

**OPTIMASI PROSES ADSORPSI FOTOKATALITIK
ZAT WARNA RBBR PADA KOMPOSIT
ZnO/KARBON AKTIF MELALUI PENDEKATAN
ALGORITMA PYTHON**

YENI NOVITA SARI

94224004



TESIS

**Untuk memperoleh gelar Magister dalam bidang Ilmu Teknik Kimia pada Universitas
Muhammadiyah Palembang
Dengan wibawa Rektor Universitas Muhammadiyah Palembang
Dipertahankan pada tanggal 14 Maret 2026 Di Universitas Muhammadiyah Palembang**

**PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA PROGRAM
PASCASARJANA
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH PALEMBANG
2026**

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

**OPTIMASI PROSES ADSORPSI FOTOKATALITIK ZAT WARNA RBBR
PADA KOMPOSIT ZnO/KARBON AKTIF MELALUI PENDEKATAN
ALGORITMA PYTHON**

TESIS

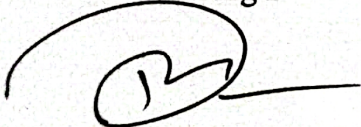
Nama : Yeni Novita Sari

NIM : 94224004

Diterima dan disahkan

Pada tanggal Mei 2026

Pembimbing I



Dian Kharismadewi, S.T., M.T., Ph.D.
NIDN. 0222048201

Pembimbing II



Sri Martini, S.T., M.T., Ph.D.
NIDN. 0001117901

Mengetahui,

Direktur Program Pascasarjana



Dr. Ir. Mukhtarudin Muchsiri, M.P.
NIDN. 0212016802

Ketua Program Studi



Dian Kharismadewi, S.T., M.T., Ph.D.
NIDN. 0222048201

LEMBAR PERSETUJUAN TIM PENGUJI

**OPTIMASI PROSES ADSORPSI FOTOKATALITIK ZAT WARNA RBBR
PADA KOMPOSIT ZnO/KARBON AKTIF MELALUI PENDEKATAN
ALGORITMA PYTHON**

TESIS

Nama : Yeni Novita Sari

NIM : 94224004

**Telah dipertahankan di hadapan Dewan Penguji Tesis Program Studi
Magister Teknik Kimia pada tanggal 14 Maret 2026**

Ketua



Dian Kharismadewi, S.T., M.T., Ph.D.

NIDN. 0222048201

Sekretaris



Sri Martini, S.T., M.T., Ph.D.
NIDN. 0001117901

Anggota I



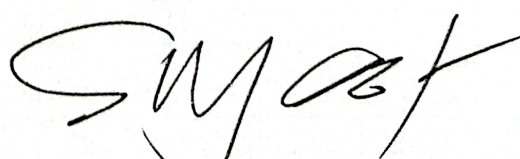
Prof. Ir. Erna Yuliwati, M.T., Ph.D.,
IPU., ASEAN.Eng.
NIDN. 0228076701

Anggota II



Prof. Dr. Ir. Marhaini, M.T.
NIDN. 0005096804

Anggota III



Dr. Eko Ariyanto, S.T., M. ChemEng.
NIDN. 0217067504

SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Yeni Novita Sari

NIM : 94224004

Program Studi : Teknik Kimia

Menyatakan bahwa :

1. Karya tulis saya ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik Magister Teknik Kimia baik di Universitas Muhammadiyah Palembang maupun di perguruan tinggi lain.
2. Karya tulis ini adalah murni gagasan, rumusan, dan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan Tim Pembimbing.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan oleh orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah diperoleh karena karya ini, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi ini.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan tanpa paksaan dari pihak manapun.

