

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Demam Berdarah *Dengue* (DBD) merupakan suatu penyakit yang disebabkan oleh virus *dengue* (DENV) dan ditularkan kepada manusia melalui gigitan nyamuk betina *Aedes aegypti*. Virus *dengue* berada dalam klasifikasi genus *Flavivirus*, famili *Flaviviridae*, yang sampai saat ini telah ditemukan empat jenis *serotype*, yaitu DEN-1, DEN-2, DEN-3, DEN-4, dimana setiap *serotype* menimbulkan respon imun tubuh yang berbeda [1]. Penyakit tersebut memiliki gejala ringan yang paling umum terjadi ketika seseorang terinfeksi adalah sakit kepala, demam tinggi, nyeri sendi, mual, ruam hingga gejala berat seperti pendarahan saluran cerna, syok hingga dapat menyebabkan kematian.

World Health Organization (WHO) pada tanggal 23 April 2024 melalui laman web resminya menyatakan sekitar setengah dari populasi dunia kini berisiko terkena demam berdarah *dengue* dengan perkiraan 100-400 juta infeksi terjadi pada setiap tahunnya [2]. Saat ini penyakit DBD menjadi salah satu penyakit endemi di lebih dari 100 negara di wilayah WHO diantaranya, Afrika, Amerika, Mediterania Timur, Asia Tenggara, dan Pasifik Barat [2]. Dikarenakan penularan penyakit DBD yang sering ditemukan di daerah dengan iklim tropis dan sub-tropis di seluruh dunia, maka kawasan Asia menjadi penyumbang infeksi demam berdarah terbanyak yaitu sekitar 70% dari kasus infeksi secara kumulatif di seluruh dunia [2]. Di Indonesia menurut data Kementerian Kesehatan yang dirilis pada tanggal 1 April 2024 melalui laman resmi p2ptm.kemkes.go.id menyatakan bahwa pada tahun 2023 terdapat 114.720 kasus infeksi DBD dengan 894 kasus kematian [3]. Provinsi Jawa Barat menjadi daerah dengan kasus infeksi DBD tertinggi di tahun 2023, dengan jumlah kasus infeksi sebesar 13.844, dan 90 kasus kematian berdasarkan data Dinas Kesehatan Provinsi Jawa Barat [4]. Kemudian disusul pada urutan kedua yaitu dari Provinsi Jawa Tengah dimana menurut laman resmi jatengprov.go.id yang menginformasikan pada tahun 2023 terdapat 5.814 kasus infeksi DBD dengan 362 kasus kematian [5].

Berdasarkan Direktorat Jenderal Pencegahan dan Pengendalian Penyakit (P2P) yang dirilis 1 Februari 2019 pada laman resmi p2ptm.kemkes.go.id menyatakan, penyakit DBD ini di Indonesia sering kali menimbulkan Kejadian Luar Biasa (KLB) dikarenakan penyebarannya yang cepat dan berpotensi besar menimbulkan korban jiwa [3]. Beberapa faktor yang menyebabkan meningkatnya penyebaran penularan DBD di Indonesia menjadi tinggi adalah rendahnya status kekebalan kelompok masyarakat, kepadatan penduduk dalam suatu wilayah, kurangnya kesadaran pencegahan diri, dan adanya perubahan iklim dengan intensitas curah hujan yang tinggi sehingga dapat menimbulkan genangan air di berbagai tempat (tangki air, ban bekas, kaleng bekas, botol bekas, lubang pohon, pelepah daun, dan lain lain), sehingga genangan air tersebut menjadikan tempat yang efektif bagi nyamuk untuk berkembang biak. Berdasarkan uraian penjelasan serta data di atas, sudah seharusnya penyakit DBD masih perlu mendapatkan perhatian khusus agar penyebarannya dapat terus dikendalikan.

Salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk membantu dalam penanggulangan DBD adalah melalui penelitian dan riset operasional dalam bidang teknologi terapan dan epidemiologi, dimana analisis dalam bidang tersebut membutuhkan peranan penting dari ilmu matematika melalui cabang pemodelan matematika. Model matematika merupakan representasi matematika yang menjelaskan perilaku-perilaku dari suatu permasalahan nyata. Pemodelan matematika merupakan bidang matematika untuk merepresentasikan dan menjelaskan permasalahan pada dunia nyata ke dalam bahasa dan pernyataan matematika sehingga diperoleh pemahaman dari masalah dunia nyata yang lebih tepat [6]. Pemodelan matematika dapat digunakan untuk merepresentasikan fenomena perubahan populasi terhadap waktu yang bersifat kontinu, salah satunya masalah penyebaran penyakit menular sehingga pemodelan matematika menjadi alat yang penting dalam menganalisis penyebaran dan kontrol penyakit menular [7].

Penyebaran penyakit DBD dimodelkan dengan model *host-vector* karena melibatkan populasi manusia sebagai inang (*host*) dan populasi nyamuk *Aedes aegypti* sebagai pembawa virus *dengue* (*vector*). Banyak penelitian model matematika sebelumnya yang telah diperkenalkan untuk memahami bagaimana

penyebaran demam berdarah *dengue* terjadi, dengan mempertimbangkan beberapa faktor penyebab dan menggunakan model matematika seperti SIS-SI, SIR-SI, SEIR-SI, atau bahkan sampai model matematika yang lebih kompleks. Salah satunya, penelitian yang dilakukan Wahidah, dkk (2021) yang menganalisis model matematika SIRS-SI dengan metode fungsi *Lyapunov* untuk menganalisis titik kesetimbangan bebas penyakit dan endemik, menganalisis kestabilan pada titik kesetimbangannya baik secara lokal maupun global, dan selanjutnya dilakukan simulasi numerik dengan menggunakan data kejadian kasus DBD di Sulawesi Selatan [8]. Penelitian lainnya oleh Collins Bekoe (2017) menggunakan model matematika SEI-ASEI untuk menganalisis penyebaran penyakit DBD di Thailand, dengan mempertimbangkan kompartemen populasi dari nyamuk fase akuatik dan melibatkan dua faktor pengendalian vektor sebagai parameter model, yaitu larvasida untuk nyamuk fase akuatik dan insektisida untuk nyamuk fase dewasa [9].

Penelitian selanjutnya dilakukan oleh F. B. Agosto dan M. A. Khan dengan menggunakan model matematika SVEIR-SEI dalam menganalisis penyebaran penyakit DBD dengan mempertimbangkan variabel kontrol optimal vaksinasi dan insektisida, menggunakan metode *Latin Hypercube Sampling* (LHS), *Partial Rank Correlation Coefficient* (PPRC) untuk menganalisis sensitivitas dan menggunakan prinsip *Maximum Pontryagin* untuk menganalisis kontrol optimalnya [10]. Joshua Kiddy K. Asamoah, dkk. (2021) melakukan penelitian dan menganalisis model matematika SIAPR-SI pada penyebaran penyakit DBD dengan mempertimbangkan kompartemen populasi individu dengan imun sementara (*partial*) dan individu terinfeksi tanpa bergejala (*asymptomatic*), dan penelitian ini mengusulkan penggunaan jaring kelambu tidur, pengobatan (*phrophylactics*), insektisida pembasmi nyamuk dan vaksinasi sebagai variabel kontrol optimal [11]. Adapun penelitian lainnya yang menganalisis penyebaran penyakit DBD menggunakan model matematika SEIHR-SEI dengan melibatkan dua variabel kontrol optimal yaitu upaya pencegahan diri (dengan penggunaan jaring kelambu tidur dan obat pengusir nyamuk) serta insektisida untuk pembasmi nyamuk dewasa [12].

Penelitian selanjutnya, Meksianis Z. Ndi, dkk. (2020) melakukan penelitian terhadap model matematika SEIR-ASEI dalam penyebaran penyakit DBD di Kupang, Indonesia, dengan melibatkan dalam kompartemen, populasi nyamuk pada fase akuatik dan mempertimbangkan program vaksinasi sebagai variabel kontrol optimal [13], kemudian penelitian lainnya oleh Dipo Aldila, dkk. (2022) menganalisis model matematika SAEIHR-VW dalam penyebaran penyakit DBD, dengan melibatkan kompartemen subpopulasi individu rentan yang sadar infeksi DBD (*aware (A)*) dan mempertimbangkan faktor tingkat pengaruh kampanye media untuk meningkatkan kesadaran sosial, deteksi kasus dan kapasitas rumah sakit sebagai parameter model pengendalian penyebaran DBD, dengan menggunakan data kejadian dari Provinsi Jakarta tahun 2020 [14]. Hasil kesimpulan dari penelitian tersebut adalah faktor dari kampanye media lebih berpengaruh besar dibandingkan dengan faktor deteksi kasus dan banyaknya kapasitas rumah sakit dalam mengurangi penularan DBD di Jakarta.

Dalam penelitian ini penulis mengembangkan model matematika SAEIHR-VW pada penelitian sebelumnya yang diusulkan oleh Dipo Aldila, dkk. (2022) [14], dengan melakukan beberapa perubahan terhadap model tersebut, yaitu pertama, penghapusan variabel subpopulasi individu rentan yang sadar terhadap infeksi DBD (*aware (A)*), dikarenakan dalam penelitian tersebut dijelaskan bahwa dalam kenyataannya untuk meningkatkan kewaspadaan/kesadaran sosial maupun individu terhadap bahaya infeksi DBD di lingkungan masyarakat merupakan suatu hal yang sangat sulit walaupun sudah diiringi dengan adanya program kampanye media oleh pemerintah. Hal ini disebabkan karena kewaspadaan individu yang muncul tidak konsisten bertahan lama, sehingga individu tersebut dapat kembali menjadi kurang waspada dan dapat dengan mudah terinfeksi DBD. Alasan lainnya adalah individu pada subpopulasi *aware (A)* haruslah selalu konsisten melakukan banyak kegiatan untuk pencegahan terhadap infeksi DBD dalam waktu yang lama, seperti dengan menggunakan *lotion* anti nyamuk, jaring kelambu tidur, melakukan program 3M (menutup, menguras, mendaur ulang barang bekas), dll. Sehingga penulis merasa adanya subpopulasi *aware (A)* didalam model membutuhkan banyaknya asumsi kondisi yang harus terpenuhi,

sedangkan pada kenyatannya, asumsi kondisi tersebut tersebut tidak terlalu mendukung.

Perubahan kedua yakni, penghapusan terhadap parameter faktor deteksi kasus dan banyaknya kapasitas rumah sakit, dikarenakan keduanya tidak terlalu berpengaruh terhadap model matematika SAEIHR-VW untuk mengurangi penyebaran penyakit DBD dan ketiga, menambahkan adanya variabel kontrol optimal dengan pencegahan diri, pengobatan dan insektisida. Penggunaan ketiga variabel kontrol optimal tersebut bertujuan untuk meminimalkan penyebaran penyakit DBD dengan melakukan upaya pencegahan diri untuk individu rentan dan terpapar, melakukan pemaksimalan kegiatan pengobatan untuk upaya meningkatkan laju pemulihan individu yang terinfeksi (I dan H) dan mengurangi populasi nyamuk yang ada dengan insektisida, dimana hal ini merupakan beberapa faktor utama dalam meluasnya penyebaran penularan Demam Berdarah *Dengue*.

Adapun alasan lain penulis menggunakan ketiga variabel kontrol optimal tersebut yaitu dikarenakan sesuai dengan program strategi nasional penanggulangan *dengue* 2021-2025 yang diterbitkan oleh Kementerian Kesehatan Indonesia, yakni beberapa contohnya dengan program upaya pencegahan seperti kegiatan kampanye media untuk menginformasikan informasi mengenai DBD, program 3M (menutup, menguras, mendaur ulang barang bekas), pemasangan jaring kelambu tidur, pemakaian *lotion* anti nyamuk, pemakaian obat pengusir nyamuk, upaya-upaya pengobatan secara medis yang dapat dilakukan secara mandiri maupun telah terintegrasi oleh rumah sakit, kemudian kegiatan pengendalian vektor dengan insektisida menggunakan penyemprotan, pengasapan (*fogging*), serta larvasida menggunakan abatisasi [3].

Penelitian ini penulis menggunakan model matematika SEIHR-VW yang terdapat 7 subpopulasi yang melibatkan populasi manusia dan populasi nyamuk, yaitu subpopulasi individu rentan terhadap gigitan nyamuk (*susceptible* (S)), subpopulasi individu yang terpapar DBD (*exposed* (E)), subpopulasi individu terinfeksi yang tidak dirawat di rumah sakit (*infected* (I)), subpopulasi individu terinfeksi yang dirawat di rumah sakit (*hospitalized* (H)), subpopulasi individu pulih yang memiliki sistem kekebalan tubuh sementara terhadap infeksi DBD

(*recovered* (R)), subpopulasi nyamuk rentan terhadap virus *dengue* (*susceptible mosquito* (V)) dan subpopulasi nyamuk yang terinfeksi dengan virus *dengue* (*infected mosquito* (W)). Berdasarkan model tersebut dicari bilangan reproduksi dasar ($\mathcal{R}_0$) untuk mengetahui laju penyebaran penyakit DBD, selanjutnya dilakukan analisis titik kesetimbangan bebas penyakit dan endemik, kemudian dilakukan analisis kestabilan pada titik kesetimbangannya baik secara lokal maupun global, selanjutnya diberikan simulasi numerik yang diterapkan pada model yang telah dimodifikasi sehingga dapat diperoleh analisis perilaku dinamika pada penyebaran penyakit DBD. Pada model SEIHR-VW juga dilakukan strategi kontrol optimal untuk meminimumkan penyebaran penyakit DBD, dengan menggunakan tiga variabel kontrol optimal yaitu pencegahan diri, pengobatan, dan insektisida.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang yang telah disampaikan, maka permasalahan yang dibahas dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana modifikasi model matematika SEIHR-VW pada penyebaran penyakit Demam Berdarah *Dengue*?
2. Bagaimana analisis kestabilan dari titik kesetimbangan endemik dan non endemik pada model matematika SEIHR-VW dalam penyebaran penyakit Demam Berdarah *Dengue*?
3. Bagaimana pengaplikasian kontrol optimal berupa pencegahan diri, pengobatan dan insektisida dalam mengurangi penyebaran penyakit Demam Berdarah *Dengue*?
4. Bagaimana analisis perbandingan hasil dari simulasi numerik antara model penyebaran penyakit Demam Berdarah *Dengue* dengan kontrol optimal dan tanpa kontrol optimal pada model yang telah dimodifikasi?

1.3 Batasan Masalah

Pembahasan masalah pada penelitian ini dibatasi dengan menjelaskan mengenai model matematika terhadap penyebaran Demam Berdarah *Dengue* menggunakan model SEIHR-VW dengan terdapat 7 subpopulasi, dimana

melibatkan 5 subpopulasi pada populasi manusia yaitu subpopulasi individu rentan terhadap gigitan nyamuk (*susceptible (S)*), subpopulasi individu yang terpapar DBD (*exposed (E)*), subpopulasi individu terinfeksi yang tidak dirawat di rumah sakit (*infected (I)*), subpopulasi individu terinfeksi yang dirawat di rumah sakit (*hospitalized (H)*), subpopulasi individu pulih yang memiliki sistem kekebalan tubuh sementara terhadap infeksi DBD (*recovered (R)*). Sedangkan untuk 2 subpopulasi pada populasi nyamuk *Aedes aegypti* betina, terbagi menjadi subpopulasi nyamuk rentan terhadap virus *dengue* (*susceptible mosquito (V)*) dan subpopulasi nyamuk yang terinfeksi dengan virus *dengue* (*infected mosquito (W)*). Model SEIHR-VW yang dimodifikasi mempertimbangkan tiga variabel kontrol optimal yaitu kontrol pencegahan diri berupa penggunaan obat anti nyamuk untuk mengurangi peluang gigitan nyamuk, kontrol pengobatan dengan pemberian obat-obatan medis dan kontrol insektisida berupa penyemprotan atau *fogging*.

Penelitian ini memperhatikan beberapa asumsi yaitu populasi tertutup; adanya kejadian proses migrasi dapat diabaikan; kemungkinan individu terinfeksi tidak bergantung pada usia, jenis kelamin, status sosial maupun ras; populasi pulih atau sembuh memiliki sistem kekebalan tubuh yang sementara; proses penularan infeksi penyakit DBD sampai pada manusia hanya terjadi akibat dari gigitan subpopulasi nyamuk yang telah terinfeksi virus *dengue*, sehingga tidak terjadi penularan infeksi penyakit DBD antara individu yang telah terinfeksi kepada individu yang sehat; proses penularan infeksi penyakit DBD terhadap nyamuk hanya terjadi apabila subpopulasi nyamuk rentan menggigit individu yang telah terinfeksi virus *dengue*. Diasumsikan bahwa terdapat kondisi dimana individu pulih dapat kembali menjadi individu rentan dikarenakan kehilangan kekebalan tubuhnya atau dapat dikatakan bahwa individu pulih memiliki sistem kekebalan tubuh hanya sementara terhadap infeksi penyakit DBD. Kemudian, tidak melibatkan subpopulasi pada tahap nyamuk pulih karena jangka waktu hidup nyamuk yang singkat, dan tidak terdapat peluang besar bagi nyamuk terinfeksi untuk sembuh dari infeksi DBD, dikarenakan nyamuk yang telah terinfeksi kemudian menjadi nyamuk terinfeksi selama masa hidupnya, diasumsikan pula jumlah populasi nyamuk tetap konstan.

Analisis kestabilan dari titik kesetimbangan endemik dan non endemik pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode kriteria kestabilan *Routh-Hurwitz* untuk analisis kestabilan lokal dan metode *Lyapunov* untuk analisis kestabilan global. Sedangkan untuk penyelesaian masalah kontrol optimal pada penelitian ini dilakukan dengan metode Prinsip Minimum *Pontryagin*. Kemudian simulasi numerik sebelum dan sesudah diberikan kontrol optimal dilakukan dengan metode *Runge-Kutta* maju-mundur orde 4 menggunakan perangkat lunak *Matlab R2021a* dan *Maple 2019*

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan oleh penulis dengan berkeinginan untuk mencapai beberapa tujuan yang disebutkan sebagai berikut :

1. Memperoleh pemahaman mengenai modifikasi model matematika SEIHR-VW pada penyebaran penyakit Demam Berdarah *Dengue*.
2. Mendapatkan analisis kestabilan dari titik kesetimbangan endemik dan non endemik pada model matematika SEIHR-VW dalam penyebaran penyakit Demam Berdarah *Dengue*.
3. Memperoleh kontrol optimal dengan mempertimbangkan pencegahan diri, pengobatan dan insektisida dalam mengurangi penyebaran penyakit Demam Berdarah *Dengue*.
4. Mendapatkan analisis perbandingan hasil dari simulasi numerik antara model penyebaran penyakit Demam Berdarah *Dengue* dengan kontrol optimal dan tanpa kontrol optimal model yang telah dimodifikasi.

1.5 Manfaat Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini diharapkan dapat memberikan dampak positif dan manfaat sebagai berikut :

1. Menambah pengetahuan dan memperdalam ilmu terkait pemodelan matematika dan penerapannya pada permasalahan nyata di bidang kesehatan.
2. Memberikan tambahan referensi baru terkait penerapan pemodelan matematika pada penyebaran penyakit endemi terkhususnya dengan model SEIHR-VW untuk penulisan karya ilmiah yang lebih lanjut dari

permasalahan yang berkaitan dengan Demam Berdarah *Dengue*, khususnya pada kasus yang berkaitan dengan kontrol optimal pencegahan diri, pengobatan dan insektisida sehingga dapat digunakan dalam pengambilan kebijakan untuk mengurangi angka penyebaran Demam Berdarah *Dengue*.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari lima bab yaitu dengan rincian sebagai berikut:

1. BAB I Pendahuluan

Bab ini menguraikan latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan tesis.

2. BAB II Tinjauan Pustaka dan Landasan Teori

Bab ini memuat kajian terhadap penelitian terdahulu, penyakit Demam Berdarah *Dengue* (DBD), pemodelan matematika, turunan fungsi, nilai eigen dan vektor eigen, persamaan diferensial, sistem persamaan diferensial, kepositifan dan keterbatasan solusi, titik kesetimbangan, linearisasi sistem persamaan diferensial, bilangan reproduksi dasar, kestabilan titik kesetimbangan, kriteria kestabilan *Routh-Hurwitz*, metode *Lyapunov*, kontrol optimal, dan prinsip minimum *Pontryagin*, model matematika penyebaran DBD sebelum pengembangan.

3. Bab III Hasil dan Pembahasan

Bab ini berisi model matematika SEIHR-VW pada penyebaran penyakit DBD, proses formulasi model, analisis kepositifan dan keterbatasan solusi, menentukan bilangan reproduksi dasar, analisis titik kesetimbangan, analisis kestabilan lokal dan global pada titik kesetimbangan, model penyebaran penyakit DBD dengan kontrol optimal, penerapan dan penyelesaian permasalahan kontrol optimal, serta simulasi numerik terhadap model dengan kontrol optimal dan tanpa kontrol optimal.

4. Bab IV Penutup

Bab yang berisi kesimpulan dari hasil penelitian dan saran yang diberikan bagi pembaca maupun peneliti selanjutnya,