

Pengolahan Limbah Cair Industri Menggunakan Metode *Advanced Oxidation Processes*: Analisis Perbandingan Kinerja

Sri Martini ^{a,*}, Mira Setiawati^b^aProgram Studi Pascasarjana, Teknik Kimia, Universitas Muhammadiyah Palembang, 13 Ulu Palembang, Indonesia^bProgram Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Palembang, 13 Ulu Palembang, Indonesia

INFO ARTIKEL

Riwayat Artikel:

Diterima 25 Juni 2026

Diterima setelah direvisi 005 Juli 2026

Disetujui 6 Juli 2026

Kata kunci:

Fenton

Photo-Fenton

TiO₂

Limbah Cair Minyak Bumi

Total Organic Carbon (TOC)

Abstract- Petroleum refinery wastewater exhibits complex characteristics due to the presence of refractory organic compounds that are highly resistant. This study investigates the performance of advanced oxidation processes (AOPs), including Fenton, photo-Fenton, TiO₂, and TiO₂/UV, for total organic carbon (TOC) removal by evaluating the effects of light irradiation, pH conditions, and oxidant/catalyst dosage. The results demonstrate that light irradiation significantly enhances oxidation efficiency by promoting the generation of reactive hydroxyl radicals ($\bullet$ OH), which are responsible for the degradation and mineralization of organic contaminants. Among the investigated processes, the photo-Fenton system exhibited the highest degradation performance due to the synergistic interaction between Fenton reactions and photochemical mechanisms, which facilitate Fe^{2+} regeneration and sustain catalytic activity. The optimum pH conditions varied depending on the treatment system, where maximum TOC removal efficiencies happened at pH 4 and pH 5 for Fenton and photo-Fenton, and pH 5 and pH 7 for TiO₂ and TiO₂/UV, respectively. Increasing the oxidant/catalyst dosage up to 1.5 g/L resulted in enhanced TOC removal efficiencies, reaching maximum values of 60.57%, 80%, 55.14%, and 68% for Fenton, photo-Fenton, TiO₂, and TiO₂/UV, respectively. However, excessive dosage adversely affected the treatment efficiency. Overall, the photo-Fenton process demonstrated the highest potential for TOC mineralization in petroleum refinery wastewater.

Intisari- Limbah cair industri pengolahan minyak bumi memiliki karakteristik kompleks akibat keberadaan senyawa organik kompleks yang sulit terdegradasi secara alami. Penelitian ini mengkaji kinerja beberapa proses oksidasi tingkat tinggi atau *advanced oxidation processes* (AOPs), termasuk Fenton, photo-Fenton, TiO₂, dan TiO₂/radiasi UV sinar matahari, dalam menurunkan konsentrasi TOC dengan mengevaluasi pengaruh radiasi cahaya, kondisi pH, dan variasi dosis oksidator/katalis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa radiasi UV dari cahaya matahari mampu meningkatkan efisiensi oksidasi melalui peningkatan pembentukan radikal hidroksil ($\bullet$ OH). Proses photo-Fenton menunjukkan kemampuan degradasi tertinggi karena adanya kombinasi reaksi Fenton dan mekanisme fotokimia yang meningkatkan regenerasi Fe^{2+} serta mempertahankan aktivitas katalitik. Pengaruh pH menunjukkan kondisi optimum yang berbeda untuk setiap sistem, dimana pH 4 dan pH 5 untuk Fenton dan photo-Fenton, serta pH 5 dan pH 7 untuk TiO₂ dan TiO₂/UV. Selain itu, pada dosis reagen/katalis sebesar 1,5 g/L, didapatkan persentase efisiensi penurunan TOC yaitu masing-masing sebesar 60,57%, 80%, 55,14%, dan 68% untuk Fenton, photo-Fenton, TiO₂, dan TiO₂/UV. Namun, penambahan dosis yang berlebih mengakibatkan perlambatan reaksi oksidasi, bahkan terjadi penurunan efisiensi. Secara keseluruhan, AOPs terutama photo-Fenton merupakan teknologi efektif untuk pengolahan limbah cair industri.

