



Implementasi Model SI_1I_2TR Dinamika Penyakit Tuberkulosis dengan Optimasi Tes Molekuler Cepat (TCM)

Muhammad Syifa Irfani¹, Nuning Nuraini²

^{1,2}Matematika, Institut Teknologi Bandung

¹20123020@mahasiswa.itb.ac.id

Corresponding author email: 20123020@mahasiswa.itb.ac.id

Abstrak: Indonesia merupakan negara peringkat kedua terbanyak kasus TBC setelah India. Semua aspek memiliki harapan yang sama yaitu menekan penyebaran penyakit TBC. Model SI_1I_2TR digunakan untuk merepresentasikan dinamika penyakit Tuberkulosis dengan Optimasi Tes Molekuler Cepat (TCM). Optimasi diberikan untuk mendeskripsikan penempatan alat TCM pada fasilitas kesehatan. Metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) digunakan untuk memperoleh hasil optimasi. Kemudian data penempatan TCM tersebut digunakan untuk melihat dinamika penyebaran penyakit dengan model SI_1I_2TR . Model ini membagi dua populasi terinfeksi yaitu populasi terinfeksi karena tes TCM dan populasi tidak tes TCM. Populasi yang tidak tes TCM ini tidak diketahui dengan pasti apakah terinfeksi atau tidak. Kemudian ditentukan nilai reproduksi dasar R_0 untuk melihat kondisi penyebaran penyakit TBC. Data yang digunakan untuk studi kasus adalah data penyebaran penyakit serta kebutuhan alat TCM di daerah kota Bandung. Hasil simulasi diperoleh bahwa adanya proses optimasi TCM mempengaruhi model SI_1I_2TR . Pengaruh tersebut terlihat pada kompartemen terinfeksi I_1 dan I_2 mengalami penurunan yang lebih cepat serta T dan R mengalami peningkatan yang lebih cepat dibandingkan tanpa adanya optimasi. Penekanan kasus TBC sangat dipengaruhi oleh optimasi penempatan TCM dan penanganan pengobatan yang sangat efektif dan cepat.

Kata kunci: TCM, PSO, Model SI_1I_2TR .

I. PENDAHULUAN

Jumlah kasus tuberkulosis (TBC) di Indonesia yaitu 969 ribu kasus dan 93 ribu kematian per tahun, setara dengan 11 kematian per jam[1]. Akibatnya Indonesia menempati peringkat kedua tertinggi kasus tuberkulosis setelah india. Menurut Global TB Report 2022, jumlah kasus TBC tertinggi di dunia terjadi pada kelompok usia kerja, terutama masyarakat berusia 25 hingga 34 tahun[2]. Pada tahun 2022 ditemukan lebih dari 724.000 kasus TBC baru, dan jumlahnya meningkat menjadi 809.000 kasus pada 2023[2], [3]. Jumlah ini jauh lebih tinggi jika dibandingkan dengan kasus sebelum pandemic yang rata-rata penemuannya dibawah 600.000 per tahun. Pemerintah melalui Kementerian Kesehatan (Kemenkes) masih berupaya melakukan peningkatan terhadap deteksi dan pendataan untuk kasus yang belum ditemukan ataupun belum dilaporkan.

Kendala dalam penemuan kasus TBC antara lain keterlambatan penderita mencari pengobatan, ketidakpatuhan berobat, pengetahuan masyarakat yang rendah, dan stigma masyarakat[4]–[6]. Kendala dari sisi fasilitas kesehatan adalah kurangnya peralatan pemeriksaan diagnosis TBC, rendahnya cakupan layanan, kurangnya tenaga kesehatan, serta kurang optimalnya penetapan Standar Operasional Prosedur (SOP) pengobatan[7]. Sebagian besar fasilitas kesehatan masih menggunakan mikroskopis untuk diagnosis dan hanya sebagian kecil menggunakan Tes Cepat Molekuler (TCM). Fasilitas kesehatan yang tidak mempunyai TCM akan mengirimkan spesimen ke fasilitas kesehatan terdekat yang mempunyai TCM. Penyediaan, pendidtribusi dan perawatan alat TCM juga belum merata di seluruh fasilitas kesehatan.