Palembang, Mei 2026



OPTIMIZATION OF THE PHOTOCATALYTIC ADSORPTION PROCESS OF RBBR DYE ON ZnO/ACTIVE CARBON COMPOSITE THROUGH A PYTHON ALGORITHM APPROACH

Yeni Novita Sari

Yeni Novita Sari. (2026). Optimization Of The Photocatalytic Adsorption Process Of RBBR Dye On ZnO/Active Carbon Composite Through A Python Algorithm Approach. Thesis, Magister Chemical Engineering Program of Post Graduate of University Muhammadiyah Palembang. Advisor : (I) Dian Kharismadewi, S.T., M.T., Ph.D, (II) Sri Martini, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRACT

Textile industrial wastewater containing synthetic dyes such as Remazol Brilliant Blue R (RBBR) is resistant to natural degradation and poses environmental risks. This study aims to optimize the adsorption–photocatalytic degradation of RBBR using a ZnO/activated carbon composite through a Python-based modeling approach. The investigated variables include light source, activation temperature, initial concentration, and reaction time. Kinetic analysis using a first-order model indicates that the light source is the most dominant factor, with effectiveness ranked as UV Light > LED Light > No Light. The optimum condition was achieved under UV Light at an activation temperature of 170 °C and an initial concentration of 10 ppm, yielding a reaction rate constant of approximately 0.043 min^{-1} , while maximum degradation efficiency approached 100% at 200 °C. The results show a strong positive correlation between the reaction rate constant and degradation efficiency, and a strong negative correlation with initial concentration. The Python-based approach proved effective for kinetic analysis and process optimization. The ZnO/activated carbon composite demonstrates strong potential as a photocatalytic material for treating dye-containing textile wastewater.

Keywords: Remazol Brilliant Blue R, ZnO/activated carbon, adsorption–photocatalysis, first-order kinetics, Python optimization.

OPTIMASI PROSES ADSORPSI FOTOKATALITIK ZAT WARNA RBBR PADA KOMPOSIT ZnO/KARBON AKTIF MELALUI PENDEKATAN ALGORITMA PYTHON

Yeni Novita Sari

Yeni Novita Sari. (2026). Optimasi Proses Adsorpsi Fotokatalitik Zat Warna RBBR Pada Komposit ZnO/Karbon Aktif Melalui Pendekatan Algoritma Python, Tesis, Program Studi Magister Teknik Kimia, Program Pascasarjana, Universitas Muhammadiyah Palembang. Pembimbing : (I) Dian Kharismadewi, S.T., M.T., Ph.D, (II) Sri Martini, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRAK

Limbah cair industri tekstil yang mengandung zat warna sintetis seperti Remazol Brilliant Blue R (RBBR) sulit terdegradasi secara alami dan berpotensi mencemari lingkungan. Penelitian ini bertujuan mengoptimasi proses adsorpsi-fotokatalitik RBBR menggunakan komposit ZnO/karbon aktif berbasis pemodelan Python. Variabel yang dikaji meliputi jenis pencahayaan, suhu aktivasi, konsentrasi awal, dan waktu reaksi. Analisis menggunakan kinetika orde satu menunjukkan bahwa pencahayaan merupakan faktor paling dominan dengan urutan efektivitas: UV Light > LED Light > No Light. Kondisi optimum diperoleh pada UV Light, suhu 170 °C, dan konsentrasi 10 ppm dengan konstanta laju reaksi sekitar 0,043 min⁻¹, sedangkan efisiensi degradasi maksimum mendekati 100% dicapai pada suhu 200 °C. Hasil juga menunjukkan korelasi positif antara konstanta laju dan efisiensi degradasi serta korelasi negatif dengan konsentrasi awal. Pendekatan Python terbukti efektif dalam analisis dan optimasi proses. Komposit ZnO/karbon aktif berpotensi sebagai material fotokatalitik untuk pengolahan limbah zat warna tekstil.

Kata kunci: RBBR, ZnO/karbon aktif, adsorpsi-fotokatalitik, kinetika orde satu, optimasi Python.

KATA PENGANTAR

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala limpahan rahmat, taufik, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyusun tesis yang berjudul **"Optimasi Proses Adsorpsi Fotokatalitik Zat Warna RBBR pada Komposit ZnO/Karbon Aktif melalui Pendekatan Algoritma Python"** sebagai salah satu syarat dalam menempuh jenjang pendidikan Magister.

