS akan semakin tinggi.

3.5 Pengaruh Waktu Kontak dan Luas Permukaan Elektroda terhadap VSS

Metode yang digunakan untuk pengukuran VSS adalah metode 1684 pada U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). Konsentrasi VSS pada limbah awal berkisar antara 90.000–93.000 mg/L dan setelah limbah diberi perlakuan berkisar antara 68.000–72.000 mg/L. Dari hasil pengamatan diperoleh bahwa hasil penurunan tertinggi terdapat pada variasi waktu kontak 75 menit di reaktor 2 dengan luas permukaan katoda berukuran 500 cm² (74 cm × 6,8 cm) dan 4 buah anoda berukuran 14 cm² (10 cm × 1,4 cm), yaitu menjadi 68.700 mg/L dengan persentase penurunan 24,92%, sedangkan pada reaktor 1 dengan luas permukaan katoda berukuran 400 cm² (74 cm × 5,4 cm) dan 4 buah anoda berukuran 11 cm² (10 cm × 1,1 cm), yaitu menurunkan VSS menjadi 69.600 mg/L dengan persentase penurunan sebesar 23,93%.



Gambar 6. Hubungan waktu kontak dan luas permukaan elektroda terhadap konsentrasi VSS

VSS dapat digunakan untuk mengetahui jumlah mikroorganisme di dalam air limbah. Hal ini berbanding lurus dengan laju kinetika dekomposisi atau penguraian bahan organik dalam air limbah. Oleh karena itu, semakin banyak mikroorganisme dalam limbah, semakin tinggi juga laju kinetika dekomposisi bahan organiknya. Bahan organik yang dimaksud yaitu seperti mikroorganisme yang sudah mati, senyawa organik yang telah mengalami dekomposisi mikrobiologis, serta senyawa organik lainnya, seperti minyak dan lemak (Trisakti & Sijabat, 2020). Pengukuran VSS pada beberapa titik dapat membantu dalam mengamati perubahan konsentrasi bahan organik yang mudah menguap.

Perubahan konsentrasi VSS pada penelitian ini dapat disebabkan oleh dua faktor yaitu akibat proses fitoremediasi dan proses elektrokoagulasi. Pada proses fitoremediasi

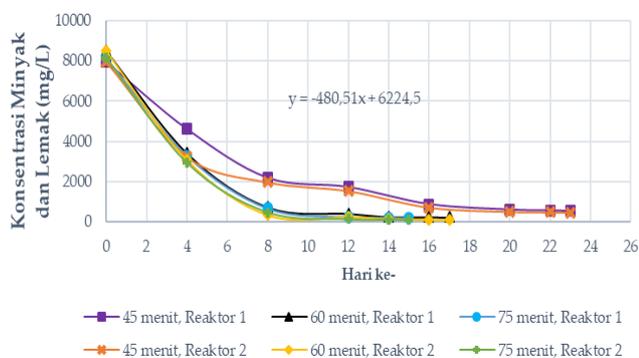
digunakan tanaman eceng gondok, di mana eceng gondok akan menghasilkan oksigen pada reaktor akibat proses fotosintesis. Oksigen tersebut akan dikonsumsi oleh mikroorganisme yang terdapat pada akar tanaman sehingga jumlah mikroorganisme yang ada akan bertambah dan proses degradasi akan semakin cepat.

Kemudian dengan ditambahkan arus listrik pada proses elektrokoagulasi dengan menggunakan elektroda seng akan mempercepat aktivitas mikroorganisme dalam air limbah, termasuk pertumbuhan mikroorganisme. Namun, nilai VSS pada penelitian ini terus menurun yang menunjukkan bahwa kemampuan mikroorganisme untuk menguraikan senyawa organik pada limbah semakin berkurang. Hal ini bisa disebabkan oleh mikroorganisme yang tidak kuat terlalu lama terkena aliran listrik karena semakin lama waktu kontak dan semakin luas permukaan elektroda, semakin banyak juga kematian mikroorganisme. Selain itu, dapat disebabkan karena ketersediaan bahan organik di dalam air limbah semakin menurun, yang menandakan bahwa kualitas air limbah semakin baik (Trisakti & Sijabat, 2020).

3.6 Pengaruh Waktu Kontak dan Luas Permukaan Elektroda terhadap Minyak dan Lemak

Metode yang digunakan untuk pengukuran minyak dan lemak adalah SNI 6989.10:2011. Kandungan minyak dan lemak yang terdapat dalam limbah merupakan sisa dari aktivitas saat proses pengolahan. Semakin kecil kandungan minyak dan lemak pada limbah cair kelapa sawit, maka akan semakin baik kualitas air buangnya. Konsentrasi awal minyak dan lemak berkisar antara 7.000–9.000 mg/L dan setelah limbah diberi perlakuan berkisar antara 90–550 mg/L.