Jawa Barat merupakan salah satu provinsi dengan pememuan kasus TBC terbilang tinggi di Indonesia, berdasarkan data grafik yang di unggah oleh laman resmi TBC Indonesia untuk data TBC tahun 2023 dan 2024. Dengan jumlah penduduk terbesar yang hampir 50 juta jiwa, Jawa Barat memiliki 233.334 kasus TBC[8], [9]. Jawa Barat menjadi provinsi dengan ksus tertinggi secara nasional atau 22 persen dari total ksus di seluruh Indonesia. Seiring dengan fakta tersebut, juga diikuti



dengan fakta bahwa penempatan alat Tes Cepat Molekuler (TCM) terbanyak juga ada di Provinsi Jawa Barat yaitu sebanyak 284 alat. Namun pada kenyataannya masih banyak kasus yang belum ditemukan dan dilaporkan, sehingga Pemerintahan Provinsi Jawa Barat terus melakukan upaya pendataan guna mencapai target eliminasi TBC pada tahun 2030.

Salah satu upaya penanganan kasus TBC di Jawa Barat yaitu dengan mengkonstruksi model matematika. Pada penelitian sebelumnya diperkenalkan model kompartemen tuberkulosis dengan adanya vaksin [10], [11]. Selain itu, model dengan penambahan kompartemen pengobatan juga dilakukan pada artikel [4]–[6]. Bahkan penelitian terkait adanya bifurkasi pada model TBC pernah dilakukan pada artikel [12].

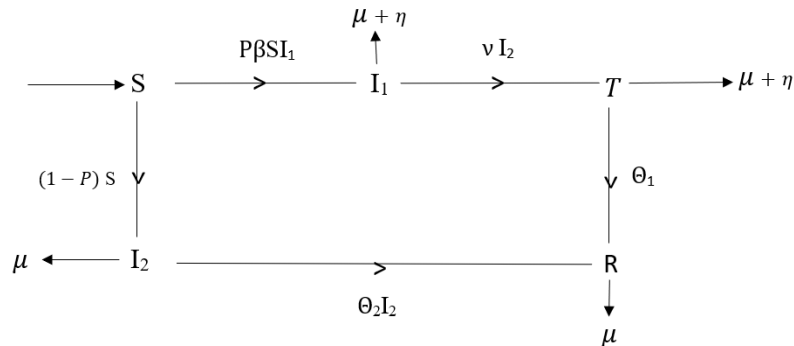
Berdasarkan permasalahan dan latar belakang tersebut artikel ini akan membahas tentang model matematika SI_1I_2TR . Model ini dikembangkan dengan membagi populasi terinfeksi diketahui dengan tes TCM dan populasi terinfeksi tidak tes TCM. Selain itu, artikel ini membahas optimasi penempatan alat TCM, sehingga dapat menjadi acuan untuk penempatan alat TCM dapat fasilitas kesehatan terkait guna percepatan pendataan kasus TBC. Hasil optimasi tersebut digunakan sebagai parameter yang ada pada model SI_1I_2TR .

II. MODEL DINAMIKA PENYAKIT TUBERKULOSIS

Penyakit tuberkulosis dapat disimulasikan oleh suatu model matematika. Model kompartemen dipilih untuk menggambarkan dinamika tersebut. Asumsi yang digunakan untuk menjelaskan dinamika penyakit tuberkulosis yaitu

- Populasi tiap rumah sakit tertutup.
- Populasi manusia dibagi menjadi lima kompartemen, yaitu kompartemen populasi rentan (S), kompartemen populasi terinfeksi di tes TCM (I_1), kompartemen populasi terinfeksi (I_2), kompartemen populasi proses pengobatan (T), dan kompartemen populasi sehat (R).
- Individu rentan dapat terinfeksi akibat kontak langsung dengan individu terinfeksi dengan laju sebesar β .
- Tingkat kelahiran dan kematian diasumsikan konstan.
- Populasi diasumsikan memiliki kemungkinan yang sama dalam melakukan kontak fisik dengan individu lainnya.
- Manusia yang rentan adalah manusia dengan tingkat imun yang rendah dan belum tertular bakteri.
- Manusia terinfeksi adalah manusia yang telah tertular bakteri dan dapat menularkan ke individu lainnya.
- Terdapat populasi terinfeksi yang tidak tes TCM didefinisikan sebagai I_2 , untuk kompartemen I_2 tidak terdapat laju interaksi melainkan proporsi perpindahan populasi rentan S terhadap populasi terinfeksi I_2 sebesar $p - 1$.
- Tingkat kesembuhan tiap individu terinfeksi sama.

