

Kajian Komprehensif Literatur mengenai Integrasi Adsorpsi - Ozonasi untuk Pengolahan Limbah Cair Industri

Moch. Afrizal Nafii'u Hafid¹, Haqi Zain Syadana¹, Susilowati^{1,2}, Ketut Sumada¹

¹Program Studi Teknik Kimia, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur, Surabaya

²Magister Ilmu Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur, Surabaya

*Koresponden email: 22031010174@student.upnjatim.ac.id

Diterima: 13 Maret 2026

Disetujui: 17 Maret 2026

Abstract

Industrial wastewater, especially from the textile industry, generally contains complex organic compounds, synthetic dyes, suspended solids, and dissolved solids in high concentrations, which can cause environmental pollution. These parameters often exceed quality standards, requiring more effective and sustainable treatment technologies. One approach that has been widely studied is the integration of ozonation and adsorption processes for treating industrial wastewater. This literature study aims to evaluate the potential of combining these two processes to improve wastewater treatment performance. The research method involved a literature review of scientific publications on the reaction mechanism, operating parameters, and performance of the ozonation-adsorption process for reducing pollutant concentrations. The results of the study show that ozonation, as an Advanced Oxidation Process (AOP), produces hydroxyl radicals (*OH) that are highly effective at degrading complex organic compounds, while adsorption on porous materials removes pollutant residues. The integration of the two processes produced a synergistic effect, with increased reaction contact and mass transfer efficiency, resulting in pollutant reduction efficiencies of 99.88% for color, 97.17% for TSS, 97% for TOC, 93.76% for COD, 54.4% for TDS, and 56.5% for BOD.

Keywords: *adsorption-ozonation, hydroxyl radicals, industrial wastewater, porous material, wastewater treatment*

Abstrak

Limbah cair industri khususnya industri tekstil, umumnya mengandung senyawa organik kompleks, zat warna sintesis, padatan tersuspensi dan terlarut dalam konsentrasi tinggi yang berpotensi menyebabkan pencemaran lingkungan. Parameter tersebut sering melebihi baku mutu, sehingga diperlukan teknologi pengolahan lebih efektif dan berkelanjutan. Salah satu pendekatan yang banyak dikaji adalah integrasi proses ozonasi dan adsorpsi sebagai metode pengolahan limbah cair industri. Studi literatur ini bertujuan mengevaluasi potensi kombinasi kedua proses tersebut dalam meningkatkan kinerja pengolahan limbah. Metode penelitian dilakukan melalui kajian pustaka terhadap berbagai publikasi ilmiah yang membahas mekanisme reaksi, parameter operasi, serta kinerja proses ozonasi-adsorpsi dalam menurunkan konsentrasi polutan. Hasil kajian menunjukkan, ozonasi sebagai *Advanced Oxidation Process* (AOP) menghasilkan radikal hidroksil (*OH) sangat efektif mendegradasi senyawa organik kompleks, sementara adsorpsi material berpori berperan dalam mengadsorpsi residu polutan. Integrasi kedua proses menghasilkan efek sinergis melalui peningkatan kontak reaksi dan efisiensi perpindahan massa, dengan efisiensi penurunan polutan mencapai 99,88% warna, 97,17% TSS, 97% TOC, 93,76% COD, 54,4% TDS, dan 56,5% BOD.

Kata Kunci: *adsorpsi-ozonasi, radikal hidroksil, limbah cair industri, material pori, pengolahan limbah*

1. Pendahuluan

Peningkatan aktivitas industri dalam beberapa dekade terakhir telah meningkatkan produksi limbah cair yang mengandung polutan organik dan anorganik. Limbah ini umumnya mengandung zat warna sintesis, fenol, surfaktan, senyawa aromatik, serta ion logam berat dan garam terlarut yang berpotensi mencemari lingkungan [1]. Banyak dari senyawa tersebut bersifat persisten dan berdampak negatif terhadap ekosistem serta kesehatan manusia [2]. Oleh karena itu, pengembangan teknologi pengolahan limbah cair yang efektif dan berkelanjutan menjadi tantangan penting dalam pengelolaan lingkungan.

Berbagai metode telah dikembangkan, seperti koagulasi-flokulasi, filtrasi, proses biologis, pertukaran ion, dan adsorpsi [3]. Di antara metode tersebut, adsorpsi banyak digunakan karena efisiensi tinggi dan operasi yang relatif sederhana [4]. Berbagai material adsorben telah dikembangkan untuk meningkatkan efektivitas proses adsorpsi, salah satunya adalah zeolit. Zeolit dikenal memiliki struktur pori

yang teratur, luas permukaan spesifik besar, serta kemampuan pertukaran ion yang baik sehingga efektif dalam menyerap berbagai kontaminan dalam air limbah [5]. Karakteristik tersebut menjadikan zeolit sebagai material adsorben yang potensial dalam pengolahan limbah cair, khususnya untuk mengadsorpsi senyawa organik maupun ion logam berat. Selain adsorpsi, teknologi oksidasi lanjut seperti ozonasi juga banyak dikembangkan. Ozonasi menggunakan ozon (O_3) sebagai oksidator kuat yang menghasilkan radikal hidroksil ($\bullet OH$) [6]. Radikal ini memiliki potensi oksidasi tinggi sehingga mampu mendegradasi senyawa organik kompleks dan dapat ditingkatkan melalui pendekatan katalitik [7][8].