1. Pendahuluan

Teknologi pengolahan air limbah yang efektif dan efisien semakin dibutuhkan seiring dengan pertumbuhan sektor industri yang pesat, yang membawa dampak peningkatan kuantitas limbah buangan yang dihasilkan.

Pemilihan metode pengolahan limbah cair dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk karakteristik komposisi limbah, regulasi pemerintah setempat, biaya operasional, dan efektivitas proses pengolahan [1-4].

Salah satu teknologi pengolahan limbah yang dapat diterapkan pada sistem pengolahan air limbah adalah teknik oksidasi tingkat lanjut yang

* Corresponding Author:

E-mail: slmartini79@gmail.com (Sri Martini)

dikenal dengan istilah *advanced oxidation processes* (AOPs). Proses AOPs memanfaatkan radikal hidroksil ($\cdot\text{OH}$), radikal sulfat ($\text{SO}_4\cdot^-$), radikal superoksida ($\text{O}_2\cdot^-$), hidrogen peroksida (H_2O_2), dan ozon (O_3) yang bersifat oksidatif, untuk memineralisasi kontaminan organik melalui mekanisme oksidasi. Dalam mekanisme AOPs, terdapat beberapa metode yang dapat diaplikasi secara terpisah atau terintegrasi, termasuk proses AOPs homogen yang meliputi penggunaan reagen Fenton, H_2O_2 , photo-Fenton, dan ozon, serta proses heterogen yang menggunakan fotokatalis berbasis semikonduktor seperti TiO_2 , Fe_2O_3 , CdS , GaP , ZnS , dan ZnO [2, 5]. Dibandingkan dengan teknologi pengolahan air limbah lainnya, proses fotokatalisis memiliki beberapa keunggulan seperti adanya sinergitas untuk menjalankan dua mekanisme pemurnian secara bersamaan, yaitu reaksi reduksi dan oksidasi [5-9].

Berdasarkan observasi terhadap literatur terkait penelitian metode AOPs dalam perspektif pengolahan limbah, dapat disimpulkan beberapa hal yang masih terbatas penelaahannya, sehingga membutuhkan pengembangan penelitian yang lebih komprehensif untuk menjembatani celah tersebut (*research gaps*). Pertama, pada banyak penelitian terdahulu, pengujian efektifitas metode AOPs untuk pengolahan air limbah, mayoritas masih didominasi oleh penggunaan limbah sintetis yang disesuaikan dengan target polutan yang ingin direduksi, sehingga aplikasi pada limbah cair industri yang sangat kompleks masih sangat terbatas [10, 11], termasuk limbah yang berasal dari kilang pengolahan minyak bumi (*raw petroleum refinery wastewater*). Kedua, implementasi parameter TOC untuk mengurangi kandungan polutan organik, dengan mempertimbangkan parameter penting seperti pengaruh radiasi, pH larutan, dan dosis reagen, juga masih sangat terbatas, sedangkan nilai TOC merupakan salah satu representasi utama dari efektifitas metode AOPs. Polutan organik juga termasuk polutan yang memiliki persentase keberadaan yang tinggi pada limbah cair yang dihasilkan oleh berbagai sektor industri dan relatif sulit terdegradasi secara alami. Ketiga, yaitu terkait dengan studi komparasi efektifitas dari variasi metode AOPs yang juga masih terbatas.

Oleh karena itu, pada penelitian ini, penulis melakukan; (1) Analisa perbandingan efisiensi antara empat tipe proses AOPs terpilih yang meliputi Fenton, photo-Fenton, TiO_2 , dan TiO_2/UV dengan parameter kajian utama yaitu perubahan konsentrasi TOC pada limbah cair industri pengolahan minyak bumi; dan (2) Evaluasi pengaruh berbagai parameter operasi, seperti iradiasi cahaya matahari, lama waktu reaksi, pH larutan, dan dosis H_2O_2 / TiO_2 . Penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai efektifitas berbagai sistem AOPs dalam pengolahan limbah cair serta memberikan dasar ilmiah dalam menentukan kondisi operasi optimum pada proses pengolahan tersebut.

