

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Secara global, produksi atau pabrikasi produk farmasi memainkan peran penting di bidang kesehatan serta mendukung kesejahteraan masyarakat, terutama melalui penyediaan kebutuhan akan produk farmasi. Adanya potensi yang menjanjikan mendukung produksi atau pabrikasi produk farmasi di Indonesia kian berkembang, pernyataan ini didukung dengan adanya peningkatan kebutuhan akan produk farmasi serta dukungan dari pemerintah yang menjadikan sektor perangkat medis dan farmasi sebagai bagian dari sektor prioritas (Kementerian Investasi dan Hilirisasi, 2021). Menurut data dari Kementerian Kesehatan hingga tahun 2021, terdapat 241 industri farmasi, 17 industri bahan baku farmasi, 132 industri farmasi tradisional, dan 18 industri ekstraksi produk alami (Kementerian Investasi dan Hilirisasi, 2021). Dalam beberapa tahun terakhir, penerapan operasi ramah lingkungan dengan prioritas berupa kesadaran lingkungan dan operasi berkelanjutan telah menjadi fokus utama industri farmasi. Fokus pada penerapan operasional dengan pendekatan pengolahan untuk menangani air limbah industri farmasi menjadi salah satu fokus utama disamping pengurangan penggunaan air selama proses produksi (Sim et al., 2024). Air limbah industri farmasi memiliki kandungan senyawa kimia beracun yang dapat mencemari lingkungan serta mengancam kesehatan makhluk hidup disekitar area air yang tercemar. Beberapa bukti nyata dari pencemaran air limbah industri farmasi yang terdapat pada studi terdahulu antara lain ikan yang tercemar diklofenak disekitar instalasi pengolahan air limbah suatu industri farmasi, zat antibiotik yang memberi dampak buruk bagi bakteri dalam pengolahan lumpur aktif dan nitrifikasi, tercemarnya biomassa alga dan struktur komunitasnya, serta dampak terhadap rantai makanan yang ditimbulkan oleh berkurangnya bakteri akibat pencemaran air limbah industri farmasi (Kavianpour et al., 2024).

Kandungan polutan dalam air limbah industri farmasi merupakan mikropolutan atau *emerging pollutants* (S. R. Qasim & Zhu, 2017). Instalasi

pengolahan air limbah konvensional tidak dirancang dan tidak sepenuhnya mampu menghilangkan mikropolutan dalam air limbah industri farmasi, studi menunjukkan bahwa efisiensi remediasi untuk zat farmasi berupa karbamazepin, atenolol, asam asetilsalisilat, diklofenak, asam mefenamat, propranolol, atenolol, asam klofibrat, dan linkomisin hanya memiliki kisaran efisiensi remediasi sebesar 10% (Patel et al., 2019; Pratiwi et al., 2025). Hal tersebut mengakibatkan pelepasan atau pembuangan air limbah industri farmasi yang tidak terolah secara sempurna ke badan air berpotensi menimbulkan dampak negatif bagi lingkungan, permasalahan ini berpotensi diperparah lebih lagi pada saat cuaca hujan lebat dan/atau terdapat limpasan gabungan saluran pembuangan (Munro et al., 2015; Yun et al., 2023). Air limbah industri farmasi memiliki karakteristik fisik, kimia, dan biologis. Karakteristik dari air limbah industri farmasi memiliki kelarutan, kemampuan adsorpsi, volatilitas, biodegradabilitas, polaritas, dan stabilitas zat farmasi yang sangat bervariasi, serta keberadaannya yang dapat aktif pada konsentrasi yang sangat rendah (ng/L - µg/L) (Patel et al., 2019; Pratiwi et al., 2025). Kadar kebutuhan oksigen kimiawi atau *chemical oxygen demand* (COD) yang tinggi serta kadar kebutuhan oksigen biologis atau *biochemical oxygen demand* (BOD) yang rendah menimbulkan tantangan bagi metode pengolahan air limbah industri farmasi secara biologis. Rendahnya rasio BOD/COD (akibat kadar COD yang tinggi dan kadar BOD yang rendah) ini disebabkan oleh keberadaan zat-zat resisten dalam air limbah industri farmasi yang menghambat pematangan mikroorganisme, kandungan senyawa organik kompleks yang sukar terurai oleh mikroorganisme, serta toksisitas senyawa yang menghambat aktivitas mikroorganisme sehingga proses penguraian menjadi kurang efektif (Pratiwi et al., 2025; Zaman et al., 2024).

