

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Tuberkulosis (TB) adalah salah satu penyakit menular yang disebabkan oleh infeksi bakteri *Mycobacterium tuberculosis* dan dapat menular melalui udara yang tercemar oleh bakteri tersebut dari penderita TB aktif. Penduduk yang tinggal pada lingkungan yang padat dan kotor memiliki peluang yang lebih tinggi untuk terjangkit penyakit TB dan akan semakin meningkat karena sistem imun yang rendah misalnya pada penderita HIV-AIDS dan diabetes melitus. Perokok aktif juga memiliki potensi yang besar untuk menjadi pengidap TB, demikian pula orang yang memiliki kontak erat dengan penderita TB aktif akan semakin rentan untuk sakit. Penyakit TB hingga saat ini masih menjadi tantangan kesehatan masyarakat global yang signifikan (WHO, 2025).

Berdasarkan *Global Tuberculosis Report 2024* yang diterbitkan oleh WHO, pada tahun 2023 tercatat 10,8 juta kasus dengan 1,2 juta kasus kematian. Dari jumlah kasus tersebut 8,2 juta orang merupakan diagnosis baru, di mana ini merupakan angka tertinggi sejak 1995. Dalam laporan tersebut, Indonesia menempati peringkat kedua sebagai negara dengan kasus TB terbanyak di dunia setelah India, dan menyumbang sekitar 10% dari total kasus tuberkulosis global (WHO, 2024).

Beberapa upaya yang dapat dilakukan untuk mengurangi kasus TB adalah melalui tindakan pengobatan untuk penderita TB aktif dengan cara memberikan pengobatan. Pengobatan tersebut dilakukan dengan pemberian Obat Anti Tuberkulosis (OAT) kepada pasien yang terdiri dari kombinasi beberapa jenis obat, diantaranya *pyrazinamide*, *rifampisin*, *ethambutol*, *streptomisin*, *isoniazid*. (Ria dkk., 2023). Pengobatan dilakukan dalam rentang waktu yang lumayan lama, yaitu sekitar 6 sampai dengan 9 bulan tergantung pada jenis obat dan tingkat keparahan infeksi. Upaya selanjutnya untuk mengurangi jumlah kasus TB adalah melalui kegiatan pencegahan. Seperti pemberian vaksin *Bacillus Calmette-Guérin* (BCG), penggunaan masker terutama di tempat umum, menutup mulut saat batuk

atau bersin, dan mengatur ventilasi udara agar ruangan mendapatkan pencahayaan matahari (Kemenkes, 2025).

Pola penyebaran penyakit seperti TB dan tren epideminya di masa depan dapat diketahui dengan menggunakan metode matematika, yaitu pemodelan matematika epidemiologi (Brauer dkk., 2000). Pendekatan yang umum digunakan adalah model kompartemen, yang mensimulasikan dinamika penularan melalui perpindahan populasi antar subkelompok berdasarkan status kesehatannya. Model SIR (*Susceptible-Infected-Recovered*) yang pertama kali dikembangkan oleh Kermack dan McKendrick pada tahun 1927 menjadi fondasi dasar dalam pemodelan ini. Model ini membagi populasi menjadi beberapa kompartemen, yaitu rentan terhadap penyakit (S), terinfeksi penyakit (I), dan sembuh dari penyakit (R) yang merepresentasikan status kesehatan individu dalam proses penyebaran penyakit (Yong, 2020). Perkembangan penelitian terkait TB kemudian memunculkan variasi model yang lebih spesifik. Seperti yang dilakukan oleh Syafruddin Side dkk pada tahun 2016 yang mengembangkan model SITR (*Susceptible-Infected-Treatment-Recovered*) dengan menambahkan pengobatan sebagai kompartemen baru (Side dkk., 2016). Selanjutnya, dengan mempertimbangkan masa laten pada penyakit TB, model kemudian berkembang menjadi SLITR (*Susceptible-Latent-Infectious-Treatment-Recovered*) yang menambahkan kompartemen terpapar atau laten (L) ke dalam model dengan menggunakan pendekatan persamaan diferensial fraksional dengan turunan Caputo-Fabrizio (Ullah dkk., 2020). Berbeda dengan pendekatan tersebut, penelitian ini menggunakan model SLITR yang dikembangkan berdasarkan beberapa asumsi dalam bentuk sistem persamaan diferensial biasa nonlinear.