2. Bahan dan Metodologi

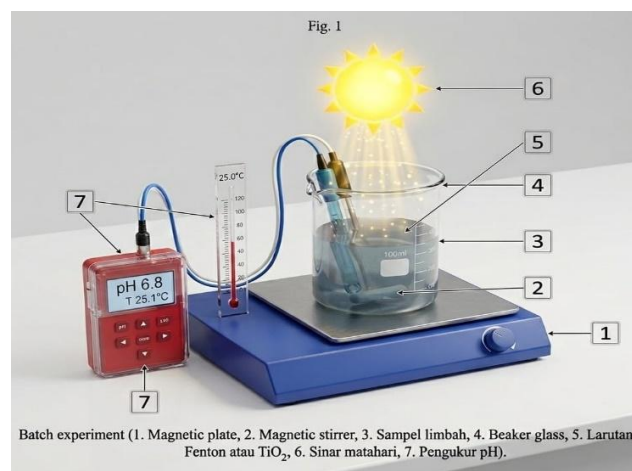
2.1. Bahan dan Peralatan

Sampel limbah cair yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari unit pengolahan limbah cair industri kilang minyak bumi. Sampel diambil dari kolam keluaran sistem *Dissolved Air Flotation* (DAF) sebelum dialirkan menuju *Biological Treatment Unit* (BTU). Proses analisa konsentrasi TOC dilakukan dengan menggunakan instrumen Shimadzu TOC-V CPH analyzer. Intensitas radiasi cahaya matahari selama proses reaksi diamati dengan menggunakan Licor Light Meter model Li-250A. Perhitungan efisiensi metode AOPs terhadap perubahan konsentrasi TOC dilakukan dengan menggunakan rumusan sebagai berikut [27].

$$\text{Efisiensi AOPs dalam menurunkan nilai TOC (\%)} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \% \quad (1)$$

Dimana konsentrasi C_0 dan C_e adalah konsentrasi TOC sampel limbah sebelum dan sesudah proses AOPs.

Bahan kimia yang digunakan dalam penelitian ini meliputi *hydrogen peroxide* (H_2O_2 , 30% w/v), *hydrochloric acid* (HCl, 32%), *ferrous sulphate hydrate* ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 99%), and *titanium (IV) oxide* (TiO_2 -P25, 99.7%) anatase dari Sigma-Aldrich. Perlengkapan eksperimen sistem *batch* di laboratorium termasuk *glassware* dicuci bersih dan dibilas dengan menggunakan de-ionized water sebelum dikeringkan dalam oven untuk selanjutnya digunakan dalam eksperimen. Secara umum, ilustrasi proses AOPs yang melibatkan sinar UV matahari dapat diamati pada Gambar 1.



Gambar 1. Proses Oksidasi Tingkat Tinggi (AOPs)