Dari data pengamatan, didapatkan penurunan paling besar yaitu pada variasi waktu kontak 75 menit di reaktor 2 dengan luas permukaan katoda berukuran 500 cm² (74 cm × 6,8 cm) dan 4 buah anoda berukuran 14 cm² (10 cm × 1,4 cm), yaitu menjadi 90 mg/L dengan persentase penurunan 98,89%. Sedangkan pada reaktor 1 dengan luas permukaan katoda berukuran 400 cm² (74 cm × 5,4 cm) dan 4 buah anoda berukuran 11 cm² (10 cm × 1,1 cm), yaitu menjadi 190 mg/L dengan persentase 97,67%. Penurunan konsentrasi minyak dan lemak belum memenuhi baku mutu sesuai dengan Permen LH No.5 Tahun 2014 yaitu sebesar 25 mg/L.



Gambar 7. Hubungan waktu kontak dan luas permukaan elektroda terhadap konsentrasi minyak dan lemak

Penurunan kandungan minyak dan lemak dapat disebabkan karena proses fitoremediasi dan proses elektrokoagulasi. Di mana pada proses fitoremediasi dengan menggunakan tanaman eceng gondok, akar tanaman akan menarik zat kontaminan (minyak dan lemak) sehingga dapat terakumulasi di sekitar tanaman eceng gondok dan kemudian akan diserap oleh tanaman. Namun, kemampuan penyerapan eceng gondok terbatas untuk penyerapan minyak dan lemak. Selain itu, mikroorganisme yang terdapat di sekitar akar tanaman eceng gondok juga akan mengurai minyak dan lemak. Jika hanya menggunakan eceng gondok untuk mengurai minyak dan lemak dalam skala besar maka memerlukan waktu yang cukup lama dan perlu pengolahan tambahan (Putra, 2018).

Kemudian penurunan minyak dan lemak yang disebabkan oleh proses elektrokoagulasi dengan menggunakan elektroda seng didapat bahwa semakin lama waktu kontak dan semakin besar luas permukaan elektroda membuat kandungan minyak dan lemak dalam limbah cair semakin berkurang. Hal ini dikarenakan semakin banyaknya pembentukan Zn(OH)₂ yang berasal dari reaksi ion logam dengan ion hidroksida, di mana Zn(OH)₂ dapat berperan sebagai senyawa koagulan yang memiliki fungsi sebagai bahan penyerap dan penggumpal, salah satunya dapat menggumpalkan konsentrasi minyak dan lemak pada air limbah sehingga dapat lebih mudah untuk diendapkan (Sutanto et al., 2017).

Pada perlakuan 1, 2, dan 3 terdapat perbedaan total hari proses EAPR berlangsung. Hal ini disebabkan karena perlakuan akan dihentikan apabila konsentrasi parameter-parameter yang diuji telah mencapai nilai yang konstan. Oleh karena itu, pada setiap perlakuan terdapat perbedaan total hari proses berlangsung akibat sudah konstannya nilai dari parameter-parameter tersebut. Di mana dapat diambil contoh dari parameter COD, pada perlakuan 1 sudah mulai konstan dari hari ke-20 dan dihentikan pada hari ke-23. Untuk perlakuan 2 sudah mulai konstan dari hari ke-14 dan dihentikan pada hari ke-17. Sedangkan untuk perlakuan 3 sudah mulai konstan dari hari ke-12 dan dihentikan pada hari ke-15.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, diperoleh bahwa metode EAPR belum efektif untuk pengolahan limbah cair kelapa sawit karena berdasarkan uji yang telah dilakukan nilai yang sudah sesuai baku mutu hanya nilai pH pada seluruh perlakuan dan BOD pada waktu kontak 45 menit. Hasil tertinggi untuk pH sebesar 7,4; penurunan COD sebesar 91,46% atau menjadi 3.240 mg/L; penurunan TSS sebesar 96,77% atau menjadi 900 mg/L; penurunan VSS sebesar 24,92% atau menjadi 68.700 mg/L; serta penurunan minyak dan lemak sebesar 98,89% atau menjadi 90 mg/L pada waktu kontak 75 menit dan luas permukaan katoda 500 cm² dan anoda 14 cm²; sedangkan untuk penurunan BOD tertinggi sebesar 80,97% atau menjadi 66,4 mg/L pada waktu kontak 45 menit dan luas permukaan katoda 500 cm² dan anoda 14 cm². Selain itu, metode ini memerlukan waktu kontak yang lebih lama dan luas permukaan elektroda yang lebih besar dengan mempertimbangkan kebutuhan listrik yang digunakan akan

