

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pengelolaan air limbah domestik berperan penting dalam menjaga kualitas perairan karena air limbah yang tidak dikelola secara aman membawa bahan organik, nutrisi, dan mikroorganisme patogen ke lingkungan. Di Indonesia, akses sanitasi layak tahun 2024 telah mencapai 83,6%, tetapi akses sanitasi aman baru 10,25%, yang menunjukkan masih besarnya kesenjangan antara kepemilikan fasilitas sanitasi dan pengelolaan air limbah secara aman (UNICEF Indonesia & Kementerian PPN/Bappenas, 2025). Kesenjangan tersebut juga terjadi di Kota Pariaman. Pada tahun 2024, hanya 8.324 dari 22.275 rumah atau 37,37% yang memperoleh layanan pengolahan air limbah domestik layak atau aman (Pemerintah Kota Pariaman, 2025). Tahun 2026 tercatat 95 IPAL dengan kapasitas desain 1.234 m³/hari, tetapi kapasitas yang dimanfaatkan hanya 306 m³/hari atau 24,83%. Jumlah sambungan rumah juga menurun dari 1.660 menjadi 766 sambungan, yang menunjukkan rendahnya keberfungsian dan pemanfaatan infrastruktur sanitasi (Dinas PUPR Kota Pariaman, 2026).

Pada saat yang sama, kualitas Sungai Batang Pariaman menunjukkan indikasi pencemaran. Tahun 2023, konsentrasi Fecal Coliform mencapai $5,4 \times 10^5$ MPN/100 mL di hulu dan $1,7 \times 10^5$ MPN/100 mL di hilir, jauh di atas baku mutu kelas II sebesar 1.000 MPN/100 mL. Konsentrasi maksimum BOD dan COD juga mencapai 12,10 mg/L dan 69,60 mg/L, melebihi baku mutu masing-masing 3 mg/L dan 25 mg/L (DPRKPLH Kota Pariaman, 2023). Pencemaran Sungai Batang Pariaman tidak hanya berasal dari limbah domestik, tetapi juga dari industri kecil, peternakan, pertanian, perkebunan, dan aktivitas lainnya. Namun, penelitian ini difokuskan pada air limbah domestik karena sumbernya tersebar di kawasan permukiman, meningkat seiring pertumbuhan penduduk, serta dapat dikendalikan melalui kebijakan pemerintah daerah seperti peningkatan sambungan rumah, pengaktifan IPAL, optimalisasi kapasitas, dan peningkatan efisiensi pengolahan. Sumber non-domestik dan kondisi hulu diperlakukan sebagai variabel eksogen dalam model.

Hubungan antara pertumbuhan penduduk, timbulan air limbah, pelayanan sanitasi, kapasitas pengolahan, beban pencemar, dan kualitas sungai bersifat dinamis serta memiliki hubungan umpan balik dan tundaan waktu. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan pendekatan System Dynamics untuk menganalisis perilaku jangka panjang sistem sanitasi dan dampak berbagai kebijakan selama periode 2026–2046.

Penelitian terdahulu telah membahas hubungan pertumbuhan penduduk, air limbah, kapasitas pengolahan, maupun kualitas sumber daya air, tetapi belum mengintegrasikan kinerja aktual pelayanan sanitasi dengan perubahan kualitas badan air penerima dalam satu model. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi sambungan rumah, keberfungsian IPAL, kapasitas desain dan terpakai, efisiensi pengolahan, serta beban BOD, COD, amonia, dan Fecal Coliform terhadap kualitas Sungai Batang Pariaman dalam satu model stock-and-flow. Kondisi kualitas sungai selanjutnya direpresentasikan menggunakan River Quality Index (RQI).

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini mengembangkan model dinamis pengelolaan air limbah domestik Kota Pariaman untuk membandingkan skenario pesimis, moderat, dan optimis selama 2026–2046 serta menentukan arah kebijakan yang paling efektif dalam menekan beban pencemar domestik dan memperbaiki kualitas Sungai Batang Pariaman.

1.2 Maksud dan Tujuan Penelitian

1.2.1 Maksud

Maksud dari penelitian ini adalah mengembangkan model dinamis stock-and-flow yang dapat digunakan untuk merancang dan menganalisis sistem pengolahan air limbah terpadu di Kota Pariaman.