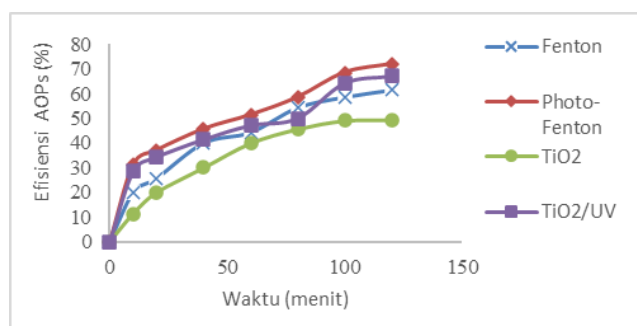
2.2. Metodologi

Proses oksidasi dilakukan secara *batch* menggunakan gelas kimia Pyrex berkapasitas 250 mL yang berfungsi sebagai reaktor. Setiap reaktor dilengkapi dengan pengaduk magnetik (*magnetic stirrer*) dan ditempatkan di atas *digital magnetic plate*, untuk memastikan proses pencampuran berlangsung secara homogen selama reaksi. Kemudian, sebanyak 100 mL sampel limbah cair minyak bumi (PRW) dituangkan ke dalam gelas reaktor. Untuk metode Fenton, zat kimia berupa H_2O_2 dan $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ dimasukkan sesuai dosis yang ditentukan ke dalam reaktor yang telah berisi sampel limbah, dan eksperimen dilakukan di dalam box tertutup untuk menghindari pengaruh radiasi cahaya. Selanjutnya, pada proses Photo-Fenton, prosedur yang sama dilakukan sebagaimana proses Fenton, namun dilakukan di luar ruangan untuk mendapatkan radiasi cahaya matahari yang optimal. Untuk proses TiO_2/UV , prosedur dilakukan dengan mencampurkan TiO_2 dengan dosis yang ditentukan ke dalam gelas reaktor dan proses dilaksanakan di tempat terbuka demi optimalisasi radiasi sinar matahari, sebaliknya, proses TiO_2 non radiasi dilakukan di dalam box tertutup. Pada keseluruhan metode, untuk pengukuran pengaruh interval waktu, sampel diambil dengan menggunakan *gas-tight syringe*, kemudian dilakukan proses filtrasi menggunakan membran *polyvinylidene fluoride* (PVDF) *syringe filter* berukuran pori 0,45 μm sebelum dilakukan analisis lebih lanjut. Percobaan Fenton dilakukan tanpa paparan cahaya (*dark condition*), sedangkan proses photo-Fenton dilakukan dengan bantuan sumber cahaya matahari untuk meningkatkan aktivitas fotokimia. Eksperimen dilakukan dengan melibatkan tahap observasi terhadap prakiraan cuaca untuk menjamin kestabilan intensitas radiasi selama proses berlangsung. Berdasarkan hasil pengukuran selama periode eksperimen, rata-rata intensitas cahaya matahari adalah 1570 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Setiap percobaan dilakukan sebanyak dua kali pengulangan (*duplicate experiments*) untuk memperoleh nilai rata-rata yang digunakan dalam analisis.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pengaruh Radiasi Sinar Matahari

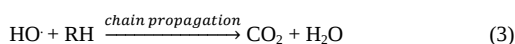
Dalam penelitian ini, efektivitas berbagai proses AOPs dalam proses mineralisasi senyawa organik dianalisa berdasarkan perubahan profil konsentrasi TOC. Limbah cair kilang minyak bumi umumnya masih mengandung campuran kompleks senyawa hidrokarbon, termasuk hidrokarbon aromatik polisiklik, fenol, senyawa alifatik rantai panjang, serta berbagai senyawa lainnya yang sulit terdegradasi secara biologis. Oleh karena itu, kemampuan sistem AOP dalam menghasilkan radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$), menjadi faktor utama yang menentukan keberhasilan proses pengolahan [6]. Berdasarkan pengamatan data pada Gambar 2, sistem AOPs yang diuji menunjukkan kinerja yang efektif dalam mendegradasi polutan organik yang terdapat dalam sampel limbah. Secara garis besar, diperoleh hasil akhir efisiensi dengan urutan sebagai berikut, yaitu; Photo Fenton (72%) > TiO_2 /radiasi (67.14%) > Fenton (61.43%) > TiO_2 (54.29%).



Gambar 2. Pengaruh Radiasi Terhadap Efisiensi Proses Aops Pada Profil Konsentrasi TOC

Hasil tersebut menunjukkan bahwa proses yang melibatkan kombinasi oksidasi kimia dan energi radiasi/cahaya menghasilkan kemampuan mineralisasi yang lebih tinggi. Peningkatan kinerja tersebut berkaitan dengan peningkatan pembentukan radikal hidroksil yang lebih banyak dan kemampuan system yang lebih baik dalam mempertahankan aktivitas katalitik selama reaksi berlangsung [12].