berdampak pada kebutuhan biaya yang lebih besar, sehingga dirasa metode ini belum efektif untuk digunakan. Kedua, semakin lama waktu kontak maka semakin tinggi penurunan nilai COD, TSS, VSS, serta minyak dan lemak. Sedangkan untuk nilai BOD dan pH mengalami kenaikan. Terakhir, semakin luas permukaan elektroda maka semakin tinggi penurunan konsentrasi COD, BOD, TSS, VSS, serta minyak dan lemak. Sedangkan untuk nilai pH mengalami kenaikan. Adapun saran yang dapat dijadikan masukan untuk penelitian selanjutnya yaitu menambahkan metode aerasi supaya dapat meningkatkan kandungan oksigen dalam air limbah, menambahkan mikroorganisme untuk mengurai kandungan organik, menggunakan jenis tanaman air lainnya, maupun melakukan *pretreatment* atau pengolahan lebih lanjut supaya hasil perlakuan dapat sesuai dengan baku mutu.

PERSANTUNAN

Penulis menyampaikan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu dan memberi dukungan. Dana untuk penelitian ini menggunakan dana pribadi.

DAFTAR PUSTAKA

- Affandi, G. N., Berlianti, P. C. G., Ramadhania, N. R., Shawaaba, R. S. A., & Radianto, D. O. (2024). Efektivitas Pengolahan Limbah Fisik (Padat dan Cair) dengan Menggunakan Teknologi Inovatif. *Jurnal Wilayah, Kota dan Lingkungan Berkelanjutan*, 3(1), 84–98.
- Atima, W. (2015). BOD dan COD sebagai Parameter Pencemaran Air dan Baku Mutu Air Limbah. *BIOSEL (Biology Science and Education): Jurnal Penelitian Science dan Pendidikan*, 4(1), 83-93.
- Badan Pusat Statistik. (2020). *Statistik Kelapa Sawit Indonesia*. Jakarta: Badan Pusat Statistik.
- Badan Standardisasi Nasional. (2009). SNI 6989.72:2009 tentang Air dan Air Limbah – Bagian 72: Cara Uji Kebutuhan Oksigen Biokimia (Biochemical Oxygen Demand/BOD). Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2011). SNI 6989.10:2011 tentang Air dan Air Limbah – Bagian 10: Cara Uji Minyak Nabati dan Minyak Mineral secara Gravimetri. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). SNI 6989.3:2019 tentang Air dan Air Limbah – Bagian 3: Cara Uji Padatan Tersuspensi Total (Total Suspended Solids/TSS) secara Gravimetri. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). SNI 6989.11:2019 tentang Air dan Air Limbah – Bagian 11: Cara Uji Derajat Keasaman (pH) dengan Menggunakan pH Meter. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Djo, Y. H. W., Suastuti, D. A., Suprihatin, I. E., & Sulihingtyas, W. D. (2017). Fitoremediasi Menggunakan Tanaman Eceng Gondok (*Eichhornia crassipes*) untuk Menurunkan COD dan Kandungan Cu dan Cr Limbah Cair Laboratorium Analitik Universitas Udayana. *Cakra Kimia (Indonesian E-Journal of Applied Chemistry)*, 5(2), 137–144.
- Febriningrum, P. N., & Nur, M. S. M. (2021). The Addition Effect of Chitosan and *Bacillus amyloliquefanciens* Bacteria in the Tapioca Liquid Waste Phytoremediation Process. *Indonesian Journal of Chemical Science*, 10(1), 1–7.
- Hach Chemical Company. (2007). *HACH 8000: Oxygen Demand, Chemical Using Reactor Digestion Method*. Washington, DC: Hach Chemical Company.
- Husni, F. (2010). Pengolahan Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit Effluent RANUT (Reaktor Anaerobik Unggun Tetap) Menggunakan Teknik Elektrokoagulasi. Disertasi, Universitas Islam Negeri Sumatera Utara.
- Ilmannafian, A. G., Lestari, E., & Khairunisa, F. (2020). Pengolahan Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit dengan Metode Filtrasi dan Fitoremediasi Menggunakan Tanaman Eceng Gondok (*Eichhornia crassipes*). *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 21(2), 244–253.
- Juniar, H. (2018). Degradasi Limbah Cair Industri Kelapa Sawit dengan Menggunakan Sintesis Fe₂O₃. *Jurnal Redoks*, 3(1), 9–13.
- Koto, I. (2021). Pengolahan Limbah Cair Kelapa Sawit dengan Memvariasikan Elektroda Melalui Proses Elektrokoagulasi. Disertasi, Universitas Islam Negeri Sumatera Utara.
- Lestari, W., & Siregar, L. P. A. (2024). Kemampuan Tanaman Air Sebagai Fitoremediator Limbah Cair Pabrik Pengolahan Kelapa Sawit. *Jurnal Bios Logos*, 14(1), 45–54.
- Novita, E., Wahyuningsih, S., Safrizal, M. R., Puspitasari, A. I., & Pradana, H. A. (2022). Kajian Perbaikan Kualitas Air Limbah Pengolahan Kopi Menggunakan Metode Fitoremediasi dengan Tanaman Eceng Gondok (*Eichhornia crassipes*). *Jurnal Sains dan Teknologi*, 11(1), 192–203.
- Nurjanah, S., Zaman, B., & Syakur, A. (2017). Penyisihan BOD dan COD Limbah Cair Industri Karet dengan Sistem Biofilter Aerob dan Plasma Dielectric Barrier Discharge (DBD). *Jurnal Teknik Lingkungan*, 6(1), 1–14.
- Pandey, J., Sarkar, S., & Pandey, V. C. (2022). Chapter 10 - Compost-Assisted Phytoremediation. In V. Pandey (Ed.), *Assisted Phytoremediation* (pp. 243–264). Elsevier.
- Putra, R. (2018). Pemanfaatan Eceng Gondok (*Eichhornia crassipes*) sebagai Tanaman Phyto Treatment dalam Proses Pengolahan Limbah Cair Penyulingan Minyak Kayu Putih. Tugas Akhir, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.
- Putra, R. S., Annisa, A. D., & Budiarto, S. (2020). Batik Wastewater Treatment Using Simultaneous Process of Electrocoagulation and Electro-Assisted Phytoremediation (EAPR). *Indonesian Journal of Chemistry*, 20(6), 1221–1229.
- Putra, R. S., Kusumawati, N., Trismiarni, M. E., & Ma'arif, N. (2018). Gabungan Proses EAPR-Aerasi (Electro-Assisted Phytoremediation Aerasi) dengan Tanaman