Penyusunan tesis ini tentunya tidak terlepas dari bantuan, dukungan, dan arahan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT dan Rasulullah SAW yang senantiasa memberikan ridho dan kemudahan dalam setiap Langkah.
2. Prof. Dr. Abid Djazuli, S.E., M.M selaku Rektor Universitas Muhammadiyah Palembang.
3. Dr. Ir. Mukhtarudin, M.P. selaku Direktur Pasca Sarjana Universitas Muhammadiyah Palembang.
4. Ibu Dian Kharismadewi, ST., M.T., Ph.D selaku Ketua Progam Studi Magister Teknik Kimia Program Pascasarjana Universitas Muhammadiyah Palembang dan Pembimbing I yang telah membimbing, memberikan ilmu, memberikan saran dan kritik yang sangat membangun.
5. Ibu Dr. Ir. Eka Sri Yusmartini, M.T selaku Sekretaris Progam Studi Magister Teknik Kimia Program Pascasarjana Universitas Muhammadiyah Palembang.
6. Ibu Sri Martini, S.T., M.T., Ph.D Sebagai Dosen Pembimbing II yang telah memberikan masukan, saran, dan kritik selama proses penyelesaian tesis ini.

7. Seluruh dosen dan staf pengajar di program studi Magister Teknik Kimia Universitas Muhammadiyah Palembang yang telah memberikan ilmu dan pengetahuan selama masa perkuliahan.
8. Keluarga tercinta, terutama suami saya Farhan Bayu Setyawan dan anak saya M. Feyzel Wistara Arkhasyafani yang senantiasa mendukung serta menyaksikan saya dalam menyelesaikan perkuliahan dan tesis ini, serta menemani, dan mendoakan.
9. Terima kasih juga kepada keempat orangtua saya, Bapak dan Ibu saya serta Bapak dan mama mertua saya yang senantiasa selalu memberikan restu, dukungan moral dan doa yang tiada henti.
10. Terima kasih kakak saya, adik saya, ipar-ipar saya, serta keponakan-keponakan saya yang selalu mendukung kemajuan pendidikan saya.
11. Rekan-rekan seperjuangan di program magister Angkatan 10, Mba Diah, Bang Putra, Bang Afhdal, Bang Jul, Bang Al, Bang Yogi, dan Bang Irfan yang turut memberikan motivasi dan berbagi pengalaman seclama proses studi.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, segala saran dan kritik yang membangun sangat penulis harapkan demi kesempurnaan dan pengembangan penelitian ini di masa mendatang.

Akhir kata, semoga tesis ini dapat memberikan manfaat dan kontribusi positif, baik dalam bidang akademik maupun pengembangan ilmu pengetahuan.

Palembang, 14 Maret 2026

Yeni Novita Sari

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN TESIS.....	ii
LEMBAR PERSETUJUAN TIM PENGUJI.....	iii
SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT	iv
<i>ABSTRACT</i>	v
ABSTRAK.....	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang.....	1
B. Rumusan Masalah.....	2
C. Tujuan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
A. <i>Remazol Brilliant Blue R</i> (RBBR).....	5
B. Metode Pengolahan Limbah Pewarna Tekstil.....	6
C. Fotokatalisis dengan ZnO sebagai Katalis.....	9
D. Peningkatan Efisiensi ZnO melalui Komposit dengan Karbon Aktif.....	12
E. Parameter yang Memengaruhi Proses Fotokatalisis.....	13
F. Python 3.13.....	14
G. Permodelan dan Optimasi Proses Degradasi Menggunakan Python.....	16
H. Studi Terdahulu Terkait ZnO/Karbon Aktif untuk Degradasi RBBR.....	17
I. Hipotesis Penelitian.....	19
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	20
A. Pendekatan Penelitian.....	20
B. Sumber Data.....	20
C. Alat dan Bahan Penelitian.....	21
D. Peralatan dan Perangkat Lunak.....	21