Proses photo-Fenton yang menunjukkan kinerja terbaik menunjukkan adanya efek sinergis antara reaksi Fenton dan energi cahaya. Peningkatan performa tersebut dapat terjadi karena adanya regenerasi ion Fe^{2+} melalui reaksi fotoreduksi Fe^{3+} . Reaksi tersebut memungkinkan siklus $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ berlangsung lebih berkesinambungan sehingga pembentukan radikal hidroksil dapat dipertahankan selama proses berlangsung. Selain itu, energi cahaya juga dapat menyebabkan fotolisis hidrogen peroksida. Mekanisme produksi radikal bebas pada proses Photo-Fenton dapat dideskripsikan melalui reaksi berikut [8] :



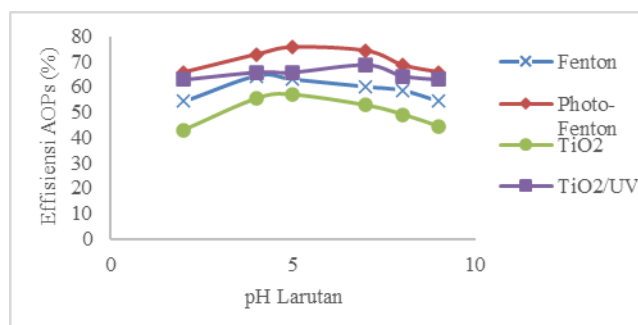
Kemampuan mineralisasi yang lebih tinggi dari photo-Fenton sangat penting untuk pengolahan limbah industri karena sebagian besar kontaminan organik yang tersisa bersifat refrakter. Teknik AOPs seperti photo-Fenton, yang bersinergi dengan radiasi UV/ sinar matahari mampu memproduksi radikal hidroksil yang lebih tinggi sehingga lebih efektif

dalam mengoksidasi senyawa aromatik dan hidrokarbon kompleks dibandingkan proses Fenton atau aplikasi semikonduktor non radiasi [12, 13].

Selain itu, untuk reaksi oksidasi heterogenus yang melibatkan TiO_2 , dapat diasumsikan bahwa integrasi TiO_2 dengan sinar matahari juga terbukti meningkatkan kemampuan fotokatalitik secara signifikan dibandingkan sistem non radiasi. Metode TiO_2 /UV yang berasal dari sinar matahari mampu menurunkan konsentrasi TOC hingga 115 mg/L setelah 120 menit, dengan efisiensi penyisihan sebesar 67,14%. Peningkatan tersebut disebabkan oleh peningkatan pembentukan pasangan elektron akibat energi foton matahari. Meskipun, kinerja TiO_2 /sinar matahari masih relatif lebih rendah dibandingkan photo-Fenton.

3.2 Pengaruh pH Larutan

Nilai pH merupakan salah satu parameter operasi penting karena mempengaruhi mekanisme pembentukan spesies oksidatif, stabilitas katalis, dekomposisi oksidator, karakteristik permukaan katalis, serta interaksi antara polutan organik dan fase aktif. Dalam pengolahan limbah cair industri, termasuk industri kilang minyak, pengendalian pH menjadi faktor penting karena limbah yang dihasilkan mengandung kombinasi senyawa organik yang kompleks. Gambar 3 mendeskripsikan besaran persentase efisiensi metode AOPs yang diuji dalam sudut pandang variasi pH larutan terhadap profil konsentrasi TOC.



Gambar 3. Pengaruh pH Terhadap Efisiensi Proses AOPs Pada Profil TOC Limbah Cair

Berdasarkan pengamatan pada Gambar 3, proses oksidasi homogen seperti Fenton dan photo-Fenton menunjukkan kinerja optimum pada rentang pH 4 dan pH 5. Kecenderungan yang sama juga diamati pada seluruh proses oksidasi yang melibatkan material semikonduktor TiO_2 . Hal tersebut menunjukkan bahwa kondisi asam relatif memberi keuntungan untuk proses mineralisasi. Pada kondisi yang cenderung asam, terjadi peningkatan interaksi elektrostatis antara agen Fenton atau situs aktif pada permukaan semikonduktor dengan molekul substrat, sehingga meningkatkan kemungkinan kontak antara radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) yang dihasilkan dengan partikel polutan. Peningkatan interaksi tersebut berkontribusi terhadap percepatan proses degradasi senyawa pencemar melalui mekanisme oksidasi lanjut [14].

