

ARTICLE REVIEW: TINJAUAN TEKNOLOGI PENGOLAHAN LIMBAH CAIR FARMASI ANTARA EFISIENSI DAN DAMPAK LINGKUNGAN

Alya Anggryanti^{1*}, Nor Tiara Sari¹, Nor Latifah²

¹⁻²Mahasiswa Program Studi S1 Farmasi, Universitas Muhammadiyah Banjarmasin

³Dosen S1 Farmasi Program Studi S1 Farmasi, Universitas Muhammadiyah Banjarmasin

*Korespondensi: alyaanggryanti@email.com

Diterima: 05 Juni 2025

Disetujui: 16 Juni 2025

Dipublikasikan: 19 Juni 2025

ABSTRAK. Industri farmasi berperan penting dalam meningkatkan kesehatan masyarakat, namun juga menjadi sumber pencemaran lingkungan melalui limbah cair yang mengandung senyawa aktif farmasi (PhACs). Senyawa ini mencakup antibiotik, hormon, dan bahan kimia lain yang bersifat toksik, persisten, serta sulit terurai di lingkungan perairan. Instalasi pengolahan air limbah (IPAL) konvensional umumnya belum mampu menghilangkan senyawa ini secara efektif, sehingga residu farmasi masih ditemukan di air permukaan, tanah, dan bahkan air minum. Hal ini menimbulkan ancaman ekologis serta memicu resistensi antimikroba (AMR). Berbagai teknologi pengolahan telah dikembangkan, seperti kombinasi proses biologis *anaerob-aerob*, *fotokatalisis*, *elektro-Fenton*, dan *adsorpsi*, namun masing-masing memiliki keterbatasan teknis dan biaya. Pendekatan inovatif melalui valorisasi limbah menjadi energi atau bahan baku sekunder juga mulai diperkenalkan sebagai solusi berkelanjutan. Di Indonesia, keterbatasan regulasi dan teknologi menjadi tantangan utama dalam pengelolaan limbah cair farmasi. Kajian ini bertujuan meninjau teknologi pengolahan limbah cair farmasi secara global guna mendorong pengembangan sistem yang tepat guna, ramah lingkungan, dan sesuai diterapkan di Indonesia.

Kata kunci: Limbah cair farmasi, Senyawa aktif farmasi, Pengolahan limbah, Resistensi antimikroba, Teknologi berkelanjutan

ABSTRACT. The pharmaceutical industry plays an important role in improving public health, but it is also a source of environmental pollution through liquid waste containing active pharmaceutical compounds (PhACs). These compounds include antibiotics, hormones, and other chemicals that are toxic, persistent, and difficult to decompose in aquatic environments. Conventional wastewater treatment plants (WWTPs) are generally unable to remove these compounds effectively, so pharmaceutical residues are still found in the air, soil, and even drinking water. This poses an ecological threat and triggers antimicrobial resistance (AMR). Various treatment technologies have been developed, such as a combination of anaerobic-aerobic biological processes, photocatalysis, electro-Fenton, and adsorption, but each has technical and cost limitations. Innovative approaches through waste valorization into energy or secondary raw materials have also begun to be introduced as sustainable solutions. In Indonesia, regulatory and technological limitations are major challenges in the management of pharmaceutical liquid waste. This study aims to review pharmaceutical liquid waste treatment technologies globally in order to encourage the development of systems that are appropriate, environmentally friendly, and suitable for implementation in Indonesia.

Keywords: Pharmaceutical liquid waste, Active pharmaceutical compounds, Waste treatment, Antimicrobial resistance, Sustainable technology

PENDAHULUAN

Industri farmasi merupakan salah satu sektor yang memberikan kontribusi besar dalam peningkatan kesehatan masyarakat. Namun di balik manfaatnya, proses produksi farmasi menghasilkan limbah cair yang mengandung berbagai senyawa aktif farmasi (*pharmaceutical active compounds/PhACs*), seperti antibiotik, analgesik,

hormon sintetis, dan zat kimia lain yang bersifat toksik serta persisten di lingkungan (Razansyah & Syafila, 2022). Senyawa ini dirancang untuk tetap aktif dalam tubuh manusia, sehingga saat terbuang ke sistem air limbah, mereka cenderung sulit terurai secara alami dan dapat mengganggu keseimbangan ekosistem perairan.