Berdasarkan asumsi yang telah dijelaskan, diagram alir untuk dinamika penyakit tuberkulosis digambarkan pada Gambar 1, dimana sistem persamaan yang berlaku adalah sebagai berikut



Gambar 1. Diagram alir model SI_1I_2TR

$$\begin{aligned}
 \frac{dS}{dt} &= \Lambda - p\beta SI_1 - (p-1)S - \mu S \\
 \frac{dI_1}{dt} &= p\beta SI_1 - vI_1 - (\mu + \eta)I_1 \\
 \frac{dI_2}{dt} &= (p-1)S - \theta_2 I_2 - (\mu + \eta)I_2 \\
 \frac{dT}{dt} &= vI_1 - \theta_1 T - \mu T \\
 \frac{dR}{dt} &= \theta_1 T + \theta_2 I_2 - \mu R
 \end{aligned} \tag{1}$$

Sistem persamaan (1) memiliki beberapa parameter yang diasumsikan positif untuk setiap parameter. Lebih jelasnya mengenai deskripsi parameter yang digunakan pada model, dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Deskripsi Parameter Model SI_1I_2TR

Parameter	Deskripsi
Λ	Laju rekrutmen
p	Proporsi penggunaan TCM
β	Laju infeksi TBC
μ	Laju kematian alami
η	Laju kematian akibat TBC
v	Laju pengobatan
θ_1	Laju kesembuhan karena berobat
θ_2	Laju kesembuhan alami

III. ANALISIS DINAMIK

Analisis kestabilan sistem dinamik dilakukan pada persamaan (1). Berdasarkan model dinamika penyakit TBC pada persamaan (1) terdapat dua buah titik ekuilibrium yaitu

$$E_1 = \left(\frac{\Lambda}{1-p+\mu}, 0, -\frac{\Lambda(p-1)}{(1-p+\mu)(\theta_2+\mu+\eta)}, 0, -\frac{\theta_2\Lambda(p-1)}{(1-p+\mu)(\theta_2+\mu+\eta)\mu} \right)$$

$$E_2 = (S^*, I_1^*, I_2^*, T^*, R^*)$$

dengan



$$S^* = \frac{v + \mu + \eta}{p\beta}, \quad I_1^* = \frac{\Lambda p\beta + (p-1)(v + \mu + \eta) - \mu(\mu + v)}{(v + \mu + \eta)p\beta},$$

$$I_2^* = -\frac{(v + \mu + \eta)(p-1)}{p\beta(\theta_2 + \mu + \eta)}, \quad T^* = \frac{v(\Lambda p\beta - \mu^2 - (\mu + 1)\eta - (1-p)(\mu + \eta))}{p\beta(\theta_1 + \mu)(v + \mu + \eta)}$$

$$R^* = \frac{1}{p\beta(\theta_1 + \mu)(v + \mu + \eta)} (2\theta_2\mu\eta(\theta_1 + v)(1-p) + \theta_2\eta^2(\theta_1 + \mu)(1-p) + \theta_1v\mu(2\eta - \mu)(1 + \mu) + \theta_1v(\theta_2 + vp)(\mu + \eta) - (v + \eta)(2\theta_2p\mu^2 + \theta_1v\eta) + \theta_1v\Lambda p\beta_1(\mu + \eta + \theta_2) - \theta_1v\mu\theta_2(\eta + p) - \theta_1v^2\mu(\eta + \theta_2) + \theta_2\theta_1\mu^2(1-v) + \theta_1vp(\mu^2 + \eta^2) - \mu v^2(\theta_1 - \theta_2) + \theta_1vp\eta(2\mu - \theta_2) - \theta_2\mu^3(p-1) + 2\theta_2\mu^2(\eta + 1) - \theta_2p\mu(\mu\theta_1 + v^2) - \theta_1v\mu(v\mu + \eta^2))$$

Kedua titik ekuilibrium dianalisis kestabilannya dengan menggunakan matriks jacobii. Berdasarkan persamaan (1) diperoleh matriks jacobii sebagai berikut

$$J = \begin{pmatrix} -I_1p\beta - 1 + p - \mu & -p\beta S & 0 & 0 & 0 \\ I_1p\beta & p\beta S - v - \mu - \eta & 0 & 0 & 0 \\ 1 - p & 0 & -\theta_2 - \mu - \eta & 0 & 0 \\ 0 & v & 0 & -\theta_1 - \mu & 0 \\ 0 & 0 & \theta_2 & \theta_1 & -\mu \end{pmatrix} \quad (2)$$