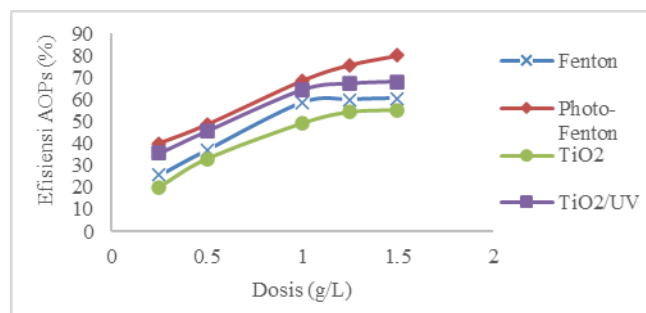
Dibandingkan metode Fenton, photo-Fenton masih menunjukkan kinerja yang lebih tinggi pada seluruh rentang pH uji, dimana efisiensi penurunan TOC mulai meningkat dari 65,71% pada pH 2 hingga mencapai nilai maksimum sebesar 75,71% pada pH 5. Photo-Fenton mampu menghasilkan mineralisasi organik yang lebih tinggi. Hal ini dapat dikaitkan dengan kemampuan cahaya dalam mempertahankan siklus besi melalui pembentukan kompleks Fe(III) -hidroksi yang bersifat fotoreaktif. Pada kondisi tersebut, Fe^{3+} tidak hanya mengalami hidrolisis, tetapi juga dapat berpartisipasi dalam reaksi fotoreduksi yang menghasilkan kembali

Fe^{2+} aktif dan radikal hidroksil tambahan. Namun, ketika pH meningkat menuju kondisi basa, pembentukan hidroksida besi semakin dominan sehingga mengurangi aktivitas katalitik [13].

Sementara itu, pada metode AOPs berbasis material semikonduktor TiO_2 dan TiO_2/UV , kondisi optimum diperoleh pada rentang pH 5 dan pH 7. Secara umum, partikel TiO_2 memiliki muatan permukaan positif ketika nilai pH larutan berada di bawah titik muatan nol-nya. Sebaliknya, ketika nilai pH larutan melebihi nilai konstanta disosiasi asam (*acid dissociation constant*), permukaan partikel cenderung mengalami deprotonasi dan menghasilkan muatan negatif [11]. Perubahan muatan permukaan tersebut akan memengaruhi interaksi elektrostatis antara katalis dan molekul polutan, sehingga menentukan efektivitas adsorpsi, transfer muatan, serta pembentukan spesies oksidatif selama proses fotokatalisis.

3.4 Pengaruh Dosis

Dosis reagen oksidasi seperti hidrogen peroksida dan semikonduktor TiO_2 termasuk parameter penting yang menentukan efektivitas proses reaksi karena mempengaruhi ketersediaan situs aktif katalis, laju reaksi oksidasi, serta keseimbangan antara pembentukan dan konsumsi radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$). Berdasarkan data penelitian yang diilustrasikan pada Gambar 4, peningkatan dosis dari 0,25 g/L hingga 1,5 g/L memberikan hasil yang positif pada seluruh metode Fenton, photo-Fenton, TiO_2 , dan TiO_2/UV dalam menurunkan konsentrasi TOC. Meskipun demikian, peningkatan tersebut tetap menunjukkan pola perubahan yang berbeda. Pada dosis maksimum, efisiensi penurunan TOC yang diperoleh mencapai 60,57% untuk Fenton, 80% untuk photo-Fenton, 55,14% untuk TiO_2 , dan 68% untuk TiO_2/UV .



Gambar 4. Pengaruh Dosis H_2O_2 dan TiO_2 Terhadap Efisiensi Proses AOPs pada profil TOC Limbah Cair

Hasil tersebut menunjukkan bahwa proses photo-Fenton memiliki kemampuan mineralisasi paling tinggi dibandingkan metode lainnya karena adanya kombinasi antara reaksi Fenton dan kontribusi fotokimia yang meningkatkan pembentukan radikal hidroksil [7].