Mengacu pada dasar yang telah diuraikan, timbul suatu urgensi pengolahan air limbah industri farmasi yang tepat dengan mempertimbangkan karakteristik serta konsentrasi yang bervariasi untuk meminimalisir pencemaran lingkungan di sekitar industri farmasi, utamanya dalam sektor perairan. Kemajuan teknologi pada beberapa tahun terakhir menunjukkan bahwa *Advanced Oxidation Process* (AOP) efektif dalam mendegradasi senyawa kompleks dan resisten. Selain itu, teknologi ini juga mampu mengurai polutan penghambat, seperti polutan dengan tingkat

konsentrasi yang sangat rendah dan bersifat toksik (Iqbal et al., 2024; Thakur et al., 2023; Zaman et al., 2024). Salah satu contoh penerapan *Advanced Oxidation Process* (AOP) dalam pengolahan air limbah industri farmasi adalah integrasi teknologi kimia murni dengan proses oksidasi Fenton, yang melibatkan reaksi antara Fe^{2+} dan H_2O_2 (Mousset et al., 2021; Thakur et al., 2023). Proses oksidasi Fenton akan menghasilkan radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) dari reaksi katalis Fe^{2+} dalam bentuk FeSO_4 dan oksidator H_2O_2 yang akan bereaksi memecah kandungan senyawa organik kompleks dan berpotensi untuk mineralisasi air serta kadar karbondioksida (CO_2) dalam air (Huilin et al., 2025; Mahtab et al., 2022). Dalam proses oksidasi Fenton, penggunaan FeSO_4 dan H_2O_2 tidak terlepas dari waktu reaksi yang dibutuhkan selama proses reaksi berjalan, ketiga faktor atau variabel ini memiliki *range* atau rentang yang sangat luas. Berdasarkan kajian literatur, penelitian, dan studi terdahulu menunjukkan bahwa variasi dosis FeSO_4 , dosis H_2O_2 , dan waktu reaksi dalam metode oksidasi Fenton untuk pengolahan air limbah industri farmasi masih sangat beragam (Ayoub, 2022; Durai et al., 2020; Huilin et al., 2025; Nasruddin et al., 2020; Rekhate & J. K, 2019; Sarkale et al., 2025; Wagdy et al., 2022), namun belum terdapat titik temu mengenai kombinasi optimal yang mampu memberikan efisiensi penyisihan yang tinggi dengan biaya yang minimal untuk studi kasus pengolahan air limbah industri farmasi. Adapun salah satu cara untuk mendapatkan kombinasi yang optimal ialah menggunakan penerapan optimasi *Response Surface Methodology* (RSM), namun penggunaan metode ini masih sangat terbatas dalam konteks pengolahan air limbah industri farmasi, padahal metode ini dapat memberikan pendekatan sistematis untuk menentukan kombinasi yang optimal (Huilin et al., 2025). Oleh karena itu, diperlukan adanya studi yang berfokus pada optimasi dosis serta waktu reaksi menggunakan metode *Response Surface Methodology* (RSM) guna meningkatkan efisiensi dan efektifitas pengolahan air limbah industri farmasi.

Apabila mengkaji dari studi peneliti terdahulu, berbagai penelitian melaporkan dosis optimal FeSO_4 dan H_2O_2 yang bervariasi, serta waktu reaksi, tergantung pada jenis air limbah dan pengaturan eksperimen yang dilakukan (Huilin et al., 2025; Öztürk et al., 2025; H. Xu et al., 2015). Studi lain juga menunjukkan

