JURNAL PENDIDIKAN DAN APLIKASI INDUSTRI
Vol. 13 No. 2 2026 : 182 - 192
p-ISSN : 0126 – 4036 e-ISSN : 2716 – 0416

Kajian Efektivitas Koagulasi-Flokulasi, Oksidasi Lanjutan, dan Elektrokoagulasi dalam Pengolahan Limbah Tekstil

Alin Erlita Nurfatiha[1], Rima Wahyudyanti[2] dan Machrunnisa[3]

[1,2,3]*Teknik Lingkungan, Universitas Islam Syekh-Yusuf, Tangerang, Indonesia*

[1]a.nurfatiha@unis.ac.id, [2] rima.wahyudyanti@unis.ac.id, [3]machrunnisa@unis.ac.id

Article History:
Received 08 July 2026
Revised 15 Oct 2026
Accepted 27 Oct 2026
Available online 29 Oct 2026

Abstrak
Limbah cair industri tekstil merupakan salah satu sumber pencemaran air yang mengandung zat warna, senyawa organik, padatan tersuspensi, dan logam berat. Karakteristik tersebut menyebabkan peningkatan parameter warna, *chemical oxygen demand* (COD), *biochemical oxygen demand* (BOD), *total suspended solids* (TSS), dan toksisitas lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas metode koagulasi-flokulasi, oksidasi lanjutan, dan elektrokoagulasi dalam pengolahan limbah cair industri tekstil. Metode penelitian yang digunakan adalah *systematic literature review* dengan pendekatan PRISMA melalui tahapan identifikasi, penyaringan, kelayakan, dan inklusi artikel ilmiah dari database Google Scholar, ScienceDirect, SpringerLink, MDPI pada rentang tahun 2019–2026. Hasil kajian menunjukkan bahwa koagulasi-flokulasi efektif sebagai tahap awal dalam menurunkan TSS dan warna, namun terbatas dalam degradasi senyawa organik kompleks. Oksidasi lanjutan seperti Fenton, photo-Fenton, dan ozonasi efektif dalam menurunkan warna dan COD melalui pembentukan radikal hidroksil. Elektrokoagulasi menunjukkan kinerja lebih komprehensif karena mampu menurunkan warna, COD, TSS, dan logam berat secara simultan. Kesimpulannya, tidak terdapat satu metode yang paling optimal, sehingga kombinasi beberapa proses merupakan pendekatan terbaik dalam pengolahan limbah cair industri tekstil.

Kata Kunci : elektrokoagulasi, koagulasi-flokulasi, limbah tekstil, oksidasi lanjutan, SLR

Abstract
Textile industry wastewater is one of the major sources of water pollution containing dyes, organic compounds, suspended solids, and heavy metals. These characteristics lead to high levels of color, chemical oxygen demand (COD), biochemical oxygen demand (BOD), total suspended solids (TSS), and environmental toxicity. This study aims to analyze the effectiveness of coagulation-flocculation, advanced oxidation processes, and electrocoagulation in treating textile wastewater. A systematic literature review (SLR) approach using PRISMA was applied, involving identification, screening, eligibility, and inclusion of scientific articles from databases such as Google Scholar, ScienceDirect, SpringerLink, and MDPI within the period 2019–2026. The results indicate that coagulation-flocculation is effective as a pretreatment for removing TSS and color but is limited in degrading complex organic compounds. Advanced oxidation processes such as Fenton, photo-Fenton, and ozonation are effective in degrading color and COD through hydroxyl radical formation. Electrocoagulation shows more comprehensive performance by simultaneously removing color, COD, TSS, and heavy metals. In conclusion, no single method is optimal for all parameters; therefore, a combined treatment approach is the most effective strategy for textile wastewater treatment.

Keywords *: advanced oxidation, coagulation-flocculation, electrocoagulation, textile wastewater, SLR*

1. Pendahuluan

Sektor manufaktur tekstil dikenal sebagai salah satu industri yang mengonsumsi air dan senyawa kimia dalam skala masif, khususnya pada tahapan pencucian, pemasakan, pemutihan, pewarnaan, pencetakan, hingga penyempurnaan akhir produk. Konsekuensi dari intensitas proses tersebut adalah terbentuknya limbah cair berkarakteristik kompleks yang mengandung polutan berupa zat warna, agen aktif permukaan (*surfaktan*), garam anorganik, bahan pembantu tekstil, padatan tersuspensi, materi organik terlarut, hingga polutan logam berat. Secara umum, efluen tekstil diidentifikasi melalui intensitas warna yang pekat, tingginya angka *chemical oxygen demand* (COD), fluktuasi *biochemical oxygen demand* (BOD), tingginya *total suspended solids* (TSS), serta nilai pH yang tidak konstan. Keberadaan logam berat spesifik di dalamnya biasanya bersumber dari zat pewarna maupun formulasi bahan aditif selama proses produksi. Karakteristik yang sangat dinamis ini—tergantung pada jenis serat, zat pewarna, teknologi operasional, dan jenis bahan kimia yang diaplikasikan—menyebabkan limbah tekstil sangat sulit didegradasi jika hanya mengandalkan satu metode pengolahan tunggal. Eskalasi pencemaran dari limbah cair tekstil terus menjadi isu krusial karena sifat pewarna sintetik, terutama golongan azo dan reaktif, yang memiliki ikatan kimia stabil sehingga resisten terhadap degradasi alami. Akumulasi zat warna pada badan air penerima secara langsung membatasi penetrasi sinar matahari, yang pada gilirannya menghambat proses fotosintesis biota akuatik dan merusak stabilitas ekosistem perairan. Di sisi lain, tingginya parameter COD dan BOD merefleksikan besarnya beban materi organik yang memicu deplesi oksigen terlarut. Keberadaan TSS memicu kekeruhan serta sedimentasi, sementara kontaminan logam berat seperti Cr, Cu, Pb, Zn, Cd, dan Ni memicu efek toksik yang berisiko mengalami bioakumulasi pada rantai makanan.