Berbeda dengan proses Fenton, photo-Fenton menunjukkan peningkatan efisiensi paling tinggi dengan bertambahnya dosis. Pada penelitian ini, peningkatan dosis dari 0,25 g/L menjadi 1,5 g/L meningkatkan efisiensi penurunan TOC dari 40% menjadi 80%. Dalam hal ini, Fe^{3+} yang terbentuk selama oksidasi dapat direduksi kembali menjadi Fe^{2+} melalui proses fotoreduksi sehingga siklus katalitik dapat berlangsung secara berkesinambungan. Selain itu, energi cahaya juga berkontribusi terhadap pemecahan H_2O_2 menjadi radikal hidroksil tambahan. Dengan demikian, peningkatan dosis pada photo-Fenton tidak hanya meningkatkan jumlah reaktan awal, tetapi juga memperbesar peluang berlangsungnya reaksi oksidasi berantai secara lebih efektif.

Namun terdapat hal yang perlu digarisbawahi, yaitu peningkatan dosis H_2O_2 yang pada awalnya mampu meningkatkan produksi radikal hidroksil dan mempercepat degradasi polutan, pada dosis tertentu yang berlebih justru dapat memberikan efek negatif. Hal ini disebabkan oleh kemampuan H_2O_2 yang dapat bertindak sebagai penangkap radikal (*radical scavenger*), yaitu mengonsumsi radikal hidroksil yang seharusnya berperan dalam oksidasi senyawa organik [15].

Selanjutnya, untuk proses oksidasi heterogen, penggunaan kombinasi TiO_2 dengan radiasi UV yang berasal dari sinar matahari dapat memberikan peningkatan performa yang lebih tinggi dibandingkan TiO_2 non radiasi. Sistem TiO_2/UV menghasilkan peningkatan efisiensi penurunan TOC dari 35,71% pada dosis 0,25 g/L menjadi 68% pada dosis 1,5 g/L. Peningkatan ini menunjukkan bahwa keberadaan UV mampu meningkatkan aktivasi katalis sehingga menghasilkan jumlah radikal hidroksil yang lebih tinggi.

Meskipun demikian, peningkatan dosis TiO_2 pada sistem TiO_2/UV juga menunjukkan kecenderungan yang mendekati kondisi jenuh, di mana perbedaan efisiensi antara dosis 1,25 g/L dan 1,5 g/L relatif relatif kecil, yaitu hanya meningkat dari 67,14% menjadi 68%. Oleh karena itu, penggunaan dosis katalis yang terlalu tinggi tidak selalu ekonomis karena hanya memberikan peningkatan efisiensi yang minimal.

4. Simpulan

Pada penelitian ini, dilakukan analisa pengaruh radiasi sinar matahari, pH, dan dosis reagen H_2O_2 dan katalis semikonduktor TiO_2 terhadap profil konsentrasi TOC pada limbah cair minyak bumi. Berdasarkan hasil riset, dapat disimpulkan bahwa ketiga faktor tersebut berperan penting dalam menentukan efektivitas proses AOPs. Penggunaan radiasi matahari terbukti mampu meningkatkan kinerja sistem photo-Fenton dan TiO_2/UV melalui peningkatan pembentukan radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) yang berperan dalam degradasi dan mineralisasi senyawa organik kompleks. Selain itu, dosis reagen atau katalis semikonduktor hingga batas optimum juga berpengaruh pada profil penurunan konsentrasi TOC. Secara spesifik, pada penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa proses AOPs berlangsung secara optimum pada rentang pH 4 dan pH 5 dengan waktu reaksi 100 menit dan dosis 1 g/L. Penggunaan dosis berlebih dapat menyebabkan penurunan efektivitas yang mengakibatkan profil nilai efisiensi menjadi stagnan bahkan mengalami penurunan. Dari segi dosis reagen/katalis yang optimal, didapatkan bahwa dosis 1,5 g/L, menghasilkan efisiensi penurunan TOC yaitu masing-masing sebesar 60,57%, 80%, 55,14%, dan 68% untuk Fenton, photo-Fenton, TiO_2 , dan TiO_2/UV . Secara umum, photo-Fenton menunjukkan performa terbaik dibandingkan dengan metode lainnya yang diuji pada penelitian ini karena adanya sinergi antara reaksi Fenton dan proses fotokimia.