adanya dosis FeSO_4 dan H_2O_2 yang optimal, serta waktu reaksi, yang sangat bervariasi di berbagai penelitian, menunjukkan kurangnya standardisasi atau konsensus untuk pengolahan air limbah farmasi sesuai kondisi nyata di lapangan (Huilin et al., 2025; Lalwani et al., 2021). Meskipun oksidasi Fenton telah diterapkan pada berbagai jenis air limbah (misalnya, tekstil, *pulp* dan kertas, serta lindi tempat pembuangan sampah), hanya sedikit penelitian yang secara khusus membahas air limbah farmasi yang representatif. Banyak penelitian menggunakan air limbah simulasi atau yang telah diolah sebelumnya (telah melalui proses *pre-treatment*), yang mungkin tidak sepenuhnya mewakili kompleksitas limbah farmasi (C. Li et al., 2021; Sharma et al., 2017; Yong et al., 2026). Apabila dilihat dari sudut pandang penerapan optimasi *Response Surface Methodology* (RSM), nampak pada beberapa studi bahwa model dan parameternya bervariasi, dimana beberapa penelitian menggunakan model kuadratik, sementara yang lain menggunakan *Central Composite Design* (CCD). Inkonsistensi ini mempersulit perbandingan langsung dan generalisasi (Lalwani et al., 2021; Sharma et al., 2017; H. Xu et al., 2015). Studi oleh Limonti et al. (2026) juga menyatakan bahwa pembentukan dan pengelolaan lumpur tetap menjadi tantangan signifikan dalam proses oksidasi Fenton, khususnya untuk air limbah farmasi. Dari beberapa celah penelitian terdahulu yang telah dibahas ini, penelitian yang akan dilakukan akan mempertimbangkan aspek representasi air limbah industri farmasi yang nyata, dengan pelaporan dosis serta waktu reaksi yang transparan untuk meningkatkan aspek reproduksibilitas. Penelitian ini juga akan mempertimbangkan aspek lingkungan, dimana lumpur yang dihasilkan akan dianalisis untuk meminimalisir dampaknya terhadap lingkungan. Aplikasi optimasi *Response Surface Methodology* (RSM) metode *Central Composite Design* (CCD) yang akan digunakan akan dilaporkan dengan jelas, dengan mempertimbangkan aspek transparansi dan reproduksibilitas untuk meminimalisir inkonsistensi pada celah penelitian sebelumnya. Pengembangan optimasi dasar oksidasi Fenton ini juga didukung oleh teori dalam buku pedoman oleh Tchobanoglous et al. (2014) yang menyatakan bahwa peningkatan kinerja instalasi pengolahan dapat dilakukan melalui optimasi proses dan/atau perubahan operasional, dimana dari teori yang disampaikan,

penelitian ini mendukung aspek penerapan metode model komputer (*computer models*) dan dapat dijadikan salah satu contoh pedoman pengujian skala percontohan (*pilot scale testing*). Dengan diterapkannya metode oksidasi Fenton dengan optimasi *Response Surface Methodology* (RSM) untuk dosis FeSO_4 , dosis H_2O_2 , serta waktu reaksi diharapkan penelitian ini dapat memberi referensi variasi yang optimal untuk penerapan atau aplikasi metode oksidasi Fenton dalam mengolah air limbah industri farmasi yang efektif dan efisien. Pertimbangan efisiensi dan efektifitas penyisihan polutan, pemenuhan baku mutu, dan mengkaji dari sudut pandang aspek lingkungan akan menjadi pertimbangan mendasar dalam optimasi *Response Surface Methodology* (RSM) untuk variasi dosis FeSO_4 , dosis H_2O_2 , dan waktu reaksi pada penelitian ini.

1.2. Identifikasi Masalah

Berdasarkan permasalahan yang melatarbelakangi penelitian ini, dapat diidentifikasi masalah yang dijabarkan sebagai berikut.

1. Produksi atau pabrikasi produk farmasi yang menghasilkan produk samping berupa air limbah. Air limbah industri farmasi memiliki berpotensi mencemari lingkungan apabila tidak diolah dengan tepat.
2. Karakteristik dan konsentrasi air limbah industri farmasi yang berbeda dengan air limbah pada umumnya, sehingga membutuhkan metode pengolahan yang lebih spesifik.
3. Tidak terbatasnya variasi dosis FeSO_4 dan H_2O_2 , serta waktu reaksi sehingga dibutuhkan adanya optimasi dosis dan waktu reaksi untuk meningkatkan efisiensi dan efektivitas proses pengolahan air limbah industri farmasi menggunakan metode oksidasi Fenton.
4. Hasil pengolahan air limbah industri farmasi yang mempertimbangkan efisiensi dan efektifitas penyisihan polutan serta pemenuhan baku mutu sesuai regulasi yang berlaku.
5. Analisis aspek lingkungan yang masih minim, dengan produk sampingan pengolahan Fenton yaitu lumpur besi yang berpotensi mencemari lingkungan.

1.3. Rumusan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah dari penelitian ini, dapat dirumuskan permasalahan yang dijabarkan sebagai berikut.