Namun demikian, proses ozonasi tunggal sering belum mampu menghilangkan seluruh produk antara hasil oksidasi yang masih terlarut dalam air. Oleh karena itu, integrasi ozonasi-adsorpsi menjadi pendekatan yang menjanjikan untuk meningkatkan efisiensi pengolahan. Dalam sistem ini, ozonasi mendegradasi senyawa polutan kompleks, sedangkan adsorpsi menangkap residu polutan dan produk antara yang masih tersisa dalam larutan. Kombinasi proses adsorpsi-ozonasi memiliki potensi besar untuk diaplikasikan pada berbagai polutan, sebagaimana yang dibuktikan oleh beberapa penelitian yang menunjukkan penurunan kadar limbah warna hingga 99,88%, TSS hingga 97,17%, TOC hingga 97%, COD hingga 93,76%, TDS hingga 54,4%, BOD hingga 56,5% [9], [10], [11], [12], [13]. Berdasarkan hal tersebut, studi literatur ini bertujuan untuk mengkaji potensi kombinasi proses adsorpsi-ozonasi sebagai teknologi yang efektif serta mengevaluasinya dalam menurunkan berbagai parameter pencemar limbah cair.

2. Metode Penelitian

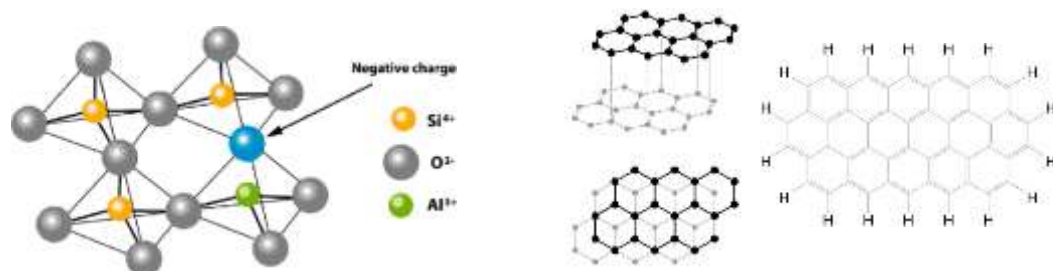
Penelitian ini menggunakan pendekatan studi literatur dengan memanfaatkan data sekunder yang diperoleh dari berbagai publikasi ilmiah terkait penerapan proses adsorpsi dan ozonasi dalam pengolahan limbah cair industri. Pengumpulan literatur dilakukan melalui penelusuran artikel ilmiah pada beberapa basis data daring, seperti *Google Scholar*, *ScienceDirect*, *ResearchGate*, *Scopus*, *SpringerLink*, dan *Wiley Online Library*. Literatur yang dikaji difokuskan pada publikasi ilmiah untuk memperoleh informasi yang relevan dan mutakhir mengenai perkembangan teknologi pengolahan limbah cair. Kata kunci yang digunakan dalam pencarian meliputi “*adsorption wastewater treatment*”, “*ozonation wastewater treatment*”, “*adsorption-ozonation process*”, dan “*advanced oxidation process ozonation*”. Literatur yang diperoleh kemudian diseleksi berdasarkan kesesuaiannya dengan fokus penelitian, yaitu mekanisme proses ozonasi, karakteristik adsorpsi, serta efektivitas kombinasi kedua metode dalam menurunkan kandungan polutan.

Publikasi yang terpilih selanjutnya dianalisis untuk mengidentifikasi kondisi operasi proses, seperti dosis ozon, jenis dan jumlah massa adsorben, pH, dan waktu kontak, serta parameter kinerja pengolahan seperti penurunan COD, BOD, TSS, TDS, dan lainnya. Hasil kajian kemudian dibandingkan dan disusun secara sistematis untuk memperoleh gambaran mengenai potensi dan efektivitas integrasi proses adsorpsi-ozonasi dalam meningkatkan efisiensi pengolahan limbah cair industri.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Zeolit dan GAC (*Granular Activated Carbon*) sebagai Media Adsorben

Zeolit adalah mineral aluminosilikat kristalin yang tersusun dari unit tetrahedral $[SiO_4]^{4-}$ dan $[AlO_4]^{5-}$ yang membentuk kerangka berpori tiga dimensi. Substitusi Si^{4+} oleh Al^{3+} menghasilkan muatan negatif pada kerangka yang dinetralkan oleh kation seperti Na^+ , Ca^{2+} , atau K^+ , sehingga memungkinkan terjadinya pertukaran ion tanpa merusak struktur kristal [14]. Struktur mikropori (≤ 2 nm) memberikan luas permukaan tinggi yang menjadikan zeolit efektif sebagai adsorben dalam pengolahan air dan limbah cair [15].



Gambar 1. (a) Struktur Kerangka Zeolit (SiO_4-AlO_4)

(b) Struktur Kerangka Molekular GAC

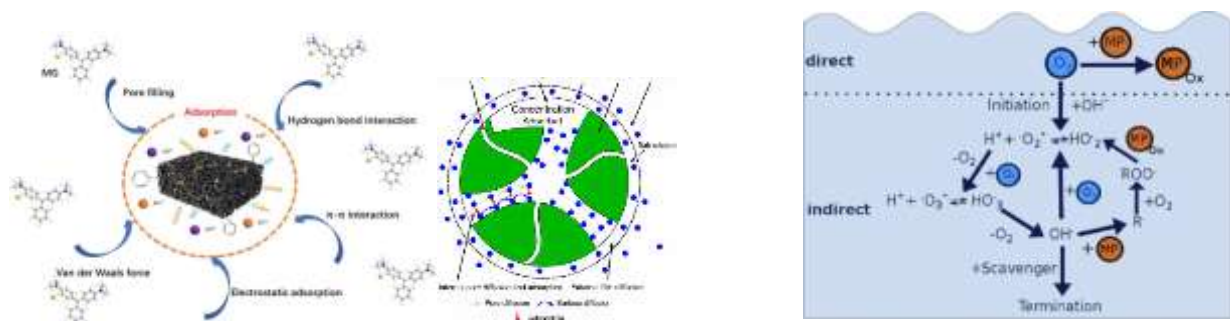
Sumber : [46], [47]

Adsorpsi pada zeolit berlangsung melalui beberapa mekanisme seperti interaksi elektrostatik, pertukaran ion, ikatan hidrogen, pengisian pori, serta interaksi $\pi-\pi$, sehingga mampu mengikat berbagai kontaminan termasuk logam berat, zat warna, dan senyawa organik [16]. Zeolit tersedia dalam bentuk zeolit alam dan zeolit sintesis; zeolit alam berasal dari material vulkanik dan sering mengandung pengotor, sedangkan zeolit sintesis memiliki struktur dan sifat fisikokimia yang lebih terkontrol, sehingga menunjukkan kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi [17].