Untuk titik ekuilibrium yang pertama diperoleh matriks jacobii sebagai

$$J_1 = \begin{pmatrix} -1 + p - \mu & -\frac{p\beta\Lambda}{1-p+\mu} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{p\beta\Lambda}{1-p+\mu} - v - \mu - \eta & 0 & 0 & 0 \\ 1 - p & 0 & -\theta_2 - \mu - \eta & 0 & 0 \\ 0 & v & 0 & -\theta_1 - \mu & 0 \\ 0 & 0 & \theta_2 & \theta_1 & -\mu \end{pmatrix} \quad (3)$$

Berdasarkan matriks jacobii pada persamaa (3) diperoleh nilai eigen yaitu

$$\lambda_1 = -\mu, \quad \lambda_2 = -\theta_1 - \mu, \quad \lambda_3 = -1 + p - \mu, \quad \lambda_4 = -\theta_2 - \mu - \eta$$

$$\lambda_5 = \frac{\Lambda p\beta - \mu(\mu + \eta + 1) - v(\mu - p + 1) + \eta(p - 1)}{1 - p + \mu}$$

Perhatikan penyebut dari λ_5 merupakan $-\lambda_3$, jika $\lambda_5 < 0$ maka $\Lambda p\beta - \mu(\mu + \eta + 1) - v(\mu - p + 1) + \eta(p - 1) > 0$. Nilai parameter p adalah 0 dan 1, maka $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4 < 0$, agar $\lambda_5 < 0$ maka $\frac{\Lambda p\beta}{\mu} < 1 - p$. Kesimpulannya titik ekuilibrium pertama stabil jika $\frac{\Lambda p\beta}{\mu} < 1 - p$. Kemudian untuk titik ekuilibrium yang kedua disubstitusikan ke persamaan (2) sehingga diperoleh matriks jacobii sebagai



$$J_2 = \begin{pmatrix} a_{11} & -v - \mu - \eta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 - p & 0 & -\theta_2 - \mu - \eta & 0 & 0 \\ 0 & v & 0 & -\theta_1 - \mu & 0 \\ 0 & 0 & \theta_2 & \theta_1 & -\mu \end{pmatrix} \quad (4)$$

Dengan $a_{11} = -\frac{\Delta p\beta - \mu(\mu + \eta + 1) - v(\mu - p + 1) + \eta(p - 1)}{1 - p + \mu} - 1 + p - \mu$. Berdasarkan matriks jacobii diperoleh nilai eigen yaitu

$$\lambda_1 = -\mu, \quad \lambda_2 = -\theta_1 - \mu, \quad \lambda_3 = -\theta_2 - \mu - \eta$$

Diperoleh nilai eigen, akibatnya pada titik ekuilibrium yang kedua memiliki jenis kestabilan yaitu stabil jika $\lambda_4 < 0$ dan $\lambda_5 < 0$.

Selanjutnya, model dinamika penyakit Tuberkulosis ini akan ditentukan nilai reproduksi dasar R_0 . Pertama-tama akan ditentukan persamaan yang terinfeksi yaitu

$$\begin{aligned} \frac{dI_1}{dt} &= p\beta SI_1 - vI_1 - (\mu + \eta)I_1 \\ \frac{dI_2}{dt} &= (p - 1)S - \theta_2 I_2 - (\mu + \eta)I_2 \\ \frac{dT}{dt} &= vI_1 - \theta_1 T - \mu T \end{aligned} \quad (5)$$

Akan ditentukan bilangan reproduksi dasar (R_0) pada model TBC dengan menggunakan metode NGM. Berdasarkan persamaan (5) didefinisikan matriks interaksi F dan matriks transisi V sebagai berikut

$$F = \begin{pmatrix} p\beta S & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ dan } V = \begin{pmatrix} (v + \mu + \eta) & 0 & 0 \\ 0 & (\theta_2 + \mu + \eta) & 0 \\ -v & 0 & (\theta_1 + \mu) \end{pmatrix}$$

Kemudian $V^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{(v + \mu + \eta)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(\theta_2 + \mu + \eta)} & 0 \\ \frac{v}{(v + \mu + \eta)(\theta_1 + \mu)} & 0 & \frac{1}{(\theta_1 + \mu)} \end{pmatrix}$, Sehingga diperoleh matriks

$$FV^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{p\beta S}{v + \mu + \eta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Akibatnya nilai eigen pada matriks diatas merupakan nilai reproduksi dasarnya yaitu

$$R_0 = \frac{p\beta S}{v + \mu + \eta} \quad (6)$$



IV. OPTIMASI TCM DENGAN METODE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

Metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) merupakan salah satu metode optimasi dengan menirukan kawanan serangga seperti semut, rayap, lebah, dan tawon[13]–[15]. Algoritma ini mendeskripsikan setiap individu atau partikel memiliki kecerdasannya sendiri, kelompok atau kolektif dari kawanan tersebut[15]. Salah satu kelebihanannya adalah jika salah satu anggota kawanan menemukan jalur yang baik menuju makanan, maka anggota kawanan lainnya akan mengikuti jalur tersebut secara instan[14]–[16]. Algoritma PSO diperkenalkan pertama kali oleh Kennedy dan Eberhart pada tahun 1995[16].