Meskipun secara konseptual mampu merepresentasikan dinamika penularan penyakit TB, model epidemi memerlukan proses validasi melalui estimasi parameter berbasis data empiris. Hal ini penting untuk menghasilkan simulasi numerik yang akurat dan sesuai dengan kondisi riil di lapangan. Nilai parameter epidemiologi umumnya tidak dapat diukur secara langsung, melainkan harus diestimasi dengan mencocokkan model matematika dengan data yang tersedia (Capaldi dkk., 2012). Namun, pada penelitian-penelitian terdahulu yang

mengembangkan model TB, sering kali menggunakan nilai parameter berdasarkan asumsi atau merujuk pada studi lain, tanpa menggunakan estimasi spesifik yang menyesuaikan model dengan data di lapangan. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan estimasi parameter menggunakan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO). Pemilihan metode ini didasari oleh kelebihan yang dimiliki oleh algoritma PSO yaitu mempunyai konsep yang sederhana, mudah diimplementasikan, dan efisien dalam perhitungan jika dibandingkan dengan algoritma matematika lainnya (Napitupulu dkk., 2018).

Pada pemodelan matematika, pendekatan kontrol optimal dapat diterapkan untuk menentukan kebijakan pengendalian penyebaran TB yang optimal dengan biaya yang rendah. Pendekatan ini memungkinkan perancangan strategi intervensi yang dinamis dan *cost-effective* dengan mempertimbangkan berbagai keterbatasan sumber daya, terutama anggaran (Silva & Torres, 2015). Dalam penelitian ini, vaksinasi yang merupakan salah satu strategi utama dalam pencegahan TB dapat diterapkan sebagai kontrol optimal (Ochieng, 2025).

Berdasarkan uraian di atas, model yang digunakan dalam penelitian ini merujuk pada model yang dikembangkan oleh (Ullah dkk., 2020) dan dikembangkan berdasarkan beberapa asumsi dalam bentuk pendekatan sistem persamaan diferensial biasa dan pengintegrasian kontrol vaksinasi sebagai upaya untuk mengendalikan penyebaran TB. Selain itu, parameter yang akan digunakan di dalam model diestimasi dari data riil kasus infeksi TB di Indonesia sehingga simulasi model yang dihasilkan dapat menggambarkan keadaan penyebaran penyakit di lapangan. Selanjutnya, penelitian ini diberi judul: Pemodelan Matematika Penyebaran Penyakit Tuberkulosis dengan Pendekatan Kontrol Optimal dan Penaksiran Parameter.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan sebelumnya, rumusan masalah dalam penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana proses konstruksi model matematika penyebaran penyakit TB?
2. Bagaimana hasil analisis kestabilan titik ekuilibrium model matematika penyebaran penyakit TB?
3. Bagaimana menentukan nilai parameter pada model matematika penyebaran penyakit TB dengan menggunakan estimasi parameter?
4. Bagaimana aplikasi kontrol optimal pada model penyebaran penyakit TB?
5. Bagaimana simulasi numerik dan interpretasi dari model matematika penyebaran penyakit TB menggunakan kontrol dan tanpa kontrol optimal?

C. Batasan Masalah

Penelitian yang dilakukan dibatasi pada konstruksi model matematika penyebaran penyakit TB dengan kasus yang diangkat adalah kasus TB paru. Melakukan Analisis kestabilan dari titik ekuilibrium model yang dihasilkan. Penerapan kontrol optimal pada model berupa pemberian vaksinasi. Melakukan estimasi parameter model menggunakan data TB Indonesia tahun 2000 sampai 2025.

D. Tujuan Penelitian

Mengacu pada rumusan masalah yang telah diberikan, maka tujuan penelitian ini adalah untuk:

1. Mengetahui model matematika dinamika penyebaran penyakit TB,
2. Mengetahui hasil analisis kestabilan dari titik ekuilibrium model penyebaran penyakit TB,
3. Mengestimasi parameter-parameter dalam model menggunakan data sekunder yang relevan,
4. Mengetahui bentuk kontrol optimal untuk model matematika penyebaran penyakit TB,

5. Mensimulasikan model secara numerik dan menginterpretasikan hasil simulasi untuk membandingkan dinamika penyebaran penyakit pada skenario tanpa intervensi dan dengan penerapan kontrol optimal.

E. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dalam penelitian ini, yaitu:

1. Menambah wawasan khususnya mengenai pemodelan matematika dan penerapannya,
2. Sumber referensi dalam pembelajaran maupun pemecahan masalah yang berkaitan dengan model matematika kasus tuberkulosis.