Limbah cair farmasi merupakan salah satu sumber pencemar lingkungan yang signifikan, terutama karena kandungan senyawa aktif farmasi yang bersifat toksik dan sulit terdegradasi. Senyawa-senyawa ini, termasuk antibiotik, hormon, dan zat aktif lainnya, dapat menyebabkan dampak negatif terhadap ekosistem perairan dan kesehatan manusia apabila tidak diolah dengan baik (Majumder *et al.*, 2019). Pengolahan limbah cair farmasi memerlukan pendekatan yang komprehensif untuk mengurangi risiko pencemaran lingkungan (Razansyah & Syafila, 2022).

Masalah ini diperparah dengan kenyataan bahwa sebagian besar instalasi pengolahan air limbah (IPAL), baik domestik maupun industri, belum dirancang untuk menghilangkan senyawa farmasi secara efektif (Frascaroli *et al.*, 2021). Akibatnya, residu farmasi masih banyak ditemukan di air permukaan, air tanah, bahkan air minum. Senyawa ini tidak hanya bersifat toksik bagi biota akuatik, tetapi juga berkontribusi pada munculnya fenomena resistensi antimikroba (*antimicrobial resistance/AMR*), yang kini menjadi salah satu ancaman serius bagi kesehatan global.

Berbagai teknologi telah dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi pengolahan limbah cair farmasi, seperti kombinasi proses biologis *anaerob-aerob*, *koagulasi-flokulasi*, *fotokatalisis*, *elektro-Fenton*, dan *adsorpsi* (Crisnaningtyas & Vistanty, 2020; Date & Jaspal, 2023). Meskipun demikian, setiap teknologi memiliki kelebihan dan keterbatasan masing-masing. Proses biologis, misalnya, umumnya lebih ekonomis tetapi kurang efektif dalam menghilangkan senyawa persisten. Sebaliknya, metode fisikokimia cenderung lebih efisien, tetapi memiliki biaya operasional yang tinggi dan dapat menghasilkan produk samping yang berbahaya.

Selain itu, strategi inovatif seperti valorisasi limbah farmasi menjadi energi atau bahan baku sekunder mulai diperkenalkan sebagai pendekatan yang berkelanjutan (Pech-Rodríguez *et al.*, 2024). Pendekatan ini tidak hanya bertujuan mengurangi pencemaran lingkungan, tetapi juga mendukung konsep ekonomi sirkular dengan memanfaatkan limbah sebagai sumber daya.

Di Indonesia sendiri, tantangan terbesar adalah minimnya regulasi khusus yang mengatur batas ambang senyawa farmasi dalam limbah cair, serta kurangnya penerapan teknologi pengolahan yang sesuai. Hal ini menyebabkan banyak fasilitas pelayanan kesehatan dan industri farmasi belum optimal dalam mengelola limbah cairnya (Razansyah & Syafila, 2022).

Oleh karena itu, kajian ini penting dilakukan untuk meninjau berbagai teknologi pengolahan limbah cair farmasi yang telah diterapkan secara global, serta menilai efisiensi dan dampaknya terhadap lingkungan. Dengan demikian, diharapkan dapat menjadi dasar untuk pengembangan teknologi yang lebih tepat guna, ramah lingkungan, dan relevan untuk diterapkan di Indonesia.

METODE

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah kajian naratif, di mana pengumpulan data dilakukan melalui telaah literatur yang diperoleh dari basis data elektronik seperti *PubMed*, *ScienceDirect*, *MDPI*, *ACS Publications*, dan *Google Scholar*. Kata kunci yang digunakan dalam proses penelusuran mencakup: “*pharmaceutical wastewater treatment*”, “*antimicrobial resistance*”, “*advanced oxidation process*”, “*anaerobic-aerobic treatment*”, dan “*pharmaceutical sludge valorization*”.

Kriteria inklusi dalam kajian ini adalah artikel ilmiah yang dipublikasikan dalam 5 tahun terakhir (2020–2025), tersedia dalam teks lengkap (*full text*), relevan dengan topik efisiensi teknologi pengolahan limbah cair farmasi dan dampaknya terhadap lingkungan, serta telah melalui proses penelaahan sejawat (*peer-reviewed*). Artikel yang dipilih juga diseleksi berdasarkan kesesuaian judul, abstrak, dan variabel kajian dengan fokus penelitian.

Sementara itu, artikel yang tidak dapat diakses secara penuh, artikel yang bersifat duplikat, serta publikasi yang tidak menyediakan informasi teknis secara rinci atau tidak memiliki landasan ilmiah yang jelas termasuk ke dalam kriteria eksklusi.

HASIL

Berdasarkan hasil kajian dari artikel yang terdapat pada Tabel 1, dapat diketahui bahwa berbagai teknologi telah digunakan dalam pengolahan limbah cair farmasi, di antaranya kombinasi *anaerob-aerob*, *koagulasi*, *adsorpsi*, hingga metode *Electro-Fenton* dan *pirolisis*. Setiap teknologi menunjukkan efisiensi berbeda dalam

menurunkan kadar senyawa aktif seperti antibiotik, hormon, dan zat toksik lainnya. Proses *Electro-Fenton* tercatat paling efektif dalam degradasi senyawa, sedangkan *pirolisis* menawarkan nilai tambah dengan mengubah limbah menjadi *biochar*. Namun, tantangan seperti efisiensi energi dan biaya masih menjadi pertimbangan dalam penerapan skala besar.

Tabel 1. Hasil Penelitian Terkait Teknologi Pengolahan Limbah Cair Farmasi dan Dampaknya terhadap Lingkungan

No	Judul Jurnal	Hasil Penelitian
1.	Tinjauan terhadap Alternatif Sistem Pengolahan Senyawa Aktif Farmasi pada Limbah Cair Medis	Senyawa aktif farmasi (PhACs) dalam limbah cair rumah sakit sangat berbahaya karena tidak mudah terurai secara biologis, tetap berada di lingkungan dalam jangka waktu lama, dan dapat berdampak fisiologis bahkan pada konsentrasi rendah. Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) konvensional belum mampu menghilangkan PhACs secara efektif. Dari berbagai metode pengolahan, <i>Advanced Oxidation Process</i> (AOP) berbasis ozon ditemukan sebagai metode yang paling efisien, dengan rata-rata efisiensi degradasi sekitar 90% dan waktu pengolahan relatif singkat (Razansyah & Syafila, 2022).
2.	Pengolahan limbah Cair industri farmasi formulasi dengan metode <i>anaerob-aerob</i> dan <i>anaerob-koagulasi</i>	Mengkaji efektivitas metode <i>anaerob-aerob</i> dan <i>anaerob-koagulasi</i> dalam mengolah limbah cair farmasi. Proses <i>anaerob</i> menggunakan reaktor UASB mampu mengurangi COD hingga 74%. Kombinasi <i>anaerob-aerob</i> terbukti paling efektif dengan efisiensi penurunan COD total mencapai 97,78%, sementara kombinasi <i>anaerob-koagulasi-flokulasi</i> mencapai 72,53%. Aluminium sulfat adalah koagulan paling efektif. Teknologi ini penting untuk mengurangi pencemaran lingkungan, namun keberlanjutan jangka panjang perlu dipertimbangkan (Crisnaningtyas & Vistanty, 2020).
3.	<i>Next-generation hybrid technologies for the treatment of pharmaceutical industry effluents</i>	Teknologi pengolahan limbah cair farmasi berbeda efisiensi; AOP paling efektif tapi mahal dan berisiko menghasilkan produk samping beracun. <i>Adsorpsi</i> , membran, dan metode biologis memiliki kelebihan dan keterbatasan masing-masing. Sistem <i>hybrid</i> menawarkan solusi optimal antara efisiensi dan dampak lingkungan (Date & Jaspal, 2023).
4.	<i>Electro-Fenton-Based Technologies for Selectively Degrading Antibiotics in Aqueous Media</i>	Proses Electro-Fenton efektif mendegradasi residu antibiotik hingga 95% dalam waktu singkat. Namun, biaya energi tinggi menjadi kendala utama dalam implementasi skala industri (Frascaroli <i>et al.</i> , 2021).
5.	<i>Pharmaceutical Wastewater and Sludge Valorization: A Review on Innovative Strategies for Energy Recovery and Waste Treatment</i>	Pelepasan limbah cair farmasi yang mengandung PPCPs menyebabkan dampak lingkungan serius seperti resistensi antimikroba, toksisitas akuatik, dan pencemaran air. Efisiensi pengolahan melalui strategi inovatif yang mencakup teknologi canggih (misal, <i>elektro-Fenton</i>), pemulihan energi/valorisasi limbah, serta pencegahan polusi di sumbernya, demi pengelolaan yang berkelanjutan (Pech-Rodríguez <i>et al.</i> , 2024).