Pada algoritma PSO memiliki posisi awal secara acak pada multidimensi dan memiliki dua buah karakteristik yaitu posisi dan kecepatan. Setiap partikel secara acak berkeliaran pada ruang dengan tujuan menentukan posisi terbaik (sumber makanan atau fungsi tujuan tertentu. Algoritma PSO memiliki asumsi sebagai berikut[16]

1. Ukuran koloni yaitu bilangan asli (N)
2. Nilai awal populasi koloni berada pada range X^l dan X^u secara acak, masing masing merupakan batas atas dan bawah dari koloni.
3. Tentukan kecepatan partikel, untuk semua partikel yang berpindah menuju titik optimal. Kecepatan awal yang digunakan adalah nol.
4. Dalam iterasi i , tentukan dua buah parameter penting dengan menggunakan tipe partikel j .
 - a. Nilai histori terbaik $X_j(i)$ yaitu koordinat partikel ke- j pada iterasi ke- i . Dua buah nilai histori terbaik yaitu P_{best} dengan fungsi tujuan tertinggi $f[X_j(i)]$ ditemui oleh semua partikel j disetiap iterasi i dan G_{best} dengan fungsi tujuan tertinggi $f[X_j(i)]$ ditemui disemua iterasi oleh semua partikel.
 - b. Dalam menentukan kecepatan partikel- j pada iterasi ke- i menggunakan persamaan berikut

$$V_j(i) = V_j(i - 1) + c_1 r_1 [P_{best,j} - X_j(i - 1)] + c_2 r_2 [G_{best} - X_j(i - 1)]$$

$$V_j(i) = V_j(i - 1) + c_1 r_1 [P_{best,j} - X_j(i - 1)] + c_2 r_2 [G_{best} - X_j(i - 1)] \quad (7)$$

dengan $j = 1, 2, \dots, N$, c_1 dan c_2 adalah koefisien percepatan kognitif dan sosial. Nilai r_1 dan r_2 adalah bilangan acak dalam rentang $[0, 1]$ yang berdistribusi seragam.

- c. Untuk menentukan posisi atau koordinat partikel- j pada iterasi ke- i menggunakan persamaan berikut

$$X_j(i) = X_j(i - 1) + V_j(i) \quad (8)$$

dengan $j = 1, 2, \dots, N$.

5. Cek konvergensi solusi, jika posisi partikel konvergen pada suatu nilai, maka metode ini konvergen. Jika kriteria konvergensi ini tidak terpenuhi, maka langkah ke-4 berulang dengan update iterasi menjadi $i = i + 1$, dan menghitung P_{best} dan G_{best} yang baru. Proses iterasi berlanjut sampai semua partikel berkumpul pada solusi optimum yang sama.

Tahap ke-4 pada algoritma PSO ini melakukan iterasi secara berulang sampai memperoleh hasil yang terbaik. Sebelum proses ini terjadi, diperlukan data jarak tiap partikel. Jarak tiap partikel diperoleh dengan menggunakan persamaan haversine [17], [18]. Persamaan haversine direresentasikan pada persamaan (9).

$$jarak = 2R \sin^{-1} \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\Delta lat}{2} \right) + \cos(lat2) \cos(lat1) \sin^2 \left(\frac{\Delta long}{2} \right)} \right) \quad (9)$$

dimana R adalah radius bumi sebesar 6371 km, lat adalah latitude, $long$ adalah longitude.

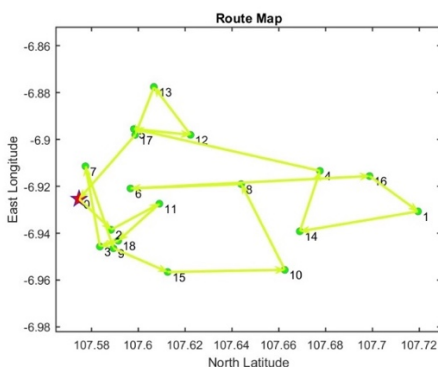
V. STUDI KASUS DAN SIMULASI

Studi kasus yang diterapkan adalah dinamika penyakit tuberkulosis di kota Bandung. Data yang digunakan untuk melakukan optimasi penempatan alat TCM sebanyak 19 tempat fasilitas kesehatan. Data tersebut disajikan dalam Tabel 2.