Selain zeolit, *Granular Activated Carbon* (GAC) juga banyak digunakan sebagai adsorben karena memiliki struktur mikro- dan mesopori dengan luas permukaan sangat besar ($>1000 \text{ m}^2/\text{g}$). Adsorpsi pada karbon aktif terjadi melalui interaksi fisik dan gaya van der Waals yang efektif dalam menyerap berbagai senyawa organik [18]. Oleh karena itu, kombinasi zeolit dan GAC sering diterapkan dalam pengolahan limbah cair karena zeolit efektif untuk ion anorganik melalui pertukaran ion, sedangkan GAC lebih efisien dalam mengadsorpsi senyawa organik kompleks [19].

3.2 Mekanisme Reaksi pada Proses Adsorpsi dan Ozonasi

Proses adsorpsi pada media berpori seperti zeolit dan *Granular Activated Carbon* (GAC) terjadi melalui beberapa tahap utama, yaitu difusi eksternal menuju permukaan adsorben, difusi intrapartikel ke dalam pori, serta interaksi antara polutan dan situs aktif adsorben. Interaksi tersebut meliputi gaya van der Waals, interaksi elektrostatik, serta interaksi kimia seperti pertukaran ion dan pembentukan kompleks [20]. Pada karbon aktif, struktur mikro- dan mesopori memungkinkan adsorpsi melalui mekanisme pore filling dan adsorpsi fisik, sedangkan pada zeolit mekanisme dominan terjadi melalui pertukaran kation dan interaksi elektrostatik antara kerangka zeolit bermuatan negatif dan ion polutan dalam larutan [21].

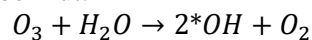


Gambar 2. (a) Mekanisme Adsorpsi pada Adsorben Berpori

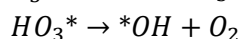
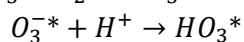
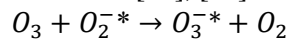
Sumber : [48], [49]

(b) Mekanisme Reaksi Ozonasi

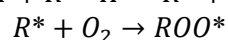
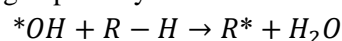
Ozonasi memanfaatkan ozon (O_3) sebagai oksidator kuat untuk mendegradasi senyawa organik dalam air. Ozon dapat bereaksi langsung dengan senyawa organik atau terdekomposisi membentuk radikal hidroksil ($^*\text{OH}$) yang memiliki potensial oksidasi tinggi ($E^\circ \approx 2,8 \text{ V}$). Pembentukan radikal tersebut dapat digambarkan secara sederhana sebagai berikut:



Radikal hidroksil yang terbentuk kemudian bereaksi secara non-selektif dengan berbagai senyawa organik kompleks seperti zat warna, fenol, dan surfaktan sehingga menghasilkan senyawa yang lebih sederhana seperti aldehid, asam organik, atau karbon dioksida [22], [23].



Radikal hidroksil yang terbentuk selanjutnya bereaksi dengan senyawa organik dalam air melalui mekanisme oksidasi radikal bebas yang dapat dinyatakan secara umum sebagai berikut:



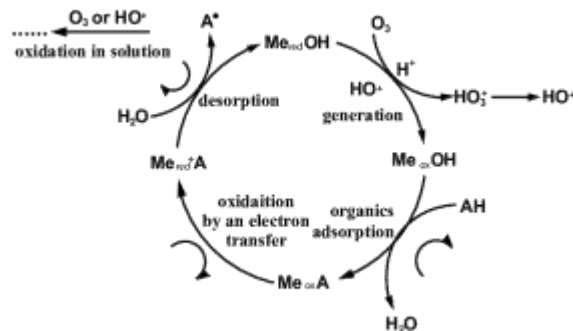
Reaksi tersebut menyebabkan degradasi struktur molekul organik kompleks menjadi molekul yang lebih sederhana sehingga meningkatkan efisiensi pengolahan limbah cair [22].

Integrasi ozonasi dan adsorpsi memberikan efek sinergis dalam pengolahan limbah cair industri. Ozonasi memecah struktur polutan organik kompleks menjadi molekul yang lebih kecil sehingga lebih mudah teradsorpsi, sedangkan adsorben seperti zeolit atau *Granular Activated Carbon* (GAC) dapat

meningkatkan transfer massa ozon serta mempercepat pembentukan radikal hidroksil pada permukaan adsorben. Selain itu, adsorben juga mampu mengadsorpsi produk antara hasil oksidasi yang masih tersisa dalam larutan sehingga meningkatkan efisiensi keseluruhan proses pengolahan limbah cair [23], [24].

3.3 Efektivitas Adsorben dalam Proses Ozonasi

Efektivitas proses ozonasi dapat meningkat dengan adanya material adsorben seperti zeolit dan *Granular Activated Carbon* (GAC) yang berperan sebagai media katalitik heterogen dalam sistem oksidasi. Permukaan berpori adsorben menyediakan area kontak yang luas bagi ozon dan polutan serta dapat mempercepat dekomposisi ozon menjadi spesies oksidatif reaktif seperti radikal hidroksil ($\cdot\text{OH}$). Selain itu, adsorben juga meningkatkan transfer massa ozon dalam fase cair dan mengadsorpsi produk antara hasil oksidasi yang masih tersisa dalam larutan. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kombinasi adsorpsi–ozonasi mampu meningkatkan degradasi polutan organik seperti zat warna dan senyawa aromatik dibandingkan ozonasi tunggal karena adanya efek sinergis antara oksidasi radikal dan proses adsorpsi pada permukaan adsorben. Oleh karena itu, penggunaan adsorben berpori dalam sistem ozonasi dapat meningkatkan kinetika reaksi oksidasi sekaligus efisiensi pengolahan limbah cair industri [25][26].