PEMBAHASAN

Pada artikel “Tantangan dan Peluang Pengolahan Limbah Cair Farmasi di Indonesia” permasalahan senyawa aktif farmasi (PhACs) yang banyak ditemukan dalam limbah cair rumah sakit

dan berpotensi mencemari lingkungan karena sulit terurai secara alami serta dapat berdampak negatif pada kesehatan manusia dan ekosistem meskipun dalam kadar rendah. Instalasi pengolahan air limbah (IPAL) konvensional tidak cukup efektif

dalam menghilangkan senyawa ini karena umumnya hanya dirancang untuk mengolah limbah domestik biasa. Oleh karena itu, dibutuhkan sistem pengolahan lanjutan yang lebih spesifik. Penelitian ini meninjau berbagai teknologi alternatif seperti filtrasi membran, *adsorpsi*, dan yang paling menonjol adalah *advanced oxidation process* (AOP) berbasis ozon, yang terbukti memiliki efisiensi tinggi dalam mendegradasi PhACs. Meskipun beberapa metode memiliki keterbatasan seperti biaya tinggi atau menghasilkan residu berbahaya, AOP dianggap paling menjanjikan karena mampu menguraikan berbagai jenis senyawa dengan waktu pengolahan yang relatif cepat dan efisiensi tinggi. Dengan demikian, jurnal ini menekankan pentingnya pemilihan teknologi yang tepat agar limbah cair rumah sakit dapat diolah secara efisien dan aman bagi lingkungan (Wang & Wang, 2018).

Pada artikel “Pengolahan limbah air industri farmasi formulasi dengan metode *anaerob-aerob* dan *anaerob-koagulasi*” mengevaluasi efektivitas metode *anaerob-aerob* dan *anaerob-koagulasi* untuk pengolahan limbah cair farmasi, dengan fokus pada efisiensi pengurangan polutan organik. Proses *anaerob*, menggunakan reaktor UASB, berhasil mengurangi COD hingga 74%. Ketika dikombinasikan dengan proses *aerob*, efisiensi penghilangan polutan meningkat, menghasilkan air limbah yang memenuhi standar kualitas. Metode *koagulasi-flokulasi* juga menjanjikan untuk menghilangkan padatan tersuspensi dan beberapa komponen organik yang sulit terurai secara biologis. Penerapan teknologi ini secara signifikan mengurangi beban pencemar pada air buangan, sehingga melindungi lingkungan akuatik dan kesehatan masyarakat, namun pemilihan metode harus mempertimbangkan keberlanjutan jangka panjang (Crisnaningtyas & Vistanty, 2020).

Pada artikel “*Next-generation hybrid technologies for the treatment of pharmaceutical industry effluents*” Berbagai teknologi pengolahan limbah cair farmasi memiliki tingkat efisiensi dan dampak lingkungan yang berbeda. *Advanced Oxidation Processes* (AOP) paling efektif dalam menguraikan senyawa farmasi kompleks, tetapi biaya tinggi dan potensi produk samping toksik

menjadi kendala. *Adsorpsi* karbon aktif efektif menghilangkan kontaminan, namun hanya memindahkan polutan tanpa menghancurkannya, sehingga limbah padat perlu pengelolaan lanjut. Teknologi membran seperti nanofiltrasi dan *reverse osmosis* mampu menyaring senyawa dengan baik, namun konsumsi energi dan pengelolaan limbah konsentrat menjadi perhatian. Metode biologis ramah lingkungan dan ekonomis, tetapi kurang efektif untuk senyawa farmasi yang tahan degradasi. Pendekatan sistem *hybrid* yang menggabungkan beberapa teknologi menjadi solusi terbaik untuk meningkatkan efisiensi sekaligus meminimalkan dampak lingkungan. Selain itu, analisis risiko ekotoksikologi penting untuk memastikan produk pengolahan tidak menimbulkan bahaya baru bagi ekosistem (Date & Jaspal, 2023).