Guna mengatasi kompleksitas tersebut, kajian literatur terdahulu (*state of the art*) menunjukkan berbagai perkembangan teknologi pengolahan limbah tekstil melalui pendekatan fisik, kimia, biologi, maupun integrasi di antaranya. Yaseen dan Scholz (2019) menggarisbawahi bahwa sifat limbah sangat terikat pada jenis zat warna dan zat kimia yang diaplikasikan, sehingga strategi penanganan harus disesuaikan dengan polutan dominan yang terkandung. Senada dengan hal tersebut, Azanaw *et al* (2022) menegaskan bahwa kompleksitas efluen tekstil menuntut adopsi teknologi yang mampu mereduksi warna, senyawa organik, padatan, serta agen toksik secara simultan. Pendekatan biologis sejatinya lebih ramah lingkungan, namun kerap menemui jalan buntu saat berhadapan dengan pewarna sintetik yang bersifat persisten dan sukar terurai secara hayati. Di sisi lain, teknik fisik layaknya filtrasi, adsorpsi, dan teknologi membran mampu mereduksi padatan serta zat warna, tetapi fungsionalitasnya sebatas memindahkan kontaminan dari fase cair ke media pemisah tanpa mendegradasinya. Oleh sebab itu, metode kimiawi terus dikembangkan karena efektivitasnya dalam memicu destabilisasi koloid, presipitasi, oksidasi-reduksi, pembentukan radikal bebas, hingga reaksi elektrokimia. Tinjauan literatur mutakhir mengindikasikan bahwa proses kimiawi memegang peranan krusial dalam menyisihkan warna, COD, TSS, dan logam berat, baik sebagai pengolahan awal (*pretreatment*) maupun saat dipadukan dengan sistem kelanjutan (Ahsan *et al.*, 2023; Kallawar & Bhanvase, 2024; Tabish *et al.*, 2024).

Salah satu teknik kimiawi konvensional yang lazim diimplementasikan sebagai unit pengolahan awal adalah koagulasi-flokulasi. Menurut Aragaw dan Bogale (2023), efisiensi koagulasi-flokulasi sebagai tahapan awal terletak pada kapabilitasnya memangkas beban koloid dan partikel tersuspensi menggunakan koagulan seperti aluminium sulfat atau *polyaluminium chloride* (PAC) sebelum limbah dialirkan ke unit filtrasi atau pemurnian tingkat lanjut. Kendati demikian, kelemahan utama teknik ini adalah timbulnya lumpur kimiawi (*chemical sludge*) serta ketidakmampuannya dalam mengurai struktur pewarna secara total. Di sisi lain, teknologi oksidasi lanjut atau *advanced oxidation processes* (AOPs) menjadi fokus kajian yang intens karena mekanismenya mengandalkan pembentukan radikal hidroksil (· OH) berkekuatan oksidasi tinggi untuk memutuskan ikatan kromofor pewarna. Y. Zhang *et al.* (2021) menyebutkan bahwa AOPs menunjukkan performa superior dalam mendegradasi senyawa organik persisten pada efluen tekstil. Hal ini didukung oleh Tuncer dan Sonmez (2023) serta El-Gawad *et al.* (2024) yang membuktikan bahwa integrasi proses Fenton, UV/H_2O_2, dan foto-Fenton mampu mendegradasi COD dan warna secara signifikan, meskipun sistem ini memerlukan kontrol ketat terhadap kondisi asam dan dosis reagen. Metode oksidasi lainnya seperti ozonasi juga efektif

untuk dekolorisasi cepat, namun menurut Lin *et al.* (2023), ozonasi sering kali lebih efektif pada pemucatan warna ketimbang penurunan COD total, di samping kendala konsumsi energi yang tinggi.

Perkembangan signifikan juga ditunjukkan oleh metode elektrokimia, khususnya elektrokoagulasi dan elektrooksidasi. Louhichi *et al.* (2022) yang membandingkan performa elektrokoagulasi dan elektro-Fenton pada limbah tekstil menemukan bahwa intervensi elektrokimia mampu mengoptimalkan efisiensi penyisihan polutan secara *in situ*. Sobczak *et al.* (2024) juga menilai bahwa skema elektrokimia berpotensi besar mendukung program daur ulang efluen tekstil (*water reuse*), asalkan aspek biodegradabilitas dan toksisitas akhir turut dievaluasi. Dalam ruang lingkup domestik, Yuniarti dan Widayatno (2021) telah mengkaji reduksi parameter BOD, COD, dan TSS pada limbah tekstil lokal dengan sistem kombinasi elektrooksidasi-elektrokoagulasi, menandakan bahwa metode ini sangat relevan untuk dikembangkan. Sebagai tahapan penyempurna (*polishing treatment*), metode adsorpsi menggunakan karbon aktif atau material maju seperti *graphene oxide* sering kali diletakkan di bagian akhir proses untuk mengikat sisa warna dan logam berat *(Velusamy et al.*, 2021). Namun, Strebel *et al.* (2024) mengingatkan bahwa kinerja adsorpsi sangat dipengaruhi oleh fluktuasi pH dan kompetisi antar-ion, serta terganjal isu regenerasi material yang rumit.

Meskipun beberapa artikel ulasan telah membahas remediasi limbah tekstil secara makro seperti yang disajikan oleh Ahsan *et al.* (2023), Kallawar dan Bhanvase (2024), Pervez *et al.* (2022), serta Islam *et al.* (2025), namun telaah kritis yang secara spesifik melakukan komparasi performa komprehensif antarmetode kimiawi utama berdasarkan parameter multi-polutan sejauh ini masih sangat terbatas. Berdasarkan kesenjangan literatur (*literature gap*) tersebut, kebaruan ilmiah (*novelty*) dari artikel ulasan ini terletak pada pendekatan sintesis sistematis mengenai metode pengolahan kimiawi efluen tekstil dengan menjadikan karakteristik parameter pencemar utama sebagai basis komparasi utama. Kajian ini tidak sekadar mengompilasi teknologi yang ada, melainkan membedah secara mendalam komparasi mekanisme reaksi, target polutan spesifik, parameter operasional optimum, efisiensi penyisihan, batasan teknis tiap proses, hingga prospek implementasinya pada skala industri nyata melalui metodologi *Systematic Literature Review* (SLR).