E. Preparasi Komposit ZnO/Karbon Aktif.....	22
F. Analisis Berbasis Python.....	24
H. Uji <i>Equilibrium</i>	25
I. Diagram Alur Penelitian.....	26
BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN.....	27
A. Pengaruh Waktu Reaksi terhadap Penurunan Konsentrasi RBBR.....	28
B. Efisiensi Degradasi RBBR.....	34
C. Analisis Kinetika Reaksi Degradasi RBBR.....	44
D. Analisis Korelasi Antar Variabel (Berdasarkan <i>Heatmap</i>).....	66
E. Analisis Kinetika Reaksi dan Optimasi Kondisi Menggunakan Pemrograman Python.....	81
F. Uji <i>Equilibrium</i> antara Data Eksperimen dan Hasil Prediksi Berbasis Python.....	85
G. Simulasi Prediksi Kinetika Degradasi.....	87
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	93
A. Kesimpulan.....	93
B. Saran Penelitian.....	94
DAFTAR PUSTAKA.....	96
LAMPIRAN.....	155

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Rangkuman Studi Relevan:	18
Tabel 2. Data Hasil Penelitian	27
Tabel 3. Komponen Permukaan dan Peran dalam Degradasi RBBR	36
Tabel 4. Spesies Reaktif dalam Proses Fotokatalitik	37
Tabel 5. Kondisi Optimum Berdasarkan Efisiensi Degradasi	44
Tabel 6. Tabel Variabel dengan Pengaruh Terbaik	80

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Serbuk RBBR.....	5
Gambar 2. Struktur Kimia RBBR.....	6
Gambar 3. Fotokatalisis ZnO.....	9
Gambar 4. Konsentrasi terhadap Waktu (<i>UV Light</i>).....	29
Gambar 5. Konsentrasi terhadap Waktu (<i>LED Light</i>).....	31
Gambar 6. Konsentrasi terhadap Waktu (<i>No Light</i>).....	33
Gambar 7. Efisiensi Degradasi UV Light.....	35
Gambar 8. Efisiensi Degradasi LED Light.....	38
Gambar 9. Efisiensi Degradasi No Light.....	41
Gambar 10. Kinetika Orde 1 (UV Light).....	46
Gambar 11. Kinetika Orde 1 (<i>LED Light</i>).....	49
Gambar 12. Kinetika Orde 1 (<i>No Light</i>).....	52
Gambar 13. Perbandingan k Berdasarkan Jenis Cahaya.....	55
Gambar 14. Optimasi Berdasarkan Jenis Cahaya.....	58
Gambar 15. Optimasi Suhu dengan Variabel Temperatur terhadap nilai K.....	60
Gambar 17. Heatmap Korelasi Variabel.....	67
Gambar 18. Korelasi Temperatur terhadap Efisiensi.....	71
Gambar 19. Korelasi Temperatur terhadap $t_{1/2}$	74
Gambar 20. Korelasi C_0 terhadap Efisiensi.....	77
Gambar 21. Hasil Analisis Data Menggunakan Python.....	82
Gambar 22. Analisis Kondisi Optimum.....	84
Gambar 23. Prediksi Kinetika Degradasi.....	88
Gambar 24. Prediksi dengan Durasi Lebih Singkat.....	90

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Industri tekstil merupakan salah satu sektor industri yang berkembang pesat di Indonesia. Namun, limbah yang dihasilkan, terutama yang mengandung zat warna sintetis seperti *Remazol Brilliant Blue R* (RBBR), menimbulkan permasalahan lingkungan yang serius. RBBR termasuk dalam kategori zat warna azo yang memiliki struktur kimia stabil, sehingga sulit terdegradasi secara alami dan dapat bertahan lama di lingkungan perairan. Selain itu, keberadaannya dalam air limbah dapat menyebabkan toksisitas terhadap organisme akuatik dan menurunkan kualitas air (Ali et al., 2020). Oleh karena itu, diperlukan metode pengolahan limbah yang efektif untuk mengatasi permasalahan ini.