1.2.2 Tujuan

Tujuan penelitian yaitu:

1. Menganalisis faktor pendorong timbulan air limbah domestik (pertumbuhan penduduk dan konsumsi air), dinamika sistem pengelolaan, serta dampaknya terhadap kualitas Sungai Batang Pariaman di Kota Pariaman.

2. Mengembangkan model dinamis stock-and-flow untuk sistem pengolahan air limbah domestik di Kota Pariaman.
3. Mensimulasikan dampak berbagai skenario (skenario optimis, moderat, dan pesimis) pengelolaan air limbah domestik yang dapat diterapkan di Kota Pariaman terhadap kualitas Sungai Batang Pariaman.

1.3 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagi akademisi
 - a. Menyediakan kerangka model dinamis stock-and-flow yang secara eksplisit menghubungkan status keberfungsian dan kapasitas IPAL dengan perubahan konsentrasi BOD, COD, amonia, dan Fecal Coliform pada badan air penerima — keterkaitan yang belum diintegrasikan secara utuh pada penelitian System Dynamics bidang sanitasi sebelumnya.
 - b. Menjadi referensi metodologis bagi penelitian selanjutnya yang mengembangkan pemodelan dinamis sistem pengelolaan air limbah domestik dan kualitas lingkungan perairan, khususnya pada kota dengan karakteristik pelayanan sanitasi yang masih berkembang.
2. Bagi pemerintah daerah, khususnya Kota Pariaman, memberikan dasar teknis kuantitatif dalam merencanakan dan mengimplementasikan sistem pengelolaan air limbah domestik yang lebih efektif, termasuk penentuan prioritas antarskenario kebijakan.

3. Bagi masyarakat
Pengelolaan air limbah yang lebih optimal dapat menurunkan risiko penyakit berbasis lingkungan seperti diare, tifus, kolera, dan penyakit kulit yang sering muncul akibat air tercemar.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pendekatan System Dynamics digunakan sebagai alat simulasi skenario dan evaluasi kebijakan, bukan sebagai alat optimasi matematis. Model digunakan untuk membandingkan dampak skenario pesimis, moderat, dan optimis beserta asumsi pertumbuhan penduduk, capaian sambungan rumah, dan

perbaikan efisiensi pengolahan pada masing-masing scenario terhadap timbulan air limbah domestik, kapasitas pelayanan, beban pencemar, dan kualitas Sungai Batang Pariaman. Model tidak menghasilkan nilai kebijakan optimum secara otomatis.

2. Model mengkaji tiga subsistem yang saling berinteraksi, yaitu:
 - a. faktor pendorong timbulan air limbah domestik, meliputi pertumbuhan penduduk dan konsumsi air;
 - b. sistem pengelolaan air limbah domestik, meliputi cakupan pelayanan, sambungan rumah, kapasitas dan pemanfaatan IPAL, serta efisiensi pengolahan; dan
 - c. perubahan kualitas air Sungai Batang Pariaman akibat beban pencemar domestik.
3. Aspek ekonomi daerah tidak dimodelkan sebagai subsistem, tetapi diperlakukan sebagai faktor eksternal yang memengaruhi kemampuan investasi dan laju peningkatan kapasitas pelayanan.
4. Model hanya menghitung beban dan kontribusi pencemar yang berasal dari air limbah domestik, bukan keseluruhan pencemaran Sungai Batang Pariaman. Dengan batasan ini, hasil simulasi hanya menggambarkan perubahan kontribusi domestik terhadap beban dan kualitas sungai, sehingga tidak dapat digunakan untuk menyimpulkan bahwa pencemaran sungai seluruhnya disebabkan oleh kegiatan domestik, maupun untuk menetapkan target penurunan pencemaran total sungai.
5. Sumber pencemar dari pertanian, perkebunan, peternakan, industri kecil, limpasan permukaan, kegiatan perkotaan lainnya, dan wilayah hulu tidak dimodelkan sebagai variabel endogen. Pengaruh sumber tersebut direpresentasikan sebagai beban eksternal atau kondisi batas melalui debit dan konsentrasi awal sungai. Dengan demikian, model dapat mengevaluasi perubahan kualitas sungai akibat intervensi pengelolaan air limbah domestik tanpa mengabaikan keberadaan sumber pencemar lainnya.
6. Model tidak menghitung daya tampung beban pencemaran sungai secara menyeluruh sebagaimana kajian daya tampung regulatif. Perubahan kualitas air dihitung secara kuantitatif berdasarkan beban domestik, debit sungai,