Pada artikel “*Electro-Fenton-Based Technologies for Selectively Degrading Antibiotics in Aqueous Media*” teknologi *elektro-Fenton* menawarkan solusi yang menjanjikan untuk pengolahan limbah cair farmasi, khususnya dalam mendegradasi antibiotik dalam media akuatik. Efisiensi teknologi berbasis *elektro-Fenton* untuk degradasi selektif antibiotik. Teknologi ini memanfaatkan reaksi kimia yang menghasilkan radikal hidroksil kuat yang mampu mengoksidasi senyawa organik kompleks menjadi produk yang lebih sederhana dan tidak berbahaya. Aspek efisiensi terletak pada kemampuan *elektro-Fenton* untuk secara efektif memecah struktur molekul antibiotik yang resisten terhadap metode pengolahan konvensional, sehingga mengurangi toksisitas dan dampak lingkungan dari residu farmasi. Dari sisi dampak lingkungan, pengolahan dengan *elektro-Fenton* berpotensi mengurangi beban pencemaran antibiotik di perairan, yang sangat penting mengingat risiko perkembangan resistensi antimikroba dan gangguan ekosistem akuatik. Kemampuan degradasi selektifnya berarti intervensi yang lebih terfokus pada kontaminan spesifik, meminimalkan pembentukan produk sampingan yang tidak diinginkan. Namun, seperti teknologi pengolahan lainnya, perlu dipertimbangkan konsumsi energi dan manajemen limbah yang dihasilkan dari proses *elektro-Fenton* itu sendiri, seperti lumpur yang mungkin

mengandung sisa-sisa elektrolit atau produk degradasi parsial. Oleh karena itu, evaluasi menyeluruh terhadap efisiensi degradasi, potensi dampak lingkungan, dan keberlanjutan operasional menjadi krusial dalam penerapan teknologi *elektro-Fenton* untuk pengolahan limbah cair farmasi (Goulart *et al.*, 2022).

Pada artikel "*Pharmaceutical Wastewater and Sludge Valorization: A Review on Innovative Strategies for Energy Recovery and Waste Treatment*" komposisi limbah yang sangat beragam dan seringkali mengandung konsentrasi tinggi senyawa aktif farmasi (PPCPs) seperti antibiotik, hormon, analgesik, dan berbagai bahan kimia lainnya. Dampak lingkungan dari limbah cair farmasi bersifat multifaset. Salah satu yang paling mengkhawatirkan adalah kontribusinya terhadap resistensi antimikroba. Pengolahan fotokatalitik air limbah yang mengandung farmasi dan produk perawatan pribadi, menggarisbawahi tantangan yang ditimbulkan oleh keberadaan senyawa-senyawa ini (Wang *et al.*, 2022). Lebih jauh lagi, pencemaran oleh limbah farmasi juga mengancam kualitas air tanah dan sumber air minum karena banyak fasilitas pengolahan air minum konvensional tidak dirancang untuk menghilangkan PPCPs secara efektif, sehingga memungkinkan senyawa-senyawa ini masuk ke dalam pasokan air bersih, menimbulkan risiko kesehatan jangka panjang. Ada beberapa strategi utama yang saling melengkapi. Pertama, penggunaan teknologi pengolahan canggih sangat diperlukan untuk mengatasi kompleksitas PPCPs; metode seperti proses oksidasi lanjutan (AOPs), termasuk *elektro-Fenton*, filtrasi membran, dan *adsorpsi*, semakin banyak diteliti dan diterapkan karena kemampuannya mendegradasi struktur molekul yang kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana dan kurang berbahaya. Kedua, pemulihan energi dari limbah merupakan inovasi penting yang mengubah limbah cair dan lumpur farmasi menjadi sumber energi, misalnya melalui digesti anaerobik yang menghasilkan biogas. Reformasi fase akuatik untuk valorisasi aliran air limbah adalah kunci untuk mencapai ekonomi sirkular, mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, dan menekan biaya pengolahan (Zoppi *et al.*, 2022). Ketiga, selain energi, beberapa

komponen dalam limbah farmasi mungkin dapat diekstraksi atau diubah menjadi produk bernilai tinggi lainnya, seperti pupuk dari lumpur yang diolah, yang tidak hanya mengurangi jumlah limbah yang dibuang tetapi juga menciptakan aliran pendapatan baru. Terakhir, efisiensi tertinggi dalam manajemen limbah adalah melalui pencegahan, di mana strategi produksi bersih di industri farmasi bertujuan untuk mengurangi volume dan toksisitas limbah yang dihasilkan sejak awal proses produksi, melibatkan optimasi proses, penggantian bahan baku berbahaya, dan daur ulang internal (Li *et al.*, 2022).

SIMPULAN

Limbah farmasi adalah masalah serius karena senyawa toksiknya memicu resistensi antimikroba. IPAL konvensional tidak efektif. Teknologi lanjutan seperti proses biologis kombinasi, AOP, *elektro-Fenton* dan *adsorpsi* menjanjikan efisiensi lebih tinggi, meski ada batasan biaya. Valorisasi limbah juga menjanjikan. Pemilihan teknologi tepat, dukungan regulasi dan sistem hibrida krusial untuk mengatasi masalah ini di Indonesia.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dan kontribusi dalam penyusunan artikel ini, khususnya kepada dosen pembimbing, rekan sejawat, serta Universitas Muhammadiyah Banjarmasin atas fasilitas dan akses referensi yang diberikan selama proses penulisan berlangsung.

REFERENSI

- Crisnaningtyas, F., & Vistanty, H. (2020). Pengolahan limbah cair industri farmasi formulasi dengan metode anaerob-aerob dan anaerob-koagulasi. *Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri*, 11(2), 45–52.
<https://doi.org/10.22435/jrtppi.v11i2.3790>
- Date, M., & Jaspal, D. (2023). Pharmaceutical wastewater remediation: A review of treatment techniques. *Journal of Environmental Management*, 351, 119708.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119708>
- Frascaroli, G., Panizza, M., & Oturan, M. A.

- (2021). Electro-Fenton-based technologies for selectively degrading antibiotics in aqueous media. *Environmental Research*, 199, 111367. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111367>
- Goulart, L. A., Moratalla, A., Cañizares, P., Lanza, M. R. V., Sáez, C., & Rodrigo, M. A. (2022). High levofloxacin removal in the treatment of synthetic human urine using Ti/MMO/ZnO photo-electrocatalyst. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(2), 107317.
- Li, M., Huang, S., Yu, X., Zhao, W., Lyu, S., & Sui, Q. (2022). Discharge of pharmaceuticals from a municipal solid waste transfer station: Overlooked influence on the contamination of pharmaceuticals in surface waters. *Science of the Total Environment*, 839, 156317.
- Majumder, A., Gupta, B., & Gupta, A. K. (2019). Pharmaceutically active compounds in aqueous environment: A status, toxicity and insights of remediation. *Environmental Research*, 176, 108542. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108542>
- Pech-Rodríguez, W. J., González-González, R. B., Díaz-Ramírez, M., & Razo-Flores, E. (2024). Pharmaceutical wastewater and sludge valorization: A review on innovative strategies for energy recovery and waste treatment. *Energies*, 17(20), 5043. <https://doi.org/10.3390/en17205043>
- Razansyah, F., & Syafila, M. (2022). *Tinjauan terhadap alternatif sistem pengolahan senyawa aktif farmasi pada limbah cair medis*. Universitas Sebelas Maret. https://spada.uns.ac.id/pluginfile.php/872429/mod_forum/attachment/811253/Kelompok%206_Industri%20Farmasi.pdf?forcedownload=1
- Wang, J., & Wang, S. (2018). Activation of persulfate (PS) and peroxymonosulfate (PMS) and application for the degradation of emerging contaminants. *Chemical Engineering Journal*, 334, 1502–1517. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.11.059>
- Wang, K., Shao, X., Zhang, K., Wang, J., Wu, X., & Wang, H. (2022). 0D/3D Bi3TaO7/ZnIn2S4 heterojunction photocatalyst towards degradation of antibiotics coupled with simultaneous H2 evolution: In situ irradiated XPS investigation and S-scheme mechanism insight. *Applied Surface Science*, 596, 153444.
- Zoppi, G., Pipitone, G., Pirone, R., & Bensaid, S. (2022). Aqueous phase reforming process for the valorization of wastewater streams: Application to different industrial scenarios. *Catalysis Today*, 387, 224–236.