1. Apa metode pengolahan air limbah industri farmasi yang tepat untuk meminimalisir potensi pencemaran lingkungan di sekitar industri farmasi?
2. Bagaimana metode oksidasi Fenton dapat mengolah air limbah industri farmasi dengan mempertimbangkan karakteristik dan konsentrasi air limbah yang representatif?
3. Apa metode optimasi dan bagaimana optimasi dosis FeSO_4 , dosis H_2O_2 , serta waktu reaksi untuk meningkatkan efisiensi dan efektifitas proses pengolahan air limbah industri farmasi menggunakan metode oksidasi Fenton?
4. Bagaimana hasil pengolahan air limbah industri farmasi menggunakan metode oksidasi Fenton setelah dioptimasi apabila ditinjau dari penyisihan polutan serta pemenuhan baku mutu yang berlaku?
5. Bagaimana analisis dari aspek lingkungan untuk memaksimalkan proses oksidasi Fenton yang dilakukan dan meminimalisir potensi dampak atau pencemaran lingkungan yang ada?

1.4. Rumusan Tujuan

Berdasarkan perumusan masalah dari penelitian ini, dapat dirumuskan tujuan yang dijabarkan sebagai berikut.

1. Mengetahui dan menerapkan metode pengolahan air limbah industri farmasi yang tepat untuk meminimalisir potensi pencemaran lingkungan di sekitar industri farmasi.
2. Mengidentifikasi dan menganalisis metode oksidasi Fenton yang diterapkan dalam mengolah air limbah industri farmasi dengan mempertimbangkan karakteristik dan konsentrasi air limbah yang representatif.
3. Mengetahui dan menerapkan metode optimasi variasi dosis FeSO_4 , dosis H_2O_2 , dan waktu reaksi dalam metode oksidasi Fenton; mengidentifikasi dan menganalisis optimasi dosis FeSO_4 , dosis H_2O_2 , serta waktu reaksi

untuk meningkatkan efisiensi dan efektifitas proses pengolahan air limbah industri farmasi menggunakan metode oksidasi Fenton.

4. Mengidentifikasi dan menganalisis hasil pengolahan air limbah industri farmasi menggunakan metode oksidasi Fenton setelah dioptimasi apabila ditinjau dari penyisihan polutan serta pemenuhan baku mutu yang berlaku.
5. Menganalisis dari aspek lingkungan untuk memaksimalkan proses oksidasi Fenton yang dilakukan dan meminimalisir potensi dampak atau pencemaran lingkungan yang ada.

1.5. Pembatasan Masalah

Pembatasan masalah memiliki tujuan agar poin bahasan dalam penelitian menjadi jelas, terstruktur, serta tidak melebar. Berdasarkan perumusan tujuan dari penelitian ini, terdapat pembatasan masalah yang dijabarkan sebagai berikut.

1. Ruang lingkup penelitian ini adalah pengolahan air limbah industri farmasi dari salah satu perusahaan atau industri farmasi yang berlokasi di Kota Semarang, Jawa Tengah, Indonesia dengan penerapan *Advanced Oxidation Process* (AOP) metode oksidasi Fenton.
2. Pengambilan sampel air limbah industri farmasi dilakukan pada salah satu perusahaan atau industri farmasi yang berlokasi di Kota Semarang, Jawa Tengah, Indonesia.
3. Metode oksidasi Fenton yang diterapkan menggunakan FeSO_4 sebagai katalis dan H_2O_2 sebagai oksidator dengan variasi dosis dan waktu reaksi yang akan diidentifikasi dan dianalisis berdasarkan literatur untuk mencari variasi optimal.
4. Identifikasi dan analisis variasi dosis FeSO_4 , dosis H_2O_2 , serta waktu reaksi menerapkan optimasi *Response Surface Methodology* (RSM) metode *Central Composite Design* (CCD) menggunakan *software* Design Expert Version 13, akan dilakukan analisis varians (ANOVA atau *analysis of variance*) dengan *software* yang sama.
5. Analisis data akan dilakukan menggunakan *software* Design Expert Version 13, Microsoft Excel, Microsoft Word, dan Google Spreadsheet.

6. Parameter air limbah industri farmasi yang akan diidentifikasi dan dianalisis meliputi parameter *biochemical oxygen demand* (BOD), *chemical oxygen demand* (COD), *total suspended solid* (TSS), total nitrogen, fenol, dan pH. Parameter dipilih berdasarkan baku mutu air limbah bagi usaha dan/atau kegiatan industri farmasi yang berlaku.
7. Prototipe reaktor skala laboratorium berupa alat *jar test* dengan media atau wadah berupa *beaker glass* Herma berkapasitas 1.000 mL atau 1 L akan digunakan dalam penelitian ini dengan tujuan sebagai media pengujian dan melaksanakan eksperimen metode oksidasi Fenton.
8. Pengujian laboratorium akan dilaksanakan pada Laboratorium Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang.
9. Baku mutu yang digunakan sebagai pembanding dan acuan keberhasilan pengolahan air limbah industri farmasi adalah Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah, Lampiran XXXIX tentang Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Industri Farmasi; dan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, Lampiran VI tentang Baku Mutu Air Nasional.
10. Analisis yang dilakukan akan menerapkan analisis statistik, analisis kimia dan fisika, serta analisis lingkungan untuk membahas hasil optimasi oksidasi Fenton lebih lanjut. Dasar analisis yang akan diterapkan dilakukan berdasarkan hasil pengujian dan dalam skala laboratorium untuk memberi gambaran pada studi skala nyata kedepannya.

