



## Efektivitas Metode Hibrida Ozonasi dan Adsorpsi *Fly ash* dalam Menurunkan Parameter Pencemar Organik Kompleks pada Air Lindi

Ayu Aprilia<sup>1\*</sup>, Syafriadi<sup>2</sup>, Nova Eliza Fitri<sup>3</sup>, Vitri Agustin<sup>4</sup>,  
Riska Hasanatun Jannah<sup>5</sup>

<sup>1-5</sup> Jurusan Fisika Universita Lampung, Indonesia

Korespondensi penulis: [ayu.aprilia@fmipa.unila.ac.id](mailto:ayu.aprilia@fmipa.unila.ac.id)\*

**Abstract.** Human activities, from household to industrial operations, generate liquid waste that poses a threat to the environment. Before discharge, liquid waste should be treated to ensure it is safe for release into the environment. This study aims to evaluate the effectiveness of a hybrid ozonation-adsorption method with varying contact times. This study collected leachate samples from the Rajabasa Landfill and used fly ash from the Tarahan Coal-Fired Power Plant as the adsorbent. First, the study used contact times of 20, 40, 60, and 80 minutes for ozonation. Subsequently, the 80-minute sample proceeded to the adsorption stage and was ultimately tested against six parameters. The measured parameters included COD, TSS, TDS, turbidity, UV254, and DO. The results showed that the 80-minute ozonation process significantly reduced TSS, TDS, and DO levels. However, the ozonation process still left intermediate compounds, which were subsequently removed by adsorption. Ultimately, the combination of the two processes yields good results, particularly for COD and UV254. This aligns with the theory that ozonation breaks down complex compounds while the adsorbent absorbs residual pollutants. This hybrid process achieves a 45.47% reduction in COD and an 87.83% reduction in UV254.

**Keywords:** Adsorption; Fly ash; Leachate; Organic compounds; Ozonation

**Abstrak.** Aktivitas manusia dalam lingkup rumah tangga hingga industri menghasilkan limbah cair akan mengancam lingkungan. Limbah cair sebelum dibuang sudah seharusnya mengalami proses olah sehingga aman dilepas ke lingkungan. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi efektivitas metode hibrida ozonasi-adsorpsi dengan variasi kontak. Penelitian ini mengambil sampel air lindi dari TPS Rajabasa dan adsorben menggunakan *fly ash* dari PLTU Tarahan. Pertama penelitian ini menggunakan variasi waktu kontak 20, 40, 60 dan 80 menit untuk proses ozonasi. Selanjutnya sampel 80 menit akan lanjut tahap adsorpsi hingga akhirnya akan diuji dengan 6 parameter. Parameter yang di ukur meliputi COD, TSS, TDS, turbidity, UV254 dan DO. Hasil penelitian menunjukkan proses ozonasi selama 80 menit mampu menurunkan nilai TSS, TDS, dan DO dengan signifikan. Namun, dalam proses ozonasi masih menyisakan intermediate compounds sehingga di sempurkan oleh proses adsorpsi. Pada akhirnya kolaborasi kedua proses memberikan hasil baik, khususnya untuk parameter COD dan UV254. Hal ini sejalan dengan teori bahwa ozonasi berfungsi memecah senyawa kompleks dan adsorben berfungsi menyerap residue polutan. Proses hibrida ini memberikan perbaikan nilai COD sebesar 45,47% dan nilai UV254 sebesar 87,83%.

**Kata kunci:** Adsorpsi; Air lindi; *Fly ash*; Ozonasi; Senyawa organik

### 1. LATAR BELAKANG

Pada saat ini aktivitas manusia dari sektor rumah tangga hingga aktivitas industri meninggalkan dampak terciptanya limbah cair. Peningkatan jumlah limbah cair menjadi tantangan utama dalam pengelolaan kualitas air. Salah satu aspek yang menjadi pencemar air adalah senyawa organik refrakter yang sulit terdegradasi secara biologi. Parameter seperti Chemical Oxygen Demand (COD), Total Suspended Solids (TSS), Total Dissolved Solids (TDS), serta absorbansi UV254 sering digunakan. Parameter tersebut mampu melihat tingkat pencemaran organik dan keberadaan senyawa aromatik dalam air limbah (Miao et al., 2021; Ong, 2018).