Mengacu pada analisis kesenjangan literatur di atas, rumusan masalah penelitian yang ditelaah dalam kajian ini adalah bagaimana efektivitas komparatif dari metode koagulasi-flokulasi, *advanced oxidation processes* (AOPs), dan elektrokoagulasi dalam mereduksi parameter warna, COD, BOD, TSS, serta kandungan logam berat pada limbah cair industri tekstil. Sejalan dengan rumusan tersebut, artikel ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik fundamental limbah cair industri tekstil, mengidentifikasi prinsip fungsional dari teknologi pengolahan kimiawi yang dominan, melakukan komparasi performa antar-metode berdasarkan parameter polutan utama, serta merumuskan arah pengembangan teknologi pengolahan kimiawi yang lebih efisien, ekonomis, dan aplikatif untuk diimplementasikan pada skala industri.

2. Bahan dan Metode

Evaluasi terhadap efisiensi metode koagulasi-flokulasi, proses oksidasi lanjut, serta elektrokoagulasi dalam meremediasi limbah cair dari industri tekstil dilakukan dengan menerapkan metodologi *systematic literature review*. Pemilihan pendekatan ini didasarkan pada kapabilitasnya untuk menyajikan sintesis ilmiah yang komprehensif dan terstruktur dengan mengeksplorasi berbagai hasil studi terdahulu. Ruang lingkup analisis diprioritaskan pada kemampuan reduksi kontaminan terhadap parameter-parameter polutan krusial, yang mencakup intensitas warna, *chemical oxygen demand* (COD), *biochemical oxygen demand* (BOD), *total suspended solids* (TSS), hingga kandungan logam berat.

Pelaksanaan kajian ini melewati serangkaian tahapan sistematis, mulai dari determinasi topik utama, penelusuran literatur ilmiah, penapisan artikel, pengujian kelayakan data, ekstraksi informasi, hingga tahap analisis sintesis. Upaya menjamin akuntabilitas, transparansi, dan ketertelusuran dalam proses seleksi artikel, alur operasional penelitian ini dirancang dengan mengadopsi protokol standar *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA). Pendekatan PRISMA digunakan sebagai dasar alur seleksi artikel agar proses pemilihan literatur dapat dilakukan secara transparan, sistematis, dan dapat ditelusuri. Kerangka berpikir penelitian dimulai dari

identifikasi karakteristik limbah cair industri tekstil, kemudian dilanjutkan dengan analisis metode pengolahan kimia, evaluasi efektivitas penurunan parameter pencemar, dan perumusan peluang penerapan teknologi pada skala industri. Alur penelitian tergambarkan pada Gambar 1, alur tersebut digunakan untuk memastikan bahwa artikel yang dianalisis relevan dengan fokus kajian. Fokus utama penelitian ini adalah metode pengolahan kimia yang dapat menurunkan warna, COD, BOD, TSS, dan logam berat pada limbah cair industri tekstil.

Gambar 1. Alur penelitian *Systematic Literature Review* (SLR)

Sumber: Hasil rancangan penulis, 2026

Pencarian literatur dilakukan melalui beberapa database ilmiah, yaitu *Google Scholar, ScienceDirect, SpringerLink,* MDPI, *Frontiers,* DOAJ, Garuda, Neliti, dan portal OJS jurnal nasional. Literatur yang digunakan diprioritaskan pada artikel tahun 2019 sampai 2026 agar kajian mencerminkan perkembangan riset terbaru. Referensi yang terbit sebelum 2019, apabila tetap dicantumkan, hanya digunakan sebagai landasan konseptual dan tidak dihitung sebagai artikel yang memenuhi kriteria inklusi atau sebagai sumber data utama pada Tabel 2 sampai Tabel 6.

Kata kunci yang digunakan mencakup kata kunci bahasa Indonesia dan bahasa Inggris. Kombinasi kata kunci disusun berdasarkan objek kajian, metode pengolahan, dan parameter pencemar. Strategi pencarian literatur ditampilkan pada Tabel 1.

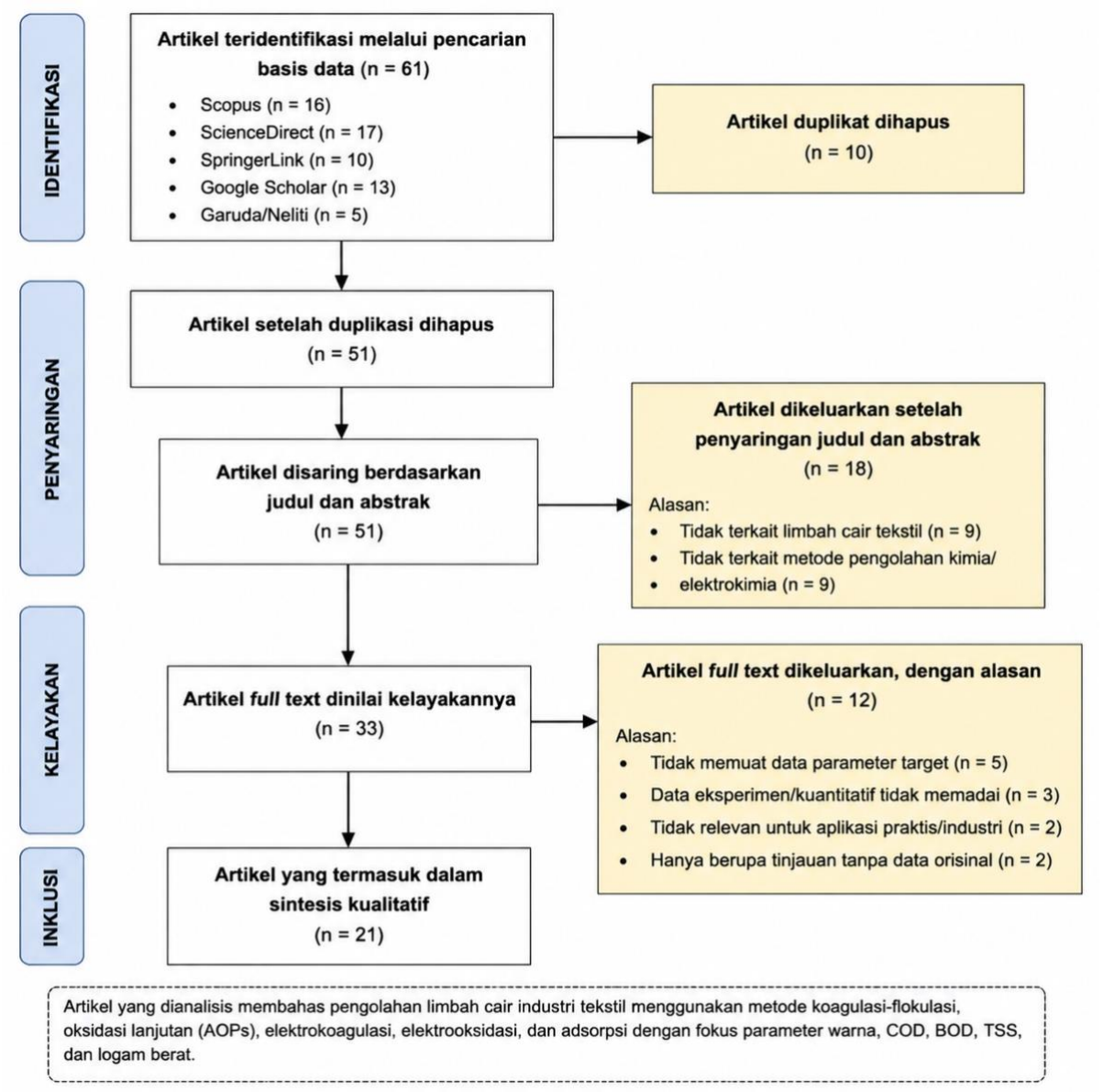
Tabel 1. Strategi pencarian literatur

Komponen Pencarian	Kata Kunci
Objek limbah	"textile wastewater", "dyeing wastewater", "limbah cair tekstil", "limbah industri tekstil", "limbah batik"
Koagulasi-flokulasi	"coagulation flocculation textile wastewater", "chemical coagulation textile effluent", "koagulasi flokulasi limbah tekstil"
Oksidasi lanjutan	"advanced oxidation process textile wastewater", "Fenton textile wastewater", "photo-Fenton textile wastewater", "ozonation textile wastewater"
Elektrokimia	"electrocoagulation textile wastewater", "electrooxidation textile wastewater", "electro-Fenton textile wastewater", "elektrokoagulasi limbah tekstil"
Parameter pencemar	"color removal", "COD removal", "BOD", "TSS", "heavy metal removal", "logam berat", "warna limbah tekstil"
Kombinasi kata kunci	"chemical treatment textile wastewater COD color removal", "textile wastewater treatment heavy metals", "pengolahan kimia limbah cair tekstil COD BOD TSS"

Sumber: Hasil rancangan penulis, 2026

Kata kunci disusun berdasarkan objek limbah, metode pengolahan, dan parameter pencemar yang dianalisis. Seleksi artikel dilakukan menggunakan pendekatan PRISMA yang meliputi tahap identifikasi, penyaringan, kelayakan, dan inklusi. Artikel yang dianalisis harus memenuhi kriteria: membahas limbah cair tekstil, menggunakan metode pengolahan kimia atau elektrokimia, serta memuat data parameter pencemar. Data yang diperoleh dari literatur kemudian dianalisis secara deskriptif-komparatif untuk membandingkan efektivitas setiap metode berdasarkan penurunan warna, COD, BOD, TSS, dan logam berat serta kondisi operasi yang digunakan. Proses pemilihan literatur dilakukan secara sistematis mengikuti pedoman PRISMA, sebagaimana

diilustrasikan pada Gambar 2. Seluruh data pada Tabel 2 sampai Tabel 6 merupakan data sekunder yang diekstraksi dari artikel-artikel yang memenuhi kriteria inklusi. Penelitian ini tidak melakukan pengujian laboratorium atau pengukuran langsung terhadap limbah tekstil. Label efektivitas seperti tinggi, sedang, atau rendah merupakan hasil sintesis kualitatif penulis dan tidak dimaksudkan sebagai hasil eksperimen baru. Perbedaan jenis limbah, dosis, pH, waktu kontak, konfigurasi reaktor, dan metode analisis antar penelitian juga dipertimbangkan dalam interpretasi.



Gambar 2. Diagram alir PRISMA proses seleksi artikel

Sumber: Hasil rancangan penulis, 2026

3. Hasil dan Pembahasan

Penelitian *Systematic Literature Review* (SLR) ini menunjukkan bahwa proses seleksi artikel dilakukan secara sistematis melalui beberapa tahap, yaitu identifikasi, penyaringan, kelayakan, dan inklusi. Pada tahap awal, sebanyak 61 artikel berhasil diidentifikasi dari berbagai *database* ilmiah seperti *Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, Google Scholar,* dan Garuda/Neliti. Selanjutnya, dilakukan penghapusan artikel duplikat sebanyak 10 artikel, sehingga tersisa 51 artikel untuk tahap penyaringan. Pada tahap screening berdasarkan judul dan abstrak, sebanyak 18 artikel dikeluarkan

karena tidak relevan dengan topik limbah cair industri tekstil serta tidak membahas metode pengolahan kimia atau elektrokimia.

Pada tahap kelayakan (*full text assessment*), sebanyak 12 artikel kembali dikeluarkan karena tidak memenuhi kriteria, seperti tidak memiliki data parameter pencemar, data kuantitatif yang tidak lengkap, tidak relevan dengan aplikasi industri, atau hanya berupa tinjauan tanpa data primer. Akhirnya, diperoleh 21 artikel yang memenuhi seluruh kriteria inklusi dan digunakan dalam sintesis kualitatif. Penelitian ini berhasil menyaring dan mensintesis 21 artikel ilmiah yang valid, sehingga memberikan dasar yang kuat untuk menganalisis efektivitas metode pengolahan kimia limbah cair industri tekstil berdasarkan parameter warna, COD, BOD, TSS, dan logam berat secara komparatif dan sistematis.

3.1 Karakteristik Limbah Cair Industri Tekstil

Hasil sintesis literatur menunjukkan bahwa limbah cair industri tekstil memiliki karakteristik kompleks yang dipengaruhi oleh jenis proses produksi, bahan baku, serta zat kimia yang digunakan. Secara umum, limbah tekstil mengandung zat warna sintetis, surfaktan, garam anorganik, senyawa organik terlarut, padatan tersuspensi, serta logam berat seperti Cr, Pb, Cd, Cu, dan Zn (Halepoto *et al*., 2022). Fenomena tingginya parameter warna menjadi indikator utama tingkat pencemaran karena zat warna tekstil (terutama golongan azo) memiliki struktur ikatan kromofor yang sangat stabil secara termal serta resisten terhadap degradasi fotolitik maupun mikrobiologis secara alami (Castellanos-Henriquez *et al.*, 2026). Nilai COD yang cenderung tinggi mengonfirmasi adanya akumulasi senyawa organik persisten kompleks di dalam air. Di sisi lain, nilai BOD yang relatif jauh lebih rendah menghasilkan rasio BOD/COD yang rendah. Fenomena ilmiah ini mengindikasikan sifat rendahnya biodegradabilitas limbah (Xiong & Wang, 2026). TSS menyebabkan kekeruhan ekstrem yang menghalangi penetrasi cahaya matahari ke badan air dan mengganggu fotosintetis akuatik, sementara keberadaan logam berat bersinggungan langsung dengan risiko toksisitas akut dan bioakumulasi (Franco *et al.,* 2026). Perbandingan karakteristik ini menunjukkan bahwa limbah cair tekstil tidak dapat diolah secara efektif dengan metode tunggal, sehingga diperlukan pendekatan pengolahan kimia yang terintegrasi (Franco *et al.,* 2026).

3.2 Efektivitas Koagulasi-Flokulasi

Koagulasi-flokulasi merupakan metode paling umum digunakan sebagai tahap awal (*pretreatment*) dalam pengolahan limbah cair industri tekstil. Mekanisme utama proses ini didasarkan pada prinsip elektrokimia dan gaya antarpartikel, yaitu destabilisasi koloid bermuatan negatif melalui netralisasi muatan oleh kation koagulan, disusul oleh pembentukan jembatan antarpartikel pada tahap pembentukan flok, dan diakhiri dengan sedimentasi akibat gaya gravitasi (Aragaw dan Bogale (2023).

Tabel 2. Efektivitas Koagulasi – flokulasi pada limbah tekstil

Parameter	Efektivitas	Catatan
Warna	Tinggi	Penghilangan zat warna koloid
TSS	Sangat tinggi	Pembentukan flok efektif
COD	Sedang	Hanya fraksi terikat
BOD	Sedang	Tidak mendegradasi organik kompleks
Logam berat	Sedang	Adsorpsi pada flok

Sumber: Aragaw dan Bogale (2023), Azanaw et al. (2022), serta Ahsan et al. (2023)

Berdasarkan analisis komparatif dengan penelitian terdahulu, efektivitas tinggi dalam penurunan warna dan TSS oleh metode koagulasi-flokulasi ini sejalan dengan temuan Liang *et al.* (2014) yang menyatakan bahwa koagulan berbasis logam (seperti Alum atau Fe) sangat responsif terhadap partikel tersuspensi dan zat warna jenis tidak terlarut (*disperse dyes*). Namun, keterbatasan utama metode ini sebagaimana dirangkum dalam Tabel 2 adalah ketidakmampuannya mendegradasi senyawa organik rantai panjang yang bersifat hidrofilik (larut air). Sehingga penurunan COD hanya berada pada tingkat sedang karena hanya mengikat fraksi organik yang teradsorpsi pada flok. Sehingga penurunan COD hanya berada pada tingkat sedang karena hanya mengikat fraksi organik yang teradsorpsi pada flok. Hal ini konsisten dengan studi Azanaw et al. (2022) yang menekankan bahwa senyawa azo terlarut

dengan berat molekul rendah tidak dapat diendapkan secara optimal melalui destabilisasi muatan sederhana. Selain itu, fenomena pembentukan lumpur kimia dalam *volume* besar menjadi kelemahan sekunder yang membutuhkan biaya pengelolaan lanjutan. Oleh karena itu, hasil sintesis ini menegaskan kembali hipotesis Zaharia dan Suteu (2012) bahwa koagulasi-flokulasi paling tepat diposisikan sebagai tahap awal sebelum dilanjutkan ke metode destruktif seperti oksidasi lanjutan (AOPs) atau elektrokoagulasi untuk memutus cincin aromatik polutan secara tuntas.

3.3 Efektivitas Oksidasi Lanjutan

Oksidasi lanjutan seperti Fenton, photo-Fenton, ozonasi, dan UV/H_2O_2 bekerja melalui pembentukan radikal hidroksil (•OH) yang memiliki daya oksidasi tinggi. Radikal ini mampu memutus ikatan azo, kromofor, dan struktur aromatik pada zat warna tekstil menjadi senyawa berantai pendek yang lebih ramah lingkungan (Castellanos-Henriquez *et al*., 2026). Hasil literatur menunjukkan bahwa Fenton dan photo-Fenton memiliki efektivitas tinggi dalam menurunkan warna dan COD pada kondisi optimum. Photo-Fenton memberikan kinerja lebih baik karena regenerasi Fe^{2+} dipercepat oleh cahaya (Xiong & Wang, 2026).

Ozonasi menunjukkan kemampuan dekolorisasi yang sangat cepat, namun penurunan COD tidak selalu sebanding karena terjadi oksidasi parsial (Castellanos-Henriquez *et al*., 2026). Kelemahan utama AOPs adalah kebutuhan kontrol pH, konsumsi oksidan, serta biaya operasional yang relatif tinggi (Xiong & Wang, 2026). Efektivitas oksidasi lanjutan terdapat pada Tabel 3.

Tabel 3. Efektivitas Oksidasi Lanjutan (AOPs)

Metode	Warna	COD	BOD	Catatan
Fenton	Tinggi	Tinggi	Sedang	pH asam
Photo-Fenton	Sangat tinggi	Sangat tinggi	Sedang	bantuan cahaya
Ozonasi	Sangat tinggi	Sedang	Sedang	dekolorisasi cepat
UV/H_2O_2	Tinggi	Tinggi	Sedang	energi tinggi

Sumber: Zhang et al. (2021), Tuncer dan Sonmez (2023), El-Gawad et al. (2024), serta Lin et al. (2023);

3.4 Efektivitas Elektrokoagulasi dan Elektrooksidasi

Elektrokoagulasi merupakan metode elektrokimia yang menghasilkan koagulan secara *in situ* melalui pelarutan elektroda aluminium atau besi. Ion logam yang terbentuk kemudian menghasilkan hidroksida yang mampu mengikat polutan. Elektrokoagulasi menunjukkan efektivitas tinggi dalam menurunkan warna, TSS, COD, dan logam berat secara simultan. Keunggulan utama metode ini adalah tidak memerlukan penambahan koagulan kimia eksternal dan meminimalkan akumulasi volume lumpur hingga 50% (Nigar & Kumar, 2026).

Elektrooksidasi lebih efektif untuk degradasi senyawa organik persisten melalui oksidasi langsung pada anoda atau pembentukan oksidator sekunder (Al-Jaberi *et al*., 2023). Namun, kedua metode memiliki keterbatasan berupa konsumsi energi listrik dan potensi pasivasi elektroda (Lebbe *et al*., 2026).

Tabel 4. Efektivitas elektrokoagulasi dan elektrooksidasi

Parameter	Elektrokoagulasi	Elektrooksidasi
Warna	Tinggi	Tinggi
COD	Tinggi	Tinggi
TSS	Tinggi	Rendah–Sedang
Logam berat	Sangat tinggi	Sedang
Efisiensi umum	70–98%	60–95%

Sumber: Louhichi et al. (2022), Yuniarti dan Widayatno (2021), Al-Jaberi et al. (2023), Nigar dan Kumar (2026), serta Lebbe et al. (2026)

3.5 Efektivitas Adsorpsi

Adsorpsi digunakan sebagai tahap akhir (*polishing treatment*) dalam pengolahan limbah cair industri tekstil. Material adsorben yang umum digunakan meliputi karbon aktif, biochar, zeolit, clay, dan polimer alami seperti *chitosan* (Halepoto *et al*., 2022). Adsorpsi sangat efektif untuk menurunkan warna dan logam berat melalui mekanisme pertukaran ion, ikatan hidrogen, kompleksasi, dan interaksi π-π. Namun, kapasitas adsorpsi terbatas dan membutuhkan regenerasi material secara berkala. Efektivitas adsorpsi terdapat pada Tabel 5.

Tabel 5. Efektivitas Adsorpsi

Parameter	Efektivitas	Catatan
Warna	Tinggi	interaksi elektrostatik
COD	Sedang	tergantung adsorben
BOD	Rendah–Sedang	tidak degradasi
Logam berat	Tinggi	kompleksasi ion
Regenerasi	Terbatas	saturasi adsorben

Sumber: Sintesis data sekunder dari Velusamy et al. (2021), Halepoto et al. (2022), dan Strebel et al. (2024)

Hasil sintesis menunjukkan bahwa setiap metode memiliki karakteristik yang berbeda dalam menurunkan parameter pencemar seperti pada Tabel 6.

Tabel 6. Perbandingan efektivitas metode pengolahan

Metode	Warna	COD	TSS	Logam Berat	Fungsi utama
Koagulasi-Flokulasi	Tinggi	Sedang	Sangat tinggi	Sedang	Pretreatment
Fenton/AOPs	Sangat tinggi	Tinggi	Rendah	Rendah	Degradasi organik
Ozonasi	Sangat tinggi	Sedang	Rendah	Rendah	Dekolorisasi
Elektrokoagulasi	Tinggi	Tinggi	Tinggi	Sangat tinggi	Multi-polutan
Elektrooksidasi	Tinggi	Tinggi	Rendah	Sedang	Oksidasi organik
Adsorpsi	Tinggi	Sedang	Sedang	Tinggi	Polishing

Sumber: Sintesis komparatif data sekunder pada Tabel 2 sampai Tabel 5

Hasil ini menunjukkan bahwa tidak ada satu metode yang mampu mengolah seluruh parameter secara optimal (Franco *et al*., 2026). Oleh karena itu, kombinasi proses menjadi pendekatan paling efektif untuk limbah cair industri tekstil. Berdasarkan hasil kajian, pola pengolahan limbah cair industri tekstil yang paling efektif adalah sistem kombinasi multi-tahap:

1. Koagulasi-flokulasi atau elektrokoagulasi sebagai tahap awal untuk menurunkan TSS dan warna
2. AOPs (Fenton, ozonasi, atau elektrooksidasi) untuk degradasi senyawa organik
3. Adsorpsi sebagai tahap akhir untuk polishing

Pendekatan ini lebih efektif dibandingkan penggunaan metode tunggal karena mampu menangani karakteristik limbah tekstil yang kompleks. Berdasarkan keterbatasan penelitian dan hasil sintesis yang telah diperoleh, penelitian selanjutnya perlu menguji teknologi pengolahan secara eksperimental menggunakan limbah tekstil nyata dengan karakteristik yang dijelaskan secara komprehensif. Penggunaan protokol analisis yang seragam juga diperlukan agar efektivitas setiap metode dapat dibandingkan secara objektif. Selain itu, kombinasi proses koagulasi–flokulasi atau elektrokoagulasi dengan advanced oxidation processes (AOPs) dan adsorpsi perlu dikaji pada skala laboratorium, pilot, hingga industri. Parameter operasi yang perlu dikendalikan mencakup pH, dosis koagulan atau oksidan, kuat arus, jarak elektroda, waktu kontak, konsumsi energi, produksi lumpur, serta biaya operasional.

Evaluasi kinerja pengolahan sebaiknya tidak hanya didasarkan pada parameter warna, COD, BOD, TSS, dan logam berat. Penelitian mendatang juga perlu mempertimbangkan biodegradabilitas, toksisitas efluen, pembentukan produk antara hasil oksidasi, potensi penggunaan kembali air, serta pengelolaan residu dan lumpur untuk memastikan bahwa proses pengolahan tidak sekadar memindahkan pencemar

ke media lingkungan lainnya. Validasi lebih lanjut perlu dilakukan menggunakan limbah tekstil nyata dengan beban pencemar dan komposisi yang berfluktuasi. Di samping itu, analisis tekno-ekonomi, jejak lingkungan, dan life-cycle assessment diperlukan untuk menentukan konfigurasi pengolahan yang paling efektif, efisien, dan layak diterapkan pada industri tekstil skala kecil, menengah, maupun besar.

4. Kesimpulan

Berdasarkan kajian sistematis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa efektivitas pengolahan limbah cair industri tekstil sangat bergantung pada jenis metode kimia yang digunakan serta karakteristik polutan yang terdapat di dalamnya. Koagulasi-flokulasi terbukti efektif dalam menurunkan parameter warna dan *total suspended solids* (TSS), sehingga paling sesuai digunakan sebagai tahap awal pengolahan (*pretreatment*). Namun, metode ini memiliki keterbatasan dalam mendegradasi senyawa organik kompleks dan hanya mengubah polutan menjadi lumpur.

Metode oksidasi lanjutan seperti Fenton, photo-Fenton, dan ozonasi menunjukkan efektivitas tinggi dalam menurunkan warna dan *chemical oxygen demand* (COD) melalui mekanisme pembentukan radikal hidroksil yang mampu memutus ikatan kromofor dan senyawa aromatik. Meskipun demikian, metode ini memerlukan kondisi operasi yang ketat seperti pengaturan pH asam serta konsumsi bahan kimia atau energi yang relatif tinggi. Sementara itu, elektrokoagulasi menunjukkan kinerja yang lebih komprehensif karena mampu menurunkan warna, COD, TSS, serta logam berat secara simultan melalui pembentukan koagulan *in situ*. Elektrooksidasi juga efektif dalam mendegradasi senyawa organik persisten, tetapi kinerjanya sangat dipengaruhi oleh konsumsi energi dan kondisi elektroda.

Secara keseluruhan, tidak terdapat satu metode tunggal yang paling optimal untuk seluruh parameter pencemar limbah cair industri tekstil. Oleh karena itu, pendekatan yang paling efektif adalah sistem pengolahan terintegrasi, yaitu kombinasi koagulasi-flokulasi atau elektrokoagulasi sebagai tahap awal, diikuti proses oksidasi lanjutan untuk degradasi senyawa organik, serta adsorpsi sebagai tahap akhir untuk pemolesan (*polishing*). Hasil kajian ini menunjukkan bahwa integrasi beberapa metode pengolahan kimia merupakan strategi paling prospektif untuk meningkatkan efisiensi pengolahan limbah cair industri tekstil pada skala aplikasi.

Daftar Pustaka

Ahsan, A., Jamil, F., & Rashad, M. A. (2023). Wastewater from the textile industry: Review of the technologies for wastewater treatment and reuse. *Korean Journal of Chemical Engineering*, *40*, 2060–2081. https://doi.org/10.1007/s11814-023-1475-2

Al-Jaberi, F. Y., Hadi, D. R., & Ajjam, S. K. (2023). *Electrocoagulation treatment of textile wastewater: A review*. 030004. https://doi.org/10.1063/5.0163278

Al-Kdasi, A., Idris, A., Saed, K., & Teong Guan, C. (2004). TREATMENT OF TEXTILE WASTEWATER BY ADVANCED OXIDATION PROCESSES-A REVIEW. In *Global Nest: the Int. J* (Vol. 6, Number 3).

Aragaw, T. A., & Bogale, F. M. (2023). Role of coagulation/flocculation as a pretreatment option to reduce colloidal/bio-colloidal fouling in tertiary filtration of textile wastewater: A review and future outlooks. *Frontiers in Environmental Science*, *11*, 1142227. https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1142227

Azanaw, A., Birlie, B., Teshome, B., & Jemberie, M. (2022). Textile effluent treatment methods and eco-friendly resolution of textile wastewater. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, *6*, 100230. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100230

Castellanos-Henriquez, C. S., Rosso, D., Chávez-Parga, Ma. del C., & Cortés, J. A. (2026). A Review of Advanced Oxidation Processes Applied to the Removal of Reactive Dyes: Efficiency, Removal Conditions, Advantages, Disadvantages, and Industrial Effluents Applications. *Water Environment Research*, *98*(2). https://doi.org/10.1002/wer.70283