pencampuran, waktu tempuh, dan peluruhan pencemar orde pertama, dengan prosedur perhitungan dijelaskan pada Bab III. Baku mutu air sungai kelas II (PP No. 22 Tahun 2021) digunakan sebagai acuan batas (proxy) dalam mengevaluasi hasil simulasi, bukan sebagai pengganti kajian daya tampung resmi. Hasil model dengan demikian menggambarkan arah dan besar perubahan kontribusi domestik terhadap konsentrasi pencemar, bukan kapasitas maksimum seluruh beban pencemar yang dapat diterima sungai, sehingga tidak dapat dijadikan dasar penetapan status daya tampung sungai secara regulatif.

7. Data penelitian terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer meliputi hasil pengambilan dan pengujian sampel air limbah pada outlet IPAL serta air Sungai Batang Pariaman pada titik yang ditetapkan. Data sekunder meliputi jumlah dan pertumbuhan penduduk, konsumsi air, cakupan pelayanan, sambungan rumah, kapasitas dan kondisi IPAL, debit sungai, kualitas air sungai, serta inventarisasi sumber pencemar. Jumlah titik, koordinat, waktu pengambilan, dan metode sampling dijelaskan secara rinci dalam metodologi penelitian.
8. Wilayah studi dibatasi pada Sungai Batang Pariaman karena sungai ini berinteraksi langsung dengan kawasan permukiman, menerima aliran buangan dari kegiatan di sekitarnya, serta memiliki data kualitas air dan inventarisasi sumber pencemar yang dapat digunakan untuk penyusunan dan pengujian model.
9. Parameter yang dianalisis meliputi TSS, BOD, COD, amonia, dan Fecal Coliform. Kelima parameter tersebut dipilih karena (a) dipersyaratkan dalam baku mutu air limbah domestik PermenLH No. 11/2025 maupun baku mutu air sungai kelas II yang menjadi acuan penelitian ini, dan (b) merepresentasikan empat jenis pencemar utama yang teridentifikasi pada hasil pengujian pendahuluan di Sungai Batang Pariaman, yaitu padatan (TSS), bahan organik (BOD dan COD), nutrien (amonia), dan mikrobiologis (Fecal Coliform). Kualitas efluen air limbah dibandingkan dengan baku mutu air limbah domestik dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup/Badan Pengendalian Lingkungan Hidup Nomor 11 Tahun 2025, sedangkan kualitas

air Sungai Batang Pariaman dibandingkan dengan baku mutu air sungai kelas II dalam Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021. Kelima parameter tersebut selanjutnya dikompositkan ke dalam River Quality Index (RQI) untuk merepresentasikan kondisi kualitas sungai secara ringkas.

10. Model menggunakan tahun 2026 sebagai tahun dasar dan disimulasikan sampai tahun 2046. Rentang waktu tersebut digunakan untuk mengevaluasi perubahan sistem dan dampak kebijakan pengelolaan air limbah domestik dalam jangka panjang.

1.5 Sistematika Penulisan Tesis

Sistematika penulisan tesis ini sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Berisikan latar belakang, maksud dan tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, serta sistematika penulisan tesis.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Berisikan teori yang berkaitan dengan air limbah, system pengolahan air limbah, pencemaran lingkungan perairan, serta konsep dan penerapan metode *system dynamic*.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Berisikan pendekatan penelitian, lokasi dan waktu penelitian, pendekatan model system dinamis meliputi batasan system, *causal loop*, dan *stock Flow* diagram. Selain itu pada bab ini juga terdapat teknik pengumpulan data primer dan sekunder serta kalibrasi dan validasi model.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Menyajikan hasil simulasi model, analisis kondisi eksisting, hasil skenario, serta pembahasan keterkaitan antara subsistem pertumbuhan ekonomi daerah, sistem pengelolaan air limbah domestik, dan pencemaran perairan

BAB V KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

Memuat kesimpulan utama dari penelitian dan rekomendasi kebijakan atau pengembangan penelitian selanjutnya.