1.6. Keaslian Penelitian

Advanced Oxidation Process (AOP) dengan penerapan metode oksidasi Fenton telah banyak digunakan untuk mengolah air limbah, terutama dengan karakteristik yang kompleks sehingga tidak memungkinkan diolah pada instalasi pengolahan air limbah konvensional. Penelitian ini dikembangkan dengan menerapkan optimasi *Response Surface Methodology* (RSM) metode *Central Composite Design* (CCD) dengan pertimbangan aspek lingkungan. Tesis ini

berjudul “Optimasi Variasi Dosis dan Waktu Reaksi dalam Metode Oksidasi Fenton untuk Pengolahan Air Limbah Industri Farmasi” dan merupakan karya penulis sendiri, segala referensi, kutipan, rujukan, serta literatur yang digunakan telah tercantum dalam daftar pustaka sebagai bentuk pemberian kredit bagi penulis asli karya terkait.

1.7. Rumusan Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat memberi manfaat baik bagi pihak internal maupun eksternal. Pihak internal yang terkait dengan penelitian secara langsung meliputi penulis sendiri, sedangkan pihak eksternal meliputi pembaca, perkembangan ilmu pengetahuan, masyarakat, pemerintah, serta bangsa dan negara secara luas.

1. Bagi Penulis

Dengan adanya penelitian ini, penulis dapat memperoleh wawasan terkait pengolahan air limbah industri farmasi menggunakan metode optimasi oksidasi Fenton serta dapat mengaplikasikan ilmu yang telah diperoleh di dunia perkuliahan secara langsung. Penelitian ini juga dibuat untuk memenuhi tahap penyelesaian tesis sebagai syarat kelulusan gelar magister.

2. Bagi Pembaca

Menjadi referensi mengenai karakteristik dan konsentrasi air limbah industri farmasi, optimasi *Response Surface Methodology* (RSM) metode *Central Composite Design* (CCD), pengolahan metode oksidasi Fenton dengan variasi dosis dan waktu reaksi yang dioptimasi, serta aplikasi analisis mendalam dengan pertimbangan sudut pandang aspek lingkungan.

3. Bagi Perkembangan Ilmu Pengetahuan

Penelitian ini digunakan untuk memberikan referensi dalam pengolahan air limbah, serta memberikan referensi studi kasus salah satu penerapan metode optimasi di bidang lingkungan terkhusus pada pengolahan air limbah industri farmasi dengan metode oksidasi Fenton yang dioptimasi menggunakan *Response Surface Methodology* (RSM) metode

Central Composite Design (CCD) dengan analisis lebih lanjut yang mempertimbangkan aspek lingkungan.

4. Bagi Masyarakat

Manfaat penelitian bagi masyarakat ialah dapat menjadi salah satu opsi pengolahan air limbah yang lebih spesifik, terutama bagi industri pabrikan produk farmasi guna meminimalisir dampak lingkungan di sekitar lokasi industri dan dampak terhadap masyarakat secara langsung maupun tidak langsung.

5. Bagi Pemerintah

Penelitian dapat diterapkan sebagai referensi dalam mengambil kebijakan pada hal pengendalian pencemaran air limbah industri farmasi, utamanya menggunakan variasi dosis dan waktu reaksi metode oksidasi Fenton yang dioptimasi, serta menjadi referensi untuk memajukan industri farmasi nasional dengan meningkatkan daya saing di bidang pengelolaan dan pengendalian lingkungan.

6. Bagi Bangsa dan Negara Secara Luas

Penelitian ini bermanfaat bagi bangsa dan negara secara luas dengan mendukung pelestarian lingkungan melalui pengolahan limbah industri farmasi dengan penerapan metode oksidasi Fenton. Diharapkan penelitian ini dapat mendukung keberlanjutan sumber daya air dan mendorong inovasi pengelolaan limbah yang sejalan dengan kebijakan lingkungan dan daya saing industri nasional.