Gambar 3. Skema Mekanisme Katalitik Ozonasi pada Permukaan Adsorben
Sumber : [26]

3.4 Karakteristik Adsorben dalam Kombinasi Proses Adsorpsi - Ozonasi

Karakteristik adsorben berperan penting dalam menentukan efektivitas proses adsorpsi–ozonasi pada pengolahan limbah cair. Karakterisasi dilakukan untuk mengetahui sifat fisik, kimia, dan struktur material adsorben serta memahami interaksinya dengan polutan. Metode seperti SEM, EDX, XRD, XRF, BET, FTIR, TEM, dan XPS digunakan untuk menganalisis morfologi, komposisi unsur, struktur kristal, luas permukaan, dan sifat kimia adsorben. **Tabel 1** menunjukkan metode karakterisasi yang umum digunakan dalam penelitian adsorpsi–ozonasi.

Tabel 1. Karakteristik Material Adsorben dalam Kombinasi Proses

No	Metode Karakterisasi	Tujuan	Mekanisme / Prinsip Kerja	Hasil Informasi	Sumber
1	SEM (<i>Scanning Electron Microscopy</i>)	Menganalisis morfologi permukaan dan struktur pori GAC	Berkas elektron ditembakkan ke permukaan sampel dan elektron pantul dideteksi untuk membentuk citra	Bentuk partikel, ukuran, distribusi pori dan morfologi permukaan adsorben	[27] [28]
2	EDX (<i>Energy Dispersive X-ray Spectroscopy</i>)	Menentukan komposisi unsur material bentonite clay / carbon nanotube (CNT)	Elektron mengenai sampel menghasilkan sinar-X karakteristik dari unsur penyusun	Komposisi unsur seperti Fe, Si, Al, O, Na dan unsur lainnya	[29]
3	XRD (<i>X-Ray Diffraction</i>)	Mengidentifikasi struktur kristal karbon amorf dan fase mineral adsorben karbon aktif	Sampel ditembakkan sinar-X dan pola difraksi dianalisis	Struktur kristal, tingkat kristalinitas dan identifikasi fase mineral	[30] [31]
4	XRF (<i>X-Ray Fluorescence</i>)	Menentukan komposisi kimia pada material Magnetic nano berbasis Fe ₃ O ₄ .	Sinar-X menghasilkan fluoresensi unsur yang dianalisis spektrumnya	Kandungan unsur seperti SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	[32]
5	BET (<i>Surface Area Analysis</i>)	Menentukan luas permukaan spesifik adsorben dari sludge instalasi pengolahan air	Adsorpsi gas nitrogen pada permukaan material dianalisis menggunakan metode BET	Luas permukaan spesifik, volume – ukuran, distribusi pori adsorben	[33]
6	FTIR (<i>Fourier Transform</i>)	Mengidentifikasi gugus fungsi pada permukaan adsorben berbasis karbon	Penyerapan radiasi inframerah oleh ikatan kimia menghasilkan spektrum karakteristik	Gugus fungsi seperti –OH, –COOH dan lain,	[34]

No	Metode Karakterisasi	Tujuan	Mekanisme / Prinsip Kerja	Hasil Informasi	Sumber
	Infrared Spectroscopy)			berperan dalam interaksi adsorpsi.	
7	XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy)	Menganalisis komposisi kimia dan keadaan oksidasi unsur Fe pada Fe ₃ O ₄ karbon aktif	Sinar-X memancarkan fotoelektron dari permukaan material	Komposisi kimia permukaan dan keadaan oksidasi unsur terikat	[35]
8	VSM (Vibrating Sample Magnetometer)	Menentukan sifat magnetik material pada Fe ₃ O ₄ magnetic nanocomposite	Sampel digetarkan dalam medan magnet untuk mengukur magnetisasi	Sifat magnetik material seperti Fe ₃ O ₄	[36]
9	AFM (Atomic Force Microscopy)	Menganalisis topografi permukaan material pada skala nano partikel adsorben	Probe mikroskopik memindai permukaan sampel	Kekasaran permukaan, distribusi dan struktur nano material	[37]

Berdasarkan karakterisasi **Tabel 1**, analisis SEM menunjukkan bahwa adsorben memiliki morfologi permukaan berpori dan tidak beraturan yang menghasilkan luas permukaan tinggi sehingga mendukung peningkatan kapasitas adsorpsi terhadap polutan [27], [28]. EDX mengidentifikasi unsur utama seperti Fe, Si, Al, dan O yang berperan dalam interaksi elektrostatis serta mekanisme pertukaran ion [29]. Selanjutnya, XRD menunjukkan keberadaan fase kristalin yang mencerminkan kestabilan struktur material [30], [31], sementara XRF mengungkap komposisi oksida utama seperti SiO₂, Al₂O₃, dan Fe₂O₃ yang mempengaruhi sifat kimia permukaan adsorben [32]. Analisis BET menunjukkan luas permukaan spesifik yang tinggi dan distribusi pori yang berkembang baik, sehingga meningkatkan kapasitas adsorpsi melalui mekanisme difusi dan *pore filling* [33]. FTIR mengidentifikasi gugus fungsi aktif seperti –OH dan –COOH yang berperan dalam interaksi kimia antara adsorben dan polutan [34]. Selain itu, XPS memberikan informasi mengenai komposisi kimia permukaan dan keadaan oksidasi unsur yang berkontribusi pada aktivitas katalitik dalam proses ozonasi [35]. VSM menunjukkan sifat magnetik pada material yang mengandung Fe₃O₄ sehingga memudahkan pemisahan adsorben setelah proses pengolahan [36], sedangkan AFM mengungkap topografi permukaan dan distribusi ukuran partikel pada skala nano [37].