El-Gawad, H. A., Ghaly, M. Y., El Hussieny, N. F., Abdel Kreem, M., & Reda, Y. (2024). Novel collector design and optimized photo-Fenton model for sustainable industry textile wastewater treatment. *Scientific Reports*, *14*, 8573. https://doi.org/10.1038/s41598-024-58610-w

Franco, L. C., Nishi, L., N. Olsen Scaliante, M. H., & Cusioli, L. F. (2026). Treatments for Textile Wastewater: Perspectives from Studies Using Supercritical Water and Biomass-Based Activated Carbon—A Review. *Processes*, *14*(6), 885. https://doi.org/10.3390/pr14060885

Halepoto, H., Gong, T., & Memon, H. (2022). Current status and research trends of textile wastewater treatments—A bibliometric-based study. *Frontiers in Environmental Science*, *10*. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1042256

Islam, Md. M., Aidid, A. R., Mohshin, J. N., Mondal, H., Ganguli, S., & Chakraborty, A. K. (2025). A critical review on textile dye-containing wastewater: Ecotoxicity, health risks, and remediation strategies for environmental safety. *Cleaner Chemical Engineering*, 100165. https://doi.org/10.1016/j.clce.2025.100165

Kallawar, G. A., & Bhanvase, B. A. (2024). A review on existing and emerging approaches for textile wastewater treatments: Challenges and future perspectives. *Environmental Science and Pollution Research*, *31*, 1748–1789. https://doi.org/10.1007/s11356-023-31175-3

Lebbe, S. S., Nihmiya, A. R., & Arachchige, U. S. P. R. (2026). The Application of Electrocoagulation in Textile Wastewater Treatment- A Scoping Review of Recent Trends (2021-2025). *International Journal of Latest Technology in Engineering Management & Applied Science*, *15*(5), 3204–3223. https://doi.org/10.51583/IJLTEMAS.2026.150500263

Lin, J., Ye, W., Xie, M., Seo, D. H., Luo, J., Wan, Y., & Van der Bruggen, B. (2023). Environmental impacts and remediation of dye-containing wastewater. *Nature Reviews Earth & Environment*, *4*, 785–803. https://doi.org/10.1038/s43017-023-00489-8

Louhichi, B., Bouchareb, R., & Mechichi, T. (2022). Treatment of textile industry effluents by electro-coagulation and electro-Fenton processes using solar energy: A comparative study. *Chemical Engineering Journal*, *427*, 131735. https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131735

Nigar, S., & Kumar, R. N. (2026). Electrocoagulation technology for wastewater treatment: insights on design, applications, and challenges. *Water Science & Technology*, *93*(7), 968–983. https://doi.org/10.2166/wst.2026.250

Sobczak, M., Bujnowicz, S., & Bilinska, L. (2024). Fenton and electro-Fenton treatment for industrial textile wastewater recycling: Comparison of by-products removal, biodegradability, toxicity, and re-dyeing. *Water Resources and Industry*, 100256. https://doi.org/10.1016/j.wri.2024.100256

Strebel, A., Behringer, M., Hilbig, H., Machner, A., & Helmreich, B. (2024). Anionic azo dyes and their removal from textile wastewater through adsorption by various adsorbents: A critical review. *Frontiers in Environmental Engineering*, *3*, 1347981. https://doi.org/10.3389/fenve.2024.1347981

Tabish, M., Tabinda, A. B., Mazhar, Z., Yasar, A., Ansar, J., & Wasif, I. (2024). Physical, chemical and biological treatment of textile wastewater for removal of dyes and heavy metals. *Desalination and Water Treatment*, 100842. https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100842

Tkaczyk-Wlizło, A., & Mitrowska, K. (2026). The occurrence of pharmacologically active dyes in the aquatic environment as a result of water and wastewater contamination—an underestimated environmental problem. *Environmental Science and Pollution Research*, *33*(19), 9225–9255. https://doi.org/10.1007/s11356-026-37866-x

Tuncer, N., & Sonmez, G. (2023). Removal of COD and color from textile wastewater by the Fenton and UV/H2O2 oxidation processes and optimization. *Water, Air, & Soil Pollution*, *234*, 70. https://doi.org/10.1007/s11270-023-06095-0

Velusamy, S., Roy, A., Sundaram, S., & Mallick, T. K. (2021). A review on heavy metal ions and containing dyes removal through graphene oxide-based adsorption strategies for textile wastewater treatment. *The Chemical Record*, *21*(7), 1570–1610. https://doi.org/10.1002/tcr.202000153

Xiong, J., & Wang, G. (2026). Treatment of Textile Wastewater by Advanced Oxidation Process: Effects of pH and Oxidant Dosage. *Desalination and Water Treatment*, 101845. https://doi.org/10.1016/j.dwt.2026.101845

Yaseen, D. A., & Scholz, M. (2019). Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: A critical review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *16*, 1193–1226. https://doi.org/10.1007/s13762-018-2130-z

Yuniarti, B. I., & Widayatno, T. (2021). Analisa Perubahan BOD, COD, dan TSS Limbah Cair Industri Tekstil Menggunakan Metode Elektrooksidasi-Elektrokoagulasi Elektroda Fe-C dengan Sistem Semi Kontinyu. *Rekayasa Hijau: Jurnal Teknologi Ramah Lingkungan*, *5*(3), 238–247. https://doi.org/10.26760/jrh.V5i3.238-247

Zhang, Y., Shaad, K., Vollmer, D., & Ma, C. (2021). Treatment of textile wastewater using advanced oxidation processes: A critical review. *Water*, *13*(24), 3515. https://doi.org/10.3390/w13243515

Zhang, Z., Zeeshan, M., Khan, A., Ali, N., Malik, S., & Bilal, M. (2021). Science of the Total Environment Environmental impacts of hazardous waste , and management strategies to reconcile circular economy and eco-sustainability Environmental problems of. *Science of the Total Environment*, *807*, 150856. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150856

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan artikel ilmiah ini khususnya dosen jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Islam Syekh Yusuf, Kota Tangerang.