Salah satu metode yang telah banyak diteliti adalah penggunaan fotokatalis berbasis seng oksida (ZnO) yang dikombinasikan dengan karbon aktif. ZnO memiliki energi celah pita (*bandgap*) sebesar 3,17 eV yang memungkinkan aktivasi fotokatalitik di bawah sinar UV (Zhang et al., 2021). Dalam proses fotokatalisis, ZnO menghasilkan pasangan elektron-hole yang dapat bereaksi dengan molekul air untuk membentuk radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$), yang memiliki kemampuan oksidasi tinggi untuk mendegradasi zat warna organik menjadi senyawa yang lebih sederhana dan tidak beracun (Wang & Li, 2019). Di sisi lain, karbon aktif berperan dalam meningkatkan adsorpsi zat warna pada permukaan ZnO, yang dapat meningkatkan efisiensi degradasi serta mencegah rekombinasi elektron-hole yang menghambat reaksi fotokatalitik (Kumar et al., 2020).

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa komposit ZnO/karbon aktif telah digunakan secara efektif dalam degradasi berbagai zat warna sintetis. Misalnya, kombinasi ZnO dengan karbon aktif berhasil mendegradasi Rhodamin B dengan efisiensi sebesar 86,84% (Sari et al., 2019). Selain itu,

kombinasi ZnO dengan arang aktif telah terbukti mempercepat proses fotodegradasi zat warna *Congo Red* hingga sembilan kali lebih cepat dibandingkan tanpa fotokatalis (Santoso et al., 2018). Namun, penelitian terhadap degradasi RBBR menggunakan kombinasi ZnO dan karbon aktif masih terbatas, terutama dalam hal optimasi parameter proses seperti konsentrasi katalis, pH larutan, dan waktu iradiasi (Rahman et al., 2022).

Dalam konteks ini, pemodelan dan optimasi proses degradasi menggunakan pemrograman Python menawarkan pendekatan yang efisien dan fleksibel. Python memiliki berbagai pustaka ilmiah yang dapat digunakan untuk analisis data eksperimen. Dengan menggunakan pendekatan ini, diharapkan penelitian ini dapat menentukan kondisi optimal untuk degradasi RBBR dengan komposit ZnO/karbon aktif, serta memberikan kontribusi dalam pengembangan metode pengolahan limbah industri tekstil yang lebih efisien.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana efektivitas material ZnO/Karbon Aktif dalam proses adsorpsi fotokatalitik untuk degradasi zat warna *Remazol Brilliant Blue R* (RBBR)?
2. Apa saja parameter proses yang paling berpengaruh terhadap efisiensi degradasi RBBR menggunakan komposit ZnO/Karbon Aktif?
3. Bagaimana pendekatan pemrograman Python dapat digunakan untuk mengoptimalkan parameter degradasi RBBR guna mencapai efisiensi maksimum?

C. Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Menganalisis efektivitas material ZnO/Karbon Aktif dalam proses adsorpsi fotokatalitik untuk degradasi zat warna *Remazol Brilliant Blue R* (RBBR).
2. Menentukan parameter proses yang paling berpengaruh terhadap efisiensi degradasi RBBR menggunakan komposit ZnO/Karbon Aktif, seperti temperatur sintesa material komposit, konsentrasi limbah sintesis, waktu proses adsorpsi fotokatalitik, dan jenis penyinarannya.
3. Menggunakan pendekatan pemrograman Python untuk memodelkan dan mengoptimalkan kondisi degradasi RBBR guna mencapai efisiensi maksimum dalam proses adsorpsi fotokatalitik.