Referensi

- [1] S. Martini, S. Afroze, K.A. Roni, Modified eucalyptus bark as a sorbent for simultaneous removal of COD, oil, and Cr (III) from industrial wastewater, *Alexandria Engineering Journal*, 59 (2020) 1637-1648.
- [2] S. Martini, Y.R. Ginting, The integrated photo-catalysis/ultrafiltration membrane for treating raw oily effluents optimized using artificial neural network for fouling prediction, *Desalination and Water Treatment*, 274 (2022) 30-38.
- [3] S. Martini, K. Iksani, Pengolahan Limbah Cair Industri Petroleum Menggunakan Membran Komposit PVDF/Karbon Aktif/ TiO_2 , *Jurnal Inovator*, 8 (2025) 100-104.
- [4] E. Yulwati, Membran komposit polyvinylidene fluoride/titanium dioksida untuk pengolahan limbah cair industri kelapa sawit, *Jurnal Inovator*, 2 (2019) 1-6.

-
- [5] S. Satyam, S. Patra, The evolving landscape of advanced oxidation processes in wastewater treatment: challenges and recent innovations, *Processes*, 13 (2025) 987.
- [6] U. Hübner, S. Spahr, H. Lutze, A. Wieland, S. Rüting, W. Gernjak, J. Wenk, Emerging advanced oxidation processes for water and wastewater treatment—guidance for systematic future research, (2022).
- [7] M.A. Oturan, J.-J. Aaron, Advanced oxidation processes in water/wastewater treatment: principles and applications. A review, *Critical reviews in environmental science and technology*, 44 (2014) 2577-2641.
- [8] Y.A. Ouaisa, N.E.H. Madi, M. Chabani, S. Bouafia-Chergui, Solar Advanced Oxidation Processes for Refinery Wastewater Treatment: Comparative Efficiencies, Modeling, and Feasibility for Cooling Tower Reuse, *Water, Air, & Soil Pollution*, 236 (2025) 639.
- [9] P.K. Pandis, C. Kalogirou, E. Kanellou, C. Vaitis, M.G. Savvidou, G. Sourkouni, A.A. Zorpas, C. Argiris, Key points of advanced oxidation processes (AOPs) for wastewater, organic pollutants and pharmaceutical waste treatment: A mini review, *ChemEngineering*, 6 (2022) 8.
- [10] J.P. Ribeiro, L. Sarinho, M.I. Nunes, Application of life cycle assessment to Fenton processes in wastewater treatment—A review, *Journal of Water Process Engineering*, 57 (2024) 104692.
- [11] M.G. Alalm, A. Tawfik, S. Ookawara, Comparison of solar TiO₂ photocatalysis and solar photo-Fenton for treatment of pesticides industry wastewater: operational conditions, kinetics, and costs, *Journal of Water Process Engineering*, 8 (2015) 55-63.
- [12] W.F. Elmobarak, B.H. Hameed, F. Almomani, A.Z. Abdullah, A review on the treatment of petroleum refinery wastewater using advanced oxidation processes, *Catalysts*, 11 (2021) 782.
- [13] D. Aljuboury, P. Palaniandy, H. Abdul Aziz, S. Feroz, Degradation of total organic carbon (TOC) and chemical oxygen demand (COD) in petroleum wastewater by solar photo-Fenton process, *Glob. Nest J*, 19 (2017) 430-438.
- [14] E.S. Elmolla, M. Chaudhuri, Photocatalytic degradation of amoxicillin, ampicillin and cloxacillin antibiotics in aqueous solution using UV/TiO₂ and UV/H₂O₂/TiO₂ photocatalysis, *Desalination*, 252 (2010) 46-52.
- [15] I. Nitoi, T. Oncescu, P. Oancea, Mechanism and kinetic study for the degradation of lindane by photo-Fenton process, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 19 (2013) 305-309.