3.5 Aplikasi Kombinasi Proses Adsorpsi-Ozonasi dalam Penurunan Kadar Limbah

Berdasarkan **Tabel 2**, berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan beberapa material adsorben dalam menurunkan kadar polutan. Parameter umum yang digunakan dalam proses adsorpsi - ozonasi meliputi jumlah massa adsorben, konsentrasi awal polutan, waktu kontak, kondisi operasi pada ozonasi, serta efisiensi penurunan limbah. Parameter-parameter tersebut memengaruhi interaksi antara permukaan adsorben, ozon, dan molekul polutan sehingga menentukan efektivitas proses dalam menurunkan kadar limbah. Berbagai material seperti zeolit alam, zeolit sintesis, zeolit termodifikasi, serta karbon aktif telah dilaporkan memiliki potensi yang baik sebagai media adsorben dalam sistem kombinasi adsorpsi–ozonasi untuk meningkatkan penurunan polutan organik dalam air limbah.

Tabel 2. Rangkuman Kajian Kombinasi Proses Adsorpsi – Ozonasi berbagai Penurunan Limbah

No	Metode (Proses dan Jenis Material)	Parameter Limbah	Konsentrasi Awal Limbah	Massa Adsorben	Kondisi Operasi	Waktu Kontak (menit)	Efisiensi Penurunan (%)	Sumber
1	Ozone/GAC	TSS	1.630 mg/L	700 gram	Ozone 32ppm	180	97,17	[10]
2	Ozone katalitik FeSO ₄ .7H ₂ O	Warna	4.317 mg/L	100 gram	Ozone 60ppm + FeSO ₄ .7H ₂ O 2gram	180	99,98	[9]
3.	Ozonasi katalitik Ozon/GAC	COD Fenol	72 mg/L 55 mg/L	100 gram	Debit limbah 6 L/menit, laju udara 10 L/menit	120	50.91 55.56	[38]
4.	Adsorpsi GAC+ Ozonasi (O ₃)	CECs (mikropolutan organik)	-	2–30 mg/L	Dosis ozon 0.5–1.5 mg O ₃ /L	18	83	[39]
5.	Adsorptive ozonation (ZEO+ O ₃)	NH ₄ ⁺ -N	NH ₄ ⁺ -N awal ±47 mg/L	19 gram	Reaktor CSR, pH ±7.8–9, zeolit 0.2–0.5 mm	60	53.8	[40]

No	Metode (Proses dan Jenis Material)	Parameter Limbah	Konsentrasi Awal Limbah	Massa Adsorben	Kondisi Operasi	Waktu Kontak (menit)	Efisiensi Penurunan (%)	Sumber
6.	Fotokatalisis AgIO ₄ /ZnO nanopartikel	Indigo carmine dye	5×10 ⁻⁵ mol/L	0.1 gram	UV irradiation	180	97.2	[41]
7.	O ₃ + (GAC/WG12)	DOC	2.27 – 5.71 gC/m ³	-	Dosis ozon 1.2 g O ₃ /m ³ , debit sistem 3 m ³ /jam	17 – 19	28.4 – 90.2	[42]
8.	Adsorpsi karbon aktif+ ozonasi (O ₃ /AC)	COD	396 mg/L	10g/3L	pH 7.9, suhu 33 ± 2°C, dosis ozon 0.98 mg/min	60	39.4	[43]
9.	Rommana Clay (RGC)+ ozonasi	Green COD TSS Warna	1400 mg/L 1580 mg/L 200 mg/L	7g/L	pH 3.98 (adsorpsi), ozonasi pada pH 10	89	72.4 89.3 98.2	[44]
10	Adsorpsi Ozonasi O ₃	GAC– COD TOC	205 mg/L 28 mg/L	CeO ₂ : 0.1g MgO : 5 g/L SnO ₂ : 2.5 g/L	-	30	89 79	[45]
11	Adsorpsi Canna teraktivasi Ozonasi O ₃	biochar indica KOH +	±2100	2.5 g/L	pH 8, ozonasi ±79 mL/min	1020 (≈17 jam)	96.67	[12]
12	Katalitik Fe ₃ O ₄ -GAC	ozonasi Methylparaben (MP)	50 mg/L	1g/L	pH 9	5	98	[22]

Proses adsorpsi dan ozonasi telah banyak dikombinasikan dalam pengolahan limbah cair karena mampu meningkatkan efektivitas degradasi polutan organik maupun anorganik. Dalam sistem ini, ozon berperan sebagai oksidator kuat yang mampu memecah senyawa organik kompleks menjadi molekul yang lebih sederhana, sedangkan adsorben seperti *Granular Activated Carbon* (GAC) atau zeolit membantu menyerap produk antara hasil oksidasi serta meningkatkan transfer massa ozon dalam larutan. Penggunaan GAC pada sistem ozonasi katalitik dilaporkan mampu menurunkan COD hingga 50,91% dan fenol sebesar 55,56% dalam waktu kontak 120 menit [38]. Kombinasi adsorpsi GAC dengan ozonasi juga menunjukkan kemampuan yang baik dalam menghilangkan *contaminants of emerging concern* (CECs) dengan efisiensi sekitar 83% dalam waktu 18 menit pada dosis ozon 0,5–1,5 mg O₃/L [39]. Selain itu, penggunaan zeolit dalam proses *adsorptive ozonation* mampu mengurangi konsentrasi NH₄⁺-N hingga 53,8% pada pH sekitar 7,8–9, yang menunjukkan bahwa struktur mikropori zeolit dan kemampuan pertukaran ionnya dapat mendukung proses adsorpsi sekaligus mempercepat reaksi oksidasi ozon dalam sistem pengolahan limbah [40].

Beberapa material adsorben lain juga menunjukkan performa yang tinggi dalam kombinasi dengan ozonasi. Sistem O₃ yang dikombinasikan dengan karbon aktif atau material katalitik lainnya dilaporkan mampu menurunkan DOC sebesar 28,4–90,2% tergantung kondisi operasi dan konsentrasi awal limbah [42], sedangkan kombinasi adsorpsi karbon aktif dan ozonasi pada limbah dengan COD awal 396 mg/L menghasilkan efisiensi penurunan sekitar 39,4% [43]. Penggunaan material lain seperti *Rommana Green Clay* (RGC) yang dipadukan dengan ozonasi mampu menurunkan COD, TSS, dan warna masing-masing hingga 72,4%, 89,3%, dan 98,2% [44]. Bahkan pada sistem katalitik berbasis komposit seperti Fe₃O₄-GAC, efisiensi degradasi senyawa organik seperti *methylparaben* dapat mencapai 98% hanya dalam waktu 5 menit [22]. Sementara itu, penggunaan *biochar canna indica* teraktivasi KOH yang dikombinasikan dengan ozonasi mampu menurunkan COD hingga 96,67%, meskipun memerlukan waktu reaksi yang lebih lama [12]. Hasil-hasil tersebut menunjukkan bahwa karakteristik material adsorben, kondisi operasi, serta jenis polutan sangat mempengaruhi kinerja proses adsorpsi-ozonasi dalam pengolahan limbah cair.

4. Kesimpulan

Pengolahan limbah cair batik dan industri sejenis yang mengandung zat warna sintetis dan senyawa organik kompleks memerlukan teknologi yang efektif. Kombinasi adsorpsi–ozonasi menunjukkan kinerja yang baik karena ozonasi mendegradasi polutan melalui pembentukan radikal hidroksil (*OH), sementara

adsorpsi oleh material berpori seperti zeolit dan *Granular Activated Carbon* (GAC) menangkap residu polutan dan produk antara oksidasi. Karakteristik adsorben seperti struktur berpori, luas permukaan tinggi, komposisi unsur, serta keberadaan gugus fungsi aktif, yang dianalisis melalui metode SEM, EDX, XRD, XRF, BET, FTIR, XPS, VSM, dan AFM, berperan penting dalam meningkatkan kapasitas adsorpsi dan aktivitas katalitik. Integrasi kedua proses menghasilkan efek sinergis yang meningkatkan transfer massa dan efisiensi reaksi. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa metode ini mampu menurunkan parameter pencemar seperti warna, COD, TOC, TSS, BOD, dan TDS secara signifikan, sehingga berpotensi menjadi teknologi yang efektif dan berkelanjutan untuk pengolahan limbah cair batik dan limbah industri lainnya.

5. Referensi

- [1] K. Sathya, K. Nagarajan, G. C. G. Malar, S. Rajalakshmi, and P. Raja, "A Comprehensive Review on Comparison Among Effluent Treatment Methods for Industrial Wastewater Effluent from Different Sources", *Appl Water Sci*, vol. 21, no. 4, pp. 70, Maret 2022, doi: [10.1007/s13201-022-01594-7](https://doi.org/10.1007/s13201-022-01594-7)
- [2] N. Kaur, P Kaur, A. Awasthi, S. Das, M. Bansal, K. Kaur, S.K. Nippani, and A. Lodh, , "Mitigating Dye and Organic Pollutant-driven Surface Water Pollution Using ZnO Nanoparticles : a Sustainable Strategy for Climate Resilience" *Frontiers in Environmental Science*, vol. 13, 2025. doi: 10.3389/fenvs.2025.1656031.
- [3] M. Hu and J. Hao, "Adsorption Technologies in Wastewater Treatment Processes," *Water*, vol. 15, no. 15, August 2025, DOI:[10.3390/w17152335](https://doi.org/10.3390/w17152335)
- [4] B. G. F. Mbanga, O.P Onotu, and Z. T. Ngeva "Advantages of The Reuse of Spent Adsorbents and Potential Environmental Applications", *Green Analytical Chemistry*, vol. 11, pp. 100156, 2024, doi: 10.1016/j.greeac.2024.100156
- [5] M. W. Ackley, S. U. Rege, and H. Saxena, "Application of Natural Zeolites in the Purification and Separation of Gases," *Microporous Mesoporous Materials*, vol. 61, no. 1–3, pp. 25–42, 2003, doi: 10.1016/S1387-1811(03)00353-6.
- [6] V. Gunten, "Ozonation of Drinking Water: Part I. Oxidation Kinetics Product Formation," *Water Research*, vol. 37, no. 7, pp. 1443, 2003, doi: 10.1016/S0043-1354(02)00457-8
- [7] B. K. Hordern, M. Ziólek, and J. Nawrocki, "Catalytic Ozonation and Methods of Enhancing Molecular Ozone Reactions in Water Treatment," *Water Research*, vol. 37, no. 15, pp. 3583–3591, 2023, doi: 10.1016/S0043-1354(03)00248-6
- [8] J. Nawrocki and B. K. Hordern, "The Efficiency and Mechanisms of Catalytic Ozonation," *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 99, no. 1–2, pp. 27–42, 2020, doi: 10.1016/j.apcatb.2010.06.033
- [9] Khairunnisa, Arya R. Fajar A., "Penurunan Kadar COD dan Warna pada Limbah Artifisial Batik Zat Warna Turunan Azo menggunakan Metode Adsorpsi Arang Aktif dan Ozonasi + FeSO₄.7H₂O", *Jurnal Teknik Lingkungan*, Vol. 6, No. 3, hh. 1-10, 2017
- [10] T. Estikarini, "Kombinasi Proses Ozonasi dan Adsorpsi untuk Pengolahan Limbah Tekstil," *Jurnal Teknik Lingkungan*, vol. 9, no. 2, pp. 77–85, 2016
- [11] C. Ferreira, A. de Luis, N. Villota, J. M. Lomas, J. I. Lombrana, and L. M. Camarero, "Application of a Combined Adsorption–Ozonation Process for Phenolic Wastewater Treatment in a Continuous Fixed Bed Reactor" *Catalysts*, vol. 11, pp. 11081014, 2021, doi: 10.3390/catal11081014
- [12] V. K. U. Shah, R. Patel, S. Mehta, and A. Kumar, "Response Surface Methodology for Predicting COD and Colour Decrease Real-time textile wastewater ozonation by adsorption upon activated Canna Indica biochar", *Research Square*, pp. 1–18, 2025, doi: 10.21203/rs.3.rs-5956236/v1.
- [13] E. Nabavi, M. Sabour, and G. A. Dezvareh, "Ozone treatment and adsorption with granular activated carbon for the removal of organic compounds from agricultural soil leachates," *Journal of Cleaner Production*, vol. 335, p. 130312, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.130312.
- [14] M. Sprynskyy, B. Buszewski, A. P. Terzyk, and J. Namieśnik, "Study of the Selection Mechanism of Heavy Metal (Pb²⁺, Cu²⁺, Ni²⁺, and Cd²⁺) Adsorption on Clinoptilolite," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 304, no. 1, pp. 21–28, 2016, doi: 10.1016/j.jcis.2006.07.068.
- [15] C. Belviso, "State-of-the-art Applications of Fly Ash from Coal and Biomass: A focus on Zeolite Synthesis Processes and Issues," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 65, pp. 109–135, 2018, doi: 10.1016/j.peccs.2017.10.004.
- [16] S. Wang and Y. Peng, "Natural Zeolites as Effective Adsorbents in Water and Wastewater Treatment," *Chemical Engineering Journal*, vol. 156, pp. 11–24, 2015, doi: 10.1016/j.cej.2009.10.029

- [17] A. B. Hernández-Montoya, D. I. Mendoza-Castillo, and M. A. Bonilla-Petriciolet, "Competitive Adsorption of Dyes and Heavy Metals on Zeolitic Materials," *Journal of Environmental Management*, vol. 116, pp. 216, 2023, doi: 10.1016/j.jenvman.2012.12.010
- [18] L. González-Rodríguez, "Exploring the Adsorption of Emerging Pollutants on Activated Carbon : A Theoretical Approach" *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 12, pp. 112911, 2024, doi: 10.1016/j.jwpe.2024.112911
- [19] Quintas Salamba, Mauricio, et al. "Porosity of activated carbon in water remediation: a bibliometric review and overview of research perspectives." *ACS ES&T Water* 5.5 (2025): 2070-2086.
- [20] M. S. Muzarpar, A. M. Leman, K. A. Rahman, N. Maghpor, N.N. Mat Hassan, N. Misdan "The Adsorption Mechanism of Activated Carbon and Its Application – A Review," *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, vol. 9, no. 5, pp. 1–6, 2020, doi : 10.37869/ijatec.v1i3.37
- [21] P. Liu *et al.*, "Adsorption Mechanism of High-Concentration Ammonium by Natural Zeolite: Experimental and Theoretical Computation," *Water*, vol. 14, no. 15, 2022, doi: 10.3390/w14152413
- [22] B. Ahmadi, A. Azhdarpoor, and M. Hoseini, "Enhanced Paraben Removal Through Synergistic Catalytic Ozonation and Adsorption Processes using Fe₃O₄-GAC Magnetic Composite", *Applied Water Science*, vol. 15, No. 124, 2025, doi: 10.1007/s13201-025-02475-5.
- [23] E. F. Karamah, R. Hidayat, and M. R. Wibowo, "Combination of Ozonation and Adsorption using Granular Activated Carbon (GAC) for Tofu Industry Wastewater Treatment," *Indonesian Journal of Chemistry*, vol. 18, no. 4, pp. 600–606, 2018, DOI:[10.22146/ijc.26724](https://doi.org/10.22146/ijc.26724)
- [24] J. Yang, L. Fu, F. Wu, "Recent Developments in Activated Carbon Catalysts Based on Pore Size Regulation in Catalytic Ozonation," *Catalysts*, vol. 12, no. 10, 2022, doi: 10.3390/catal12101085.
- [25] J. A. G. Cardenas, B. E. García, A. Agüera, J. A. S. Pérez, and F. M. Agugliaro, "Wastewater Treatment by Advanced Oxidation Processes and Their Worldwide Research Trends," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17, no. 1, p. 170, 2019, doi: 10.3390/ijerph17010170.
- [26] Y. Guo, L. Yang, and X. Wang, "The Application and Reaction Mechanism of Catalytic Ozonation in Water Treatment," *Journal of Environmental & Analytical Toxicology*, vol. 2, no. 6, 2022, doi: 10.4172/2161-0525.1000150
- [27] J. Rivera-Utrilla, M. Sánchez-Polo, V. Gómez-Serrano, P. M. Alvarez, M. C. M. Alvim-Ferraz, and J. M. Dias, "Activated carbon modifications to enhance its water treatment applications," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 187, no. 1–3, pp. 1–23, 2011.
- [28] Thakur, Abhinay, Ashish Kumar, and Ambrish Singh. "Adsorptive removal of heavy metals, dyes, and pharmaceuticals: Carbon-based nanomaterials in focus." *Carbon* 217 (2024): 118621.
- [29] S. M. Al-Hamadi, A. A. Ibrahim, and M. A. Abdullah, "Bentonite-clay/CNT-based nano adsorbent for textile wastewater treatment," *Water*, vol. 15, no. 18, p. 3197, 2023, doi: 10.3390/w15183197.
- [30] R. Ruspita, A. Hidayat, and S. Rahmawati, "Karbon aktif dari kulit durian sebagai adsorben untuk menurunkan kadar COD pada limbah cair," *Jurnal Kimia dan Kemasan*, vol. 46, no. 1, pp. 15–22, 2024.
- [31] A. H. Setiawan, M. T. Nugraha, and S. P. Wibowo, "Surface area analysis of activated carbon material from palm frond," *Indonesian Journal of Applied Physics*, vol. 13, no. 2, pp. 120–128, 2023.
- [32] S. A. Mahmoud, H. M. Hassan, and A. A. Ibrahim, "Preparation and characterization of a magnetic nano adsorbent for wastewater treatment," *PLOS ONE*, vol. 20, no. 3, 2025, doi: 10.1371/journal.pone.0329686.
- [33] M. Shumiye, M. A. Alemayehu, and T. Tadesse, "Preparation of an activated adsorbent from water treatment plant sludge for phosphate removal," *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, vol. 14, no. 2, pp. 122–131, 2024, doi: 10.2166/washdev.2024.220.
- [34] M. Thommes, "Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution," *Pure and Applied Chemistry*, vol. 87, no. 9–10, pp. 1051–1069, 2015, doi: 10.1515/pac-2014-1117.
- [35] C. Zhang, L. Wang, and Y. Chen, "Magnetic activated carbon for wastewater treatment: preparation, characterization and adsorption performance," *Chemical Engineering Journal*, vol. 356, pp. 319–328, 2019, doi: 10.1016/j.cej.2018.12.019.
- [36] Y. Zhang, X. Li, and J. Wang, "Application of magnetic nanocomposites in water treatment: Core-shell Fe₃O₄ adsorbents for Cr(VI) removal," *Water*, vol. 15, no. 15, p. 2827, 2023, doi: 10.3390/w15152827.

- [37] S. Bhattacharjee, "Application of light scattering techniques for nanoparticle characterization," *Frontiers in Chemistry*, vol. 6, p. 237, 2018, doi: 10.3389/fchem.2018.00237.
- [38] F. Ikhsandy, S. Bismo, and E. F. Karamah, "Aplikasi Teknik Ozonasi Katalitik Skala Semi Pilot menggunakan Ultra Violet (UV) dan Granular Activated Carbon (GAC) dalam Penyisihan Limbah Fenol, Chemical Oxygen Demand (COD) dan 1,1,2,2-Tetrakloroetana," *Reka Buana: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Teknik Kimia*, vol. 7, no. 1, pp. 1–15, 2022, doi: 10.33366/rekabuana.v7i1.2854.
- [39] B. Cantoni, J. Ianes, B. Bertolo, S. Ziccardi, F. Maffini, and M. Antonelli, "Adsorption on activated carbon combined with ozonation for the removal of contaminants of emerging concern in drinking water," *Journal of Environmental Management*, vol. 350, p. 119537, 2024, doi: 10.1016/j.jenvman.2023.119537.
- [40] J. Derco, N. Šoltýsová, R. Zakhar, and J. Jurík, "Research on Ammonium Removal from Wastewater by Adsorption and Ozonation Processes," *Green Energy and Environmental Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 1–20, 2024, doi: 10.5772/geet.29.
- [41] R. Abdel-Aziz, M. A. Ahmed, and M. F. Abdel Messih, "A novel UV and visible light driven photocatalyst AgIO₄/ZnO nanoparticles with highly enhanced photocatalytic performance for removal of rhodamine B and indigo carmine dyes," *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, vol. 390, p. 112245, 2019, doi: 10.1016/j.jphotochem.2019.112245.
- [42] M. Wolska, J. Machi, S. Szerzyna, M. Mołczan, W. Adamski, and J. Wiśniewski, "Effect of ozonation on organic substance removal efficiency during adsorption," *Desalination and Water Treatment*, vol. 117, pp. 101–107, 2018, doi: 10.5004/dwt.2018.22166.
- [43] A. Ikhlmaq, T. Aslam, A. M. Zafar, F. Javed, and H. M. S. Munir, "Combined ozonation and adsorption system for the removal of heavy metals from municipal wastewater: effect of COD removal," *Desalination and Water Treatment*, vol. 159, pp. 304–309, 2019, doi: 10.5004/dwt.2019.24164.
- [44] K. Hendaoui, S. Ben Ayed, L. Mansour, A. Ben Othman, and F. Ayari, "Decontamination of textile effluents via the adsorption process on various raw clay minerals enhanced by ozonation: a modeling approach and optimization," *RSC Advances*, vol. 14, pp. 37803–37819, 2024, doi: 10.1039/d4ra03757j.
- [45] X. Li, L. Fu, F. Chen, S. Zhao, J. Zhu, and C. Yin, "Application of Heterogeneous Catalytic Ozonation in Wastewater Treatment: An Overview," *Catalysts*, vol. 13, no. 2, p. 342, 2023, doi: 10.3390/catal13020342.
- [46] J. Pavlović and N. Rajić, "Clinoptilolite An Efficient Carrier for Catalytically Active Nano Oxide Particles," *Minerals*, vol. 13, no. 7, pp. 877, 2023. DOI: 10.3390/min13070877.
- [47] Y.-Z. Yu, J.-G. Guo, and L.-J. Zhou, "Theoretical investigation on the adsorption and diffusion of lithium-ion on and between graphene layers with size and defect effects," *Adsorption Science & Technology*, vol. 34, no. 2–3, pp. 212–226, 2016. DOI: 10.1177/0263617415623429.
- [48] H. Zhang, L. Chen, M. Lu, J. Bao, and L. Han, "A novel film–pore–surface diffusion model to explain the enhanced enzyme adsorption of corn stover pretreated by ultrafine grinding," *Biotechnology for Biofuels*, vol. 9, no. 1, p. 181, 2016, doi: 10.1186/s13068-016-0602-2.
- [49] M. Voigt, A. Wirtz, K. Hoffmann-Jacobsen, and M. Jaeger, "Prior art for the development of a fourth purification stage in wastewater treatment plant for the elimination of anthropogenic micropollutants A short review," *AIMS Environmental Science*, vol. 7, no. 1, pp. 69–98, 2020, doi: 10.3934/environsci.2020005.