Metode pengolahan telah banyak dikembangkan, salah satunya menggunakan metode konvensional seperti koagulasi-flokulasi sering dilakukan. Namun, metode konvensional tidak efektif dalam menghilangkan senyawa organik kompleks secara menyeluruh (Riffat & Husnain, 2022). Teknologi lebih maju seperti *Advanced Oxidation Processes* (AOPs) dapat menjadi alternatif. Teknologi AOPs menjadi alternatif yang menjanjikan karena dapat memproduksi radikal hidroksil ( $\bullet\text{OH}$ ) dengan oksidasi tinggi untuk mendegradasi polutan senyawa organik (Manasfi, 2021).

Metode AOP yang disering dipakai salah satunya adalah ozonasi. Ozonasi memiliki kemampuan dalam mengoksidasi senyawa organik baik melalui rekasi langsung ozon maupun melalui pembentukan radikal hidroksil (Fallah et al., 2023; Manasfi, 2021). Beberapa publikasi telah menunjukkan hasil positif bahwa ozonasi efektif dalam penurunan nilai UV245 dan COD dan meningkatkan biodegradabilitas limbah cair ((Fallah et al., 2023; Rice et al., 2017). Namun, metode ozonasi masih menyisakan *intermediate compounds* dalam pengolahannya yang menjadi kekurangan dalam metode ini (Manasfi, 2021).

Dalam upaya mengurasi kekurangan tersebut, metode ozonasi seringkali digabungkan dengan proses adsorpsi. Adsorpsi umumnya efektif untuk mereduksi senyawa organik residu melalui mekanisme penyerapan pada permukaan adsorben. Kedua metode ini mampu mengisi kekurangan, proses ozonasi memecah senyawa kompleks dan adsorben menghilangkan senyawa yang tidak teradsorpsi sempurna (Karwowska et al., 2021)(9). Penelitian sebelumnya menunjukkan sistem hibrida ozonasi-adsorpsi dapat memperbaiki kualitas air dengan signifikan dibandingkan proses tunggal (Bello & Raman, 2019; Karwowska et al., 2021).

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan mengevaluasi proses ozonasi dengan variasi waktu kontak dan bagaimana efektivitas metode gabungan ozonasi-adsorpsi dalam memperbaiki kualitas air. Penelitian ini mengukur kualitas air dari berbagai parameter. Parameter yang dipakai antara lain COD, TSS, TDS, turbidity, UV254 dan DO. Parameter-parameter ini komprehensif menilai kualitas air dari berbagai sisi. Penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi untuk pengembangan sistem pengolahan limbah cair berbasis proses hibrida yang efektif dan aplikatif. Penelitian berfokus pada kandungan senyawa organik kompleks di air.

## 2. KAJIAN TEORITIS

Pengolahan limbah cair menjadi proses penting menurunkan kandungan pencemar air sebelum air dibuang ke lingkungan. Parameter kualitas air seperti *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Total Suspended Solids* (TSS), *Total Dissolved Solids* (TDS), *Dissolved*

*Oxygen* (DO), kekeruhan (*turbidity*), serta absorbansi UV254 menjadi indikator yang dapat menganalisis kualitas air. COD mengukur jumlah oksigen dalam air yang dibutuhkan untuk mengoksidasi senyawa organik. Sehingga COD menjadi parameter penting untuk melihat senyawa pengotor organik di air (Ong, 2018; Riffat & Husnain, 2022). TSS menjadi parameter yang meninjau kandungan partikel yang menyebabkan kekeruhan dan menghambat penetrasi cahaya. TDS menunjukkan jumlah zat terlarut yang mempengaruhi sifat fisik serta sifat kimia air (Chambers, 2019). Parameter UV254 menjadi indikator untuk melihat senyawa organik aromatic yang memiliki ikatan rangkap terkonjugasi dan umumnya bersifat resisten terhadap degradasi biologis (Sousa et al., 2017).