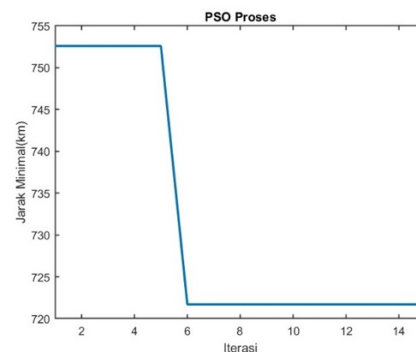
Tabel 2. Data Faskes Penempatan TCM Kota Bandung

Faskes	Logitude	Latitude
BBKPM Bandung	107,5966372	-6,9208997
Labkes Jabar	107,5981291	-6,8955020
Puskesmas Upt Arcamanik	107,6776130	-6,9133860
Puskesmas Upt Caringin	107,5835410	-6,9457060
Puskesmas Upt Cetarip	107,5883440	-6,9385000
Puskesmas Upt Cibiru	107,7196060	-6,9306950
Puskesmas Upt Cibuntu	107,5746560	-6,9253830
Puskesmas Upt Garuda	107,5773790	-6,9113960
Puskesmas Upt Ibrahim Adjie	107,6439870	-6,9190310
Puskesmas Upt Kopo	107,5893330	-6,9464470
Puskesmas Upt Margahayu Raya	107,6626030	-6,9556730
Puskesmas Upt Pasundan	107,6090010	-6,9274010
Puskesmas Upt Puter	107,6223070	-6,8980380
RS Paru Dr. H. A. Rotinsulu	107,6066300	-6,8775482
RS Umum Al-Islam Bandung	107,6690000	-6,9392200
RS Umum Bhayangkara Sartika Asih	107,6125238	-6,9565758
RS Umum Daerah Kota Bandung	107,6988474	-6,9156049
RS Umum Pusat Dr. Hasan Sadikin	107,5986253	-6,8980462
RSUD Bandung Kiwari	107,5914163	-6,9432094

Simulasi numerik dilakukan untuk mengetahui apakah dinamika penyakit tuberkulosis pada sistem persamaan (1) dapat menggambarkan keadaan real secara baik. Tujuan yang diharapkan dengan adanya optimasi PSO, sistem persamaan (1) dapat memberikan ilustrasi bahwa proses penyembuhan lebih cepat dan menekan populasi terinfeksi, sehingga rendahnya penyebaran penyakit. Hasil optimasi pada penempatan alat TCM dengan menggunakan PSO dapat dilihat alur penempatan alat TCM pada Gambar 2a.



Gambar 2a.



Gambar 2b.

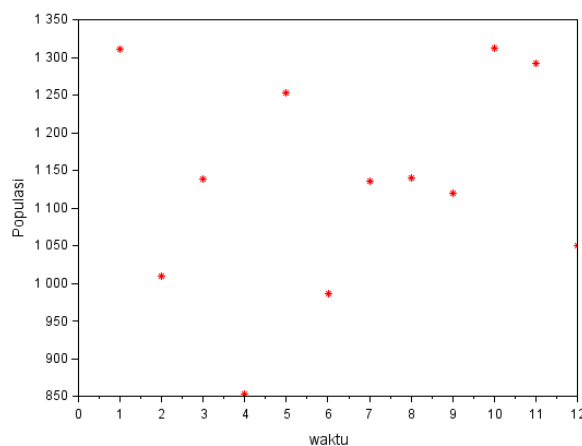
Gambar 2. (2a) Rute penempatan TCM di kota Bandung. (2b) Proses optimasi dengan menggunakan algoritma



Hasil yang diperoleh mendapatkan rute terbaik yaitu 0 -> 2 -> 11 -> 18 -> 3 -> 7 -> 9 -> 15 -> 10 -> 8 -> 6 -> 16 -> 1 -> 14 -> 4 -> 5 -> 12 -> 13 -> 17 -> 0, dengan total jarak yang ditempuh adalah 721.7009 km dan jarak tempuh perjalanan sejauh 78,14 km. Rute tersebut berangkat dari Puskesmas UPT Cibuntu dengan jarak tempuh dan total jarak paling minimum dibandingkan rute pemberangkatan faskes lainnya, lebih lengkapnya dapat dilihat pada Tabel 3. Validasi PSO yang meminimumkan tujuan dapat dilihat pada Gambar 2b yang menunjukkan proses PSO menuju nol.