D. Kegunaan dan Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Meningkatkan pemahaman tentang degradasi zat warna RBBR melalui proses adsorpsi fotokatalitik dengan material ZnO/Karbon Aktif, serta mengevaluasi efektivitasnya dalam menguraikan polutan dari limbah industri tekstil.
2. Mengidentifikasi parameter proses yang paling berpengaruh terhadap efisiensi degradasi RBBR, seperti temperatur sintesa material komposit, konsentrasi limbah sintesis, waktu proses adsorpsi fotokatalitik, dan jenis penyinarannya, sehingga dapat digunakan sebagai acuan dalam penelitian lanjutan atau aplikasi industri.
3. Mengembangkan model optimasi berbasis Python yang dapat membantu dalam menentukan kondisi terbaik untuk degradasi zat warna, sehingga penelitian dapat dilakukan dengan pendekatan yang lebih efisien, akurat, dan hemat sumber daya.
4. Memberikan solusi alternatif bagi industri dalam pengolahan limbah, khususnya dalam upaya mengurangi dampak lingkungan akibat zat warna sintetis yang sulit terdegradasi secara alami.

5. Mendorong pemanfaatan teknologi pemrograman dalam sains lingkungan, sehingga pendekatan berbasis komputasi dapat lebih banyak diterapkan dalam penelitian material dan teknik pengolahan limbah.
6. Menyediakan referensi akademik bagi peneliti selanjutnya yang ingin mengembangkan metode degradasi zat warna menggunakan kombinasi material fotokatalis dan optimasi berbasis pemrograman.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. A. (2020). Review on removal of dyes from textile effluent using advanced oxidation processes (AOPs): A case study. *Environmental Chemistry Letters*, 18(3), 705–727.
- Amin, N., Ahmad, R., & Saeed, M. (2021). Enhanced photodegradation of Congo red using ZnO/activated carbon composites under visible light. *Journal of Environmental Management*, 281, 111892.
- Bhatnagar, A., & Sillanpää, M. (2021). Adsorptive removal of synthetic dyes from aqueous solutions: A review. *Chemical Engineering Journal*, 397, 125506.
- Cameron, H., Liu, Q., & Wang, Y. (2020). Coagulation–flocculation process optimization for dye wastewater treatment: A review. *Environmental Technology & Innovation*, 18, 100783.
- Chen, J., Liu, H., & Zhang, W. (2022). Enhanced photocatalytic activity of ZnO/activated carbon composites under UV-A irradiation for textile dye removal. *Journal of Cleaner Production*, 331, 129967.
- Crini, G. (2006). Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: A review. *Bioresource Technology*, 97(9), 1061–1085.
- Feng, W., Zhang, X., & Li, Y. (2021). Comparative study on photocatalytic degradation of azo dyes using ZnO and TiO₂. *Materials Chemistry and Physics*, 270, 124812.
- Gogate, P. R., & Pandit, A. B. (2020). A review of imperative technologies for wastewater treatment I: oxidation technologies at ambient conditions. *Advances in Environmental Research*, 8(3–4), 501–551.

- Hameed, B. H., Din, A. T. M., & Ahmad, A. L. (2022). Adsorption of methylene blue onto bamboo-based activated carbon: Kinetics and equilibrium studies. *Journal of Hazardous Materials*, 141(3), 819–825.
- Khan, M. M., Pradhan, D., & Han, D. H. (2022). Zinc oxide-based nanostructures for photocatalytic degradation of organic pollutants: A review. *Catalysis Today*, 383, 2–18.
- Kumar, R., Khan, S., & Singh, R. (2019). Azo dye degradation and its impact on aquatic systems. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 171, 489–501.
- Kumar, V., Sharma, S., & Pandey, R. (2020). Removal of Reactive Black 5 by TiO₂/activated carbon nanocomposite using response surface methodology. *Desalination and Water Treatment*, 174, 329–338.
- Kumar, V., Singh, P., & Mehra, A. (2023). Python-based optimization of photocatalytic dye degradation using ANN-GA model. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(2), 110431.
- Li, Y., Wang, J., & Zhang, Q. (2021). Strategies to enhance the visible-light photocatalytic performance of ZnO: A review. *Materials Today Sustainability*, 10, 100042.
- Li, Y., Zhao, X., & Zhang, Y. (2022). Machine learning optimization of ZnO/activated carbon photocatalysts for azo dye removal. *Separation and Purification Technology*, 290, 120904.
- Liu, H., Chen, X., & Yang, J. (2021). Photocatalytic degradation of organic pollutants using ZnO-based nanomaterials: A review. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 46, 100401.
- McKinney, W. (2018). *Python for Data Analysis: Data Wrangling with Pandas, NumPy, and IPython* (2nd ed.). Sebastopol, CA: O'Reilly Media.

- Rahman, M. A., Akter, T., & Hasan, M. N. (2022). Optimization of photocatalytic degradation of RBBR dye using ZnO/carbon composite. *Journal of Water Process Engineering*, 48, 102888.
- Rafatullah, M., Sulaiman, O., & Hashim, R. (2019). Biodegradation of dyes: Recent advances and future challenges. *Journal of Environmental Management*, 240, 386–405.
- Reddy, D. A., Lee, K. M., & Jung, H. Y. (2021). ZnO/activated carbon hybrid photocatalysts: Influence of synthesis method on photocatalytic activity. *Applied Surface Science*, 566, 150659.
- Saeed, M., Ahmad, R., & Akhtar, M. S. (2020). Hybrid adsorptive-photocatalytic degradation of Congo red by ZnO-activated carbon nanocomposite. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 14, 100316.
- Sari, M. R., Wahyuningsih, R. S., & Nugroho, D. (2019). Degradasi Rhodamin B menggunakan fotokatalis ZnO/karbon aktif dari tempurung kelapa. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 20(2), 123–129.
- Sanchez, R., Gomez, C., & Ortega, E. (2020). The use of reactive dyes in textile industry: Environmental impact and remediation. *Textile Research Journal*, 90(11–12), 1235–1247.
- Santoso, D., Yuliana, N., & Widodo, A. (2018). Percepatan fotodegradasi Congo Red dengan katalis ZnO/arang aktif. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 16(3), 207–213.
- Singh, G., Yadav, M., & Bansal, P. (2018). ZnO derived from coconut shell carbon for Congo red degradation. *Journal of Environmental Management*, 223, 134–140.
- Singh, R., Sharma, M., & Ghosh, A. (2021). Emerging AOPs for textile dye removal: A review. *Environmental Research*, 200, 111498.

- Wang, Y., Li, Q., & Zhang, L. (2019). Photocatalytic degradation mechanism of organic pollutants by ZnO nanoparticles. *Catalysts*, 9(2), 136.
- Wang, L., Zhao, Y., & Chen, Y. (2021). Toxicity assessment of azo dyes on aquatic environment. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 40(4), 1009–1018.
- Wang, J., Zhou, L., & Zhang, H. (2022). Python-based modeling of photocatalytic degradation kinetics using ANN. *Chemical Engineering Communications*, 209(7), 983–995.
- Wahyuni, R., Pratama, Y., & Hidayat, T. (2021). Degradasi RBBR dengan ZnO/karbon biomassa melalui optimasi berbasis algoritma genetika. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 22(3), 245–252.
- Xu, H., Zhao, X., & Li, W. (2023). LED-induced photocatalytic degradation of dyes using ZnO-carbon composite. *Materials Today: Proceedings*, 74, 1875–1881.
- Zahrim, A. Y., Hilal, N., & Tizaoui, C. (2017). Hybrid coagulation–membrane processes for dye removal from wastewater: A review. *Desalination*, 405, 1–15.
- Zhang, Y., Li, X., & Chen, Y. (2021). Enhancement of photocatalytic degradation of methylene blue using ZnO/graphene oxide under UV light. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 123, 105547.
- Zhang, L., Hu, J., & Wang, X. (2022). ZnO/activated carbon composites for enhanced adsorption and photocatalysis of dye pollutants. *Applied Catalysis B: Environmental*, 301, 120800.
- Zhao, Y., Wu, T., & Li, J. (2020). Visible-light photocatalytic activity of modified ZnO nanostructures for dye degradation. *Journal of Alloys and Compounds*, 820, 153141.

Zhou, J., Zhang, H., & Liu, Y. (2020). Azo dye degradation and its byproducts toxicity: A comprehensive review. *Science of The Total Environment*, 732, 139293.