Teknologi modern yang digunakan dalam pengolahan limbah cair salah satunya adalah Advanced Oxidation Processes (AOPs). AOPS bekerja dengan menghasilkan radikal hidroksil ( $\bullet\text{OH}$ ) dengan potensial oksidasi tinggi sehingga mampu mengoksidasi senyawa organik. Sehingga mengubah senyawa organik lebih sederhana dengan mineralisasi menjadi  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{O}$  (Von Gunten, 2003). Metode AOPS yang populer digunakan dalam pengolahan limbah adalah ozonasi. Ozon ( $\text{O}_3$ ) adalah oksidator kuat yang dapat bereaksi langsung dengan senyawa organik dan bereaksi tidak langsung melalui pembentukan radikal hidroksil (Huang et al., 2019). Reaksi ozon secara langsung berpengaruh pada senyawa ikatan rangkap. Reaksi tidak langsung melalui dekomposisi ozon dalam air yang menghasilkan radikal hidroksil (Esfahani et al., 2024). Proses ini membuat degradasi senyawa organik kompleks menjadi molekul yang lebih sederhana dan mudah terurai.

Penelitian sebelumnya meneliti efektivitas proses ozonasi dipengaruhi beberapa faktor, antara lain waktu kontak, pH, konsentrasi ozon, dan jenis limbah. Waktu kontak yang lebih lama meningkatkan efisiensi degradasi karena membuat interaksi yang lebih intensif antara polutan dengan ozon (Huang et al., 2019). Selanjutnya, proses ozonasi mampu menurunkan kekeruhan melalui oksidasi partikel tersuspensi dan meningkatkan nilai DO akibat dekomposisi ozon menjadi oksigen terlarut (9).

Oksidasi memiliki kekurangan dalam mencapai mineralisasi sempurna sehingga dalam proses masih menyisakan *intermediate compounds*. Senyawa ini mempengaruhi kualitas air dibuktikan dari nilai COD dan parameter lainnya. Sehingga diperlukan kombinasi untuk melengkapi kekurangan metode ini. Metode yang mampu melengkapi teknologi ozonasi adalah adsorpsi. Adsorpsi menjadi metode efektif untuk menghilangkan senyawa dari limbah cair. Adsorben berfungsi menyerap zat terlarut dalam air melalui gaya fisik (Van der Waals) dan melalui interaksi kimia (ikatan kovalen) (Largitte & Pasquier, 2016). Adsorben seperti karbon aktif, zeolite maupun material berbasis limbah seperti *fly ash*. Material ini memanfaatkan luas

permukaan yang besar sehingga mampu mengadsorpsi berbagai polutan. Efektivitas adsorpsi dipengaruhi berbagai factor seperti sifat adsorben, konsentrasi polutan, pH dan waktu kontak (Bello & Raman, 2019).

Proses penggabungan aozonasi dan adsorpsi menjadi pendekatan yang dapat dikembangkan dalam proses pengolahan limbah cair karena saling melengkapi kelemahan. Ozonasi menjadi proses pretreatment yang memecah senyawa organik menjadi molekul lebih kecil. Selanjutnya molekul lebih kecil akan disep oleh adsorben (Karwowska et al., 2021). Kombinasi ini dapat mengurangi kebutuhan dosis ozon dan meningkatkan edisiensi proses dengan ekonomis.

### 3. METODE PENELITIAN

#### Desain Penelitian

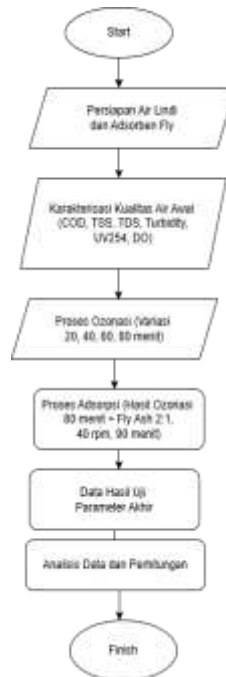
Penelitian ini bertujuan mengevaluasi konerja proses ozonasi dan kombinasi proses ozonasi-adsorpsi dalam memperbaiki kualitas air. Waktu kontak menjadi variabel bebas dalam peneltian ini. Proses adsorpsi setelah proses ozonasi untuk melihat efektivitas proses kombinasi ozonasi-adsorpsi. Uji yang dilakukan dalam penelitian adalah COD, TSS, TDS, DO, turbidity dan UV254 seperti yang ditampilkan di **Tabel 1**. Sampel yang digunakan dalam penelitian adalah air lindi dari Tempat Penampungan Sementara (TPS) Rajabasa. Adsorben yang digunakan adalah *fly ash* dari PLTU Tarahan.

**Tabel 1. Daftar Uji Parameter Penelitian**

No	Uji Parameter	Metode Uji
1	COD	metode refluks tertutup ( <i>dichromate method</i> )
2	TSS	metode gravimetri
3	TDS	metode gravimetri
4	DO	DO meter (elektrokimia)
5	<i>Turbidity</i>	Turbiditimeter (NTU)
6	UV254	Spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 254 nm

## Prosedur Eksperimen

Prosedur penelitian ditampilkan dalam flowchart di



**Gambar 1.** Diagram Alir Penelitian

Proses setelah negumpulan sampel adalah proses ozonasi. Proses ozonasi menggunakan ozone generator dengan sistem aliran kontinu ke dalam reaktor. *Ozone generator* yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada **Gambar 2**. Volume sampel yang digunakan dijaga konstan selama proses.



**Gambar 2.** *Ozone Generator*

Variasi waktu kontak yang ditetapkan dalam penelitian adalah 20, 40, 60 dan 80 menit. Waktu kontak menjadi paramter penting dalam melihat efisiensi oksidasi untuk melihat interaksi ozon dan senyawa organik (6). Reaksi utama yang terjadi selama ozonasi adalah reaksi langsung oleh Ozon ( $O_3$ ) dan reaksi tidak langsung melalui pembentukan radikal hidroksi ( $OH$ ) (7).

Setelah diperoleh sampel dengan waktu ozonasi maksimum, selanjutnya sample akan melalui proses adsorpsi. Adsorben ditambahkan dengan konsentrasi perbandingan limbah dan adosorben masing-masing 2:1. Proses adsorpsi menggunakan pengadukan dengan kecepatan

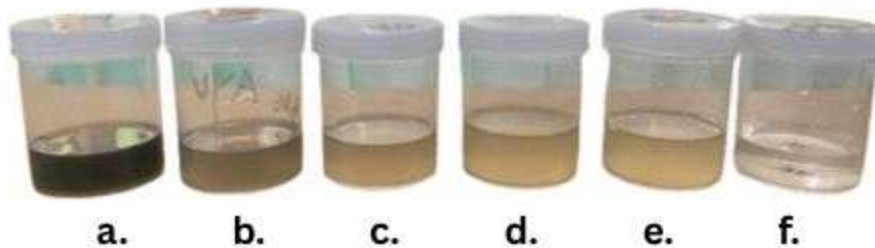
dijaga tetap 40 rpm selama 90 menit. Proses adsorpsi terjadi melalui proses fisik dan kimia yang melibatkan interaksi antara molekul polutan dan permukaan adsorben. Setelah seluruh proses dilalui dan dilakukan uji seperti pada Tabel 1, selanjutnya adalah analisis data. Efisiensi penyisihan masing-masing paramter dihitung dengan Persamaan 1.

$$\eta = \frac{c_0 - c_t}{c_0} \times 100\% \quad (1)$$

Dengan nilai  $c_0$  sebagai nilai parameter awal dan  $c_t$  adalah nilai paramter setelah diberi perlakuan. Persamaan ini mampu meberikan bukti efektivitas proses ozonasi maupun proses gabungan ozonasi-absorpsi.

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

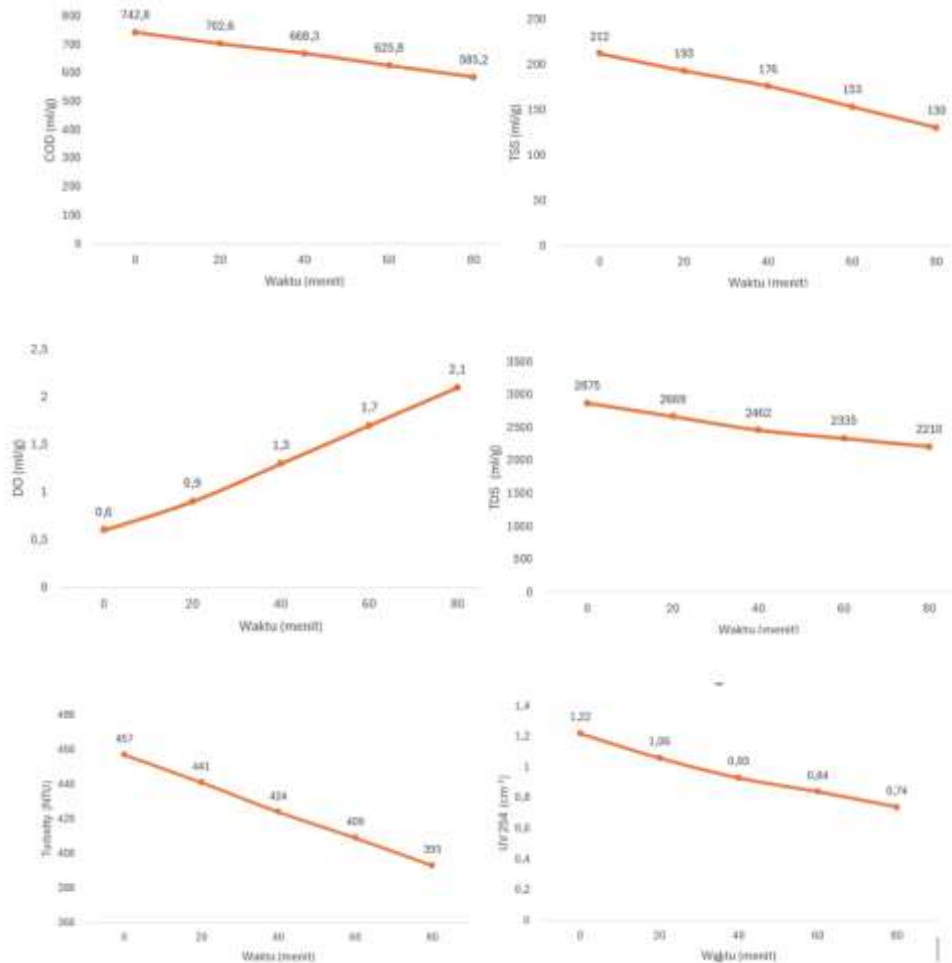
Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, proses ozonasi memberikan efek penurunan terhadap seluruh parameter pencemar seiring peningkatan waktu kontak. Hasil proses ozonasi dan kombinasi ozonasi-adsorben disajikan pada Gambar 3.



**Gambar 3.** Sampel Sebelum dan Setelah (a.ozon 20 menit, b.ozon 40menit, c.ozon 60menit, d.ozon 80menit, e.ditambah adsorben)

Setelah proses ozonasi dan adsorben selesai selanjutnya adalah uji parameter yang hasilnya disajikan pada **Gambar 5**.

Parameter TSS mengalami penurunan masing-masing dari 212 mg/L menjadi 130 mg/L seiring dengan penurunan nilai turbidity dari 457 NTU menjadi 393 NTU selama 80 menit. Hasil penurunan nilai TSS dan turbidity menjadi pertanda adanya proses degradasi partikel menjadi ukuran lebih kecil. Nilai TDS menurun dari 2875 mg/L menjadi 2210 mg/L, hal ini menunjukkan bahwa proses ozonasi juga mempengaruhi pengurnagan zat terlarut dalam sistem akitar degradasai partikel. Parameter DO mengalami peningkatan dari 0,6 mg/L menjadi 2,1 mg/L dalam proses ozonasi. Peningkatan yang timbul akibat dekomposisi ozon menjadi oksigen terlarut. Kondisi ini sesuai dengan teori bahwa ozonasi mampu meningkatkan kandungan oksigen akibat perubahan ozon menjadi oksigen.



**Gambar 5.** Hasil Uji 6 Paramater selama Proses Ozonasi 80 menit

Walaupun proses ozonasi menunjukkan hasil perbaikan kualitas air, tetapi pada parameter COD dan UV245 masih memperoleh hasil yang masih tinggi. Nilai COD mengalami penurunan dari 742,8 mg/L menjadi 585,2 mg/L tapi angka ini masih tergolong tinggi. Nilai UV 254 juga mengalami perbaikan akibat proses ozon sejalan dengan fakta mampu memutus ikatan rangkap terkonjugasi. Fakta terhadap hasil COD dan UV 254 membuktikan bahwa proses ozonasi masih menghasilkan senyawa intermediate compounds.

Tahap selanjutnya adalah proses adsorpsi, proses ini berhasil memberikan peningkatan efisiensi yang signifikan seperti yang ditampilkan pada **Tabel 2**. Parameter COD, TSS, TDS, turbidty mengalami hasil positif. Penurunan signifikan terjadi pada hasil UV254 yang tajam, hal ini sebagai bukti bahwa senyawa aromatik efektif di degradasi melalui proses adsorpsi. Hasil penelitian ini membuktikan adsorpsi sangat baik untuk menghilangkan senyawa tidak terdegradasi setelah proses ozonasi. Peningkatan nilai DO menjadi indikasi positif bahwa kombinasi kedua proses mampu meningkatkan kualitas air secara keseluruhan. Kombinasi kedua proses mengonfirmasi ozon mampu menjadi pretreatment untuk mendegradasi partikel

menjadi ukuran lebih kecil. Selanjutnya, proses adsorpsi berfungsi sebagai tahap pemurnian akhir. Sehingga, secara keseluruhan kombinasi ozonasi-adsorpsi memberikan hasil lebih optimal dalam menurunkan berbagai parameter pencemar limbah cair. Dalam hal ini, adsorben lebih efektif untuk menurunkan nilai *turbidity* dan UV254.

**Tabel 2.** Hasil Uji Parameter Air dengan Adsorben

Proses	Nilai Uji Parameter					
	COD (mg/L)	TSS (mg/L)	DO (mg/L)	TDS (mg/L)	Turbidity (NTU)	UV254 (cm <sup>-1</sup> )
Ozonasi 80menit	585,2	130	2,1	2210	393	0,74
80menit + adsorben	319,1	62	3,5	1149	182	0,09
Efisiensi	45,47%	52,30%	40%	48,0%	53,68%	87,83%

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini memberikan hasil bawah kombinasi proses ozonasi dan adsorpsi efektif meningkatkan kualitas air limbah secara signifikan dibanding metode tunggal. Selama 80 menit proses ozonasi berhasil menurunkan kadar TSS dari 212 mg/L menjadi 130 mg/L, TDS dari 2875 mg/L menjadi 2210 mg/L. Peningkatan nilai DO juga tampak dari 0,6 mg/L menjadi 2,1 mg/L akibat proses dekomposisi ozon menjadi oksigen selama proses ozonasi. Walaupun hasil ozonasi telah baik tetapi masih terbentuk senyawa *intermediate compounds* terbukti dari nilai COD masih 585,2 mg/L dan nilai UV254 masih relatif tinggi. Kelemahan proses ozonasi dilengkapi dengan proses adsorpsi, dimana memiliki efisiensi menurunkan nilai COD sebesar 45,47% dan nilai UV254 sebesar 87,83%. Saran kedepannya adalah melakukan analisis instrumen untuk mengamati morfologi permukaan adsorben.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Kami ucapkan terimakasih kepada Lab Workshop Jurusan Fisika Universitas Lampung yang telah memberikan fasilitas tempat dan alat selama proses penelitian.

**DAFTAR REFERENSI**

- Bello, M. M., & Raman, A. A. A. (2019). Synergy of adsorption and advanced oxidation processes in recalcitrant wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, 17(2), 1125–1142. <https://doi.org/10.1016/j.chemd.2016.02.006>
- Chambers, P. (2019). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Scientific e-Resources.
- Esfahani, K. N., Santoro, D., Pérez-Moya, M., & Graells, M. (2024). Mathematical modeling of ozone decomposition processes in wastewater treatment: A lumped kinetic approach with initial ozone demand. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(6), 114893. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114893>
- Fallah, N., Bloise, E., Santoro, D., & Mele, G. (2023). State of the art and perspectives in catalytic ozonation for removal of organic pollutants in water: Influence of process and operational parameters. *Catalysts*, 13(2), 324. <https://doi.org/10.3390/catal13020324>
- Huang, Y. Q., Cai, D. S., Li, M. Q., Wu, T. H., Wu, P. G., & Li, L. (2019). Influence of changes in dissolved oxygen content on fish behavioral trajectories during water eutrophication. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(1).
- Karwowska, B., Sparczyńska, E., & Dąbrowska, L. (2021). Water treatment in hybrid connection of coagulation, ozonation, UV irradiation and adsorption processes. *Water*, 13(13), 1748. <https://doi.org/10.3390/w13131748>
- Largitte, L., & Pasquier, R. (2016). A review of the kinetics adsorption models and their application to the adsorption of lead by an activated carbon. *Chemical Engineering Research and Design*, 109, 495–504. <https://doi.org/10.1016/j.chemd.2016.02.006>
- Manasfi, T. (2021). Ozonation in drinking water treatment: An overview of general and practical aspects, mechanisms, kinetics, and byproduct formation. In *Comprehensive Analytical Chemistry* (Vol. 92, pp. 85–116). <https://doi.org/10.1016/bs.coac.2020.12.002>
- Miao, S., Lyu, H., Xu, J., Bi, S., Guo, H., Mu, M., Lei, S., Zeng, S., & Liu, H. (2021). Characteristics of the chromophoric dissolved organic matter of urban black-odor rivers using fluorescence and UV–visible spectroscopy. *Environmental Pollution*, 268, 115763. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115763>
- Ong, S. K. (2018). Wastewater engineering. In *Handbook of environmental engineering* (pp. 351–373). <https://doi.org/10.1002/9781119307761.ch11>
- Rice, E. W., Baird, R. B., Eaton, A. D., & Clesceri, L. S. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23rd ed.). American Public Health Association.
- Riffat, R., & Husnain, T. (2022). *Fundamentals of wastewater treatment and engineering*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003185345>

- Sousa, J. M., Macedo, G., Pedrosa, M., Becerra-Castro, C., Castro-Silva, S., Pereira, M. F. R., Silva, A. M. T., Nunes, O. C., & Manaia, C. M. (2017). Ozonation and UV254 nm radiation for the removal of microorganisms and antibiotic resistance genes from urban wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 323, 434–441. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.03.075>
- Von Gunten, U. (2003). Ozonation of drinking water: Part I. Oxidation kinetics and product formation. *Water Research*, 37(7), 1443–1467. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00457-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00457-8)