- Kiambang (*Salvinia molesta*) untuk Remediasi Air Limbah Logam Cu dan Zn. *PROSIDING SNIPS*, 64–70.
- Putra, R. S., Novarita, D., & Cahyana, F. (2014). Peningkatan Remediasi Cu Menggunakan Metode EAPR dengan Tanaman Eceng Gondok (*Eichornia crassipes*). Tokyo Tech Indonesian Commitment Award (TICA), 1–8.
- Republik Indonesia. (2014). Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah. Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup.
- Stefany, C., Andrio, D., & Zulamraini, S. (2023). Pemanfaatan Activated Carbon dalam Meningkatkan Fungsi Koagulan untuk Pengolahan POME (Palm Oil Mill Effluent). *Jurnal Pengelolaan Dan Teknologi Lingkungan*, 2(2), 64–74.
- Sutanto, Rohadi, N., & Hidjan. (2017). Penggunaan Zeolit Terpadu Proses Elektrokoagulasi untuk Menurunkan Kandungan Minyak dan Lemak dalam Air Limbah. 2nd Seminar Nasional IPTEK Terapan (SENIT), 144–148. Tegal.
- Trisakti, B., & Sijabat, I.P. (2020). Profil pH dan Volatile Suspended Solids pada Proses Pengomposan Tandan Kosong Kelapa Sawit Menggunakan Pupuk Cair Organik Aktif sebagai co-Composting. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 9(1), 11–15.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2001). Method 1684 Total, Fixed, and Volatile Solids in Water, Solids, and Biosolids. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency.
- Widiyanti, A., Oktavia, L., & Setiawan, A. (2020). Fitoteknologi Pengolahan Limbah Cair Depo Pemasaran Ikan (DPI) Kabupaten Sidoarjo Menggunakan Eceng Gondok (*Eichornia crassipes*) dan Kangkung Air (*Ipomoea aquatic*). *Journal of Research and Technology*, 6(2), 227–236.
- Yuniarti, B. I., & Widayatno, T. (2021). Analisa Perubahan BOD, COD, dan TSS Limbah Cair Industri Tekstil Menggunakan Metode Elektrooksidasi-elektrokoagulasi Elektroda Fe-C dengan Sistem Semi Kontinyu. *Rekayasa Hijau: Jurnal Teknologi Ramah Lingkungan*, 5(3), 238–247.