Tabel 3. Hasil optimasi pada penentuan rute perjalanan dan total jarak

Faskes	Rute Perjalanan	Total Jarak
BBKPM Bandung	87,02	675,25
Labkes Jabar	82,55	792,2299
Puskesmas Upt Arcamanik	82,57	839,3393
Puskesmas Upt Caringin	79,91	918,1909
Puskesmas Upt Cetarip	88,57	792,5528
Puskesmas Upt Cibiru	89,6	897,6676
Puskesmas Upt Cibuntu	78,14	721,7009
Puskesmas Upt Garuda	90,93	919,3174
Puskesmas Upt Ibrahim Adjie	84,43	838,0508
Puskesmas Upt Kopo	85,57	945,6733
Puskesmas Upt Margahayu Raya	82,99	844,68
Puskesmas Upt Pasundan	87,87	910,3331
Puskesmas Upt Puter	82,29	750,7045
RS Paru Dr. H. A. Rotinsulu	96,02	942,5377
RS Umum Al-Islam Bandung	91,19	922,2043
RS Umum Bhayangkara Sartika Asih	95,25	936,1261
RS Umum Daerah Kota Bandung	96,35	897,4089
RS Umum Pusat Dr. Hasan Sadikin	87,3	787,1471
RSUD Bandung Kiwari	94,96	873,0084



Gambar 3. Data penyebaran penyakit TBC di kota Bandung

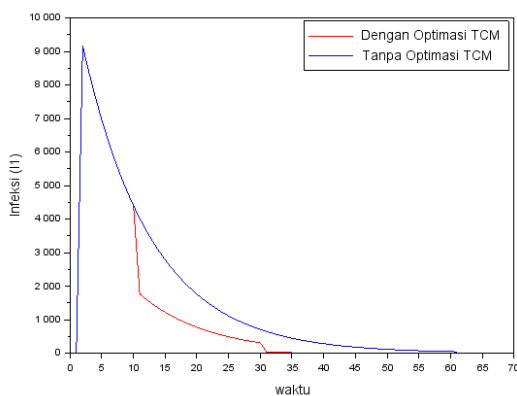
Setelah proses optimasi dilakukan dan memperoleh data rute terbaik dalam penempatan alat TCM, maka dilakukan simulasi pada model SI_1I_2TR . Nilai parameter yang digunakan untuk persamaan (1) yaitu pada Tabel 4. Sementara itu nilai β diperoleh dari hasil estimasi parameter menggunakan LSE (*Least Square Error*) berdasarkan data pada Gambar 3.



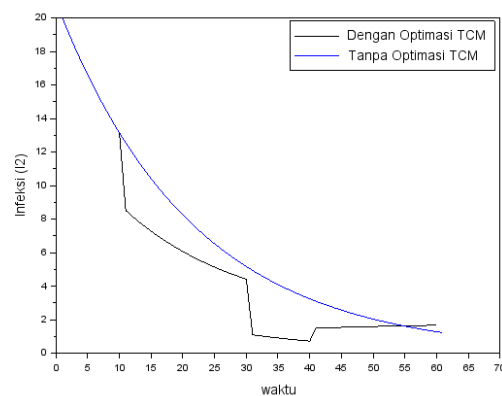
Tabel 4. Nilai Parameter Model SI_1I_2TR

Λ	β	μ	ν	η	θ_1	θ_2	R_0
0.85	0.237	0.0167	0.7	0.2	0.91	0.25	0.2584

Perhatikan pada Gambar 4a, populasi terinfeksi I_1 mengalami penurunan dengan cepat mencapai populasi menuju nol pada waktu $t = 32$ ketika diterapkan optimasi penempatan TCM. Sementara itu, ketika tidak ada optimasi penempatan TCM untuk mencapai populasi menuju nol membutuhkan waktu $t = 60$.



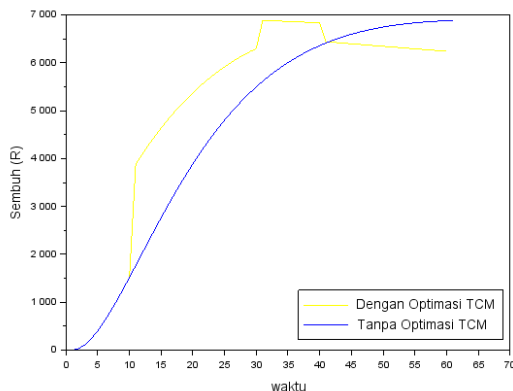
Gambar 4a.



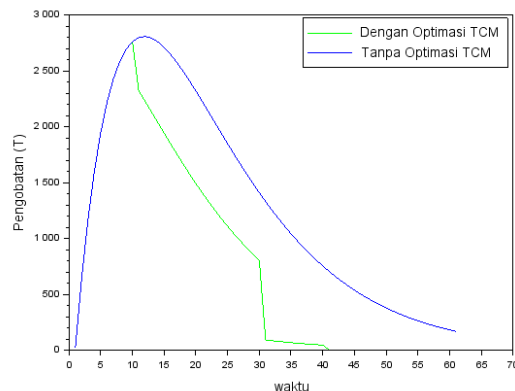
Gambar 4b.

Gambar 4. Hasil simulasi pada populasi terinfeksi: (4a) I_1 (4b) I_2

Kemudian pada Gambar 4b, populasi terinfeksi I_2 mengalami penurunan dengan cepat juga, sama halnya untuk populasi I_1 . Pada $t = 30$ populasi kurang dari 2 ketika terdapat optimasi penempatan TCM. Sementara itu, tanpa adanya optimasi populasi kurang dari 2 akan dicapai pada saat $t = 60$.



Gambar 5a.



Gambar 5b.

Gambar 5. Hasil simulasi pada populasi : (2a) sehat (R) (2b) pengobatan (T)

Pada populasi pengobatan dan sehat mengalami hal serupa yaitu prosesnya cepat. Pada populasi pengobatan penurunannya sangat cepat yang menandakan ada perpindahan populasi menuju populasi sehat. Validasi bahwa populasi pengobatan menuju populasi sehat ditandai dengan peningkatan yang



sangat cepat juga di populasi sehat. Lebih jelasnya perhatikan Gambar 5a dan 5b yang menunjukkan perbedaan antara ada dan tidak adanya optimasi TCM pada dinamika penyakit Tuberkulosis.

VI. KESIMPULAN

Optimasi TCM menggunakan metode PSO sangat berpengaruh terhadap dinamika penyakit TBC. Metode PSO dasar digunakan pada optimasi TCM dengan data jarak, koordinat, permintaan, dan jadwal penerimaan. Hasil optimasi digunakan untuk mengukur proporsi masuk dari populasi S ke I_1 atau I_2 . Dinamika penyakit TBC dengan adanya optimasi mempercepat tingginya populasi sehat, dan menurunkan populasi terinfeksi lebih cepat, akibatnya penyakit TBC terkendali. Kondisi bebas penyakit dapat disimulasikan dengan baik dan diperoleh $R_0 = 0.2584$.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih kami sampaikan kepada Nuning Nuraini yang telah kebersamai proses penulisan artikel ini, serta kepada Dian Nuraiman yang telah memberikan sarannya. Kemudian terimakasih kepada prodi Matematika Institut Teknologi Bandung yang telah mendukung untuk bisa ikut serta dalam kegiatan seminar nasional.

REFERENSI

1. “Deteksi TBC Capai Rekor Tertinggi di Tahun 2022.” <https://kemkes.go.id/id/rilis-kesehatan/deteksi-tbc-capai-rekor-tertinggi-di-tahun-2022> (accessed Jun. 21, 2024).
2. “Global Tuberculosis Report 2022.” <https://www.who.int/teams/global-tuberculosis-programme/tb-reports/global-tuberculosis-report-2022> (accessed Jun. 21, 2024).
3. W. health Organisation, *Report 20-23*, vol. t/malaria/, no. March. 2023.
4. N. Inayah, M. Manaqib, N. Fitriyati, and I. Yupinto, “Model Matematika Dari Penyebaran Penyakit Pulmonary Tuberculosis Dengan Penggunaan Masker Medis,” *BAREKENG J. Ilmu Mat. dan Terap.*, vol. 14, no. 3, pp. 461–472, 2020, doi: 10.30598/barekengvol14iss3pp461-472.
5. N. Zahwa, U. Nabilla, and N. Nurviana, “Model Matematika Sitr pada Penyebaran Penyakit Tuberculosis di Provinsi Aceh,” *J. Pendidik. Mat. dan Sains*, vol. 10, no. 1, pp. 8–14, 2022, doi: 10.21831/jpms.v10i1.50683.
6. H. L. Saputra, Sutimin, and Sutrisno, “Analisis Kestabilan Model Penyebaran Penyakit Tuberculosis dengan Infeksi Tersaturasi,” *J. Mat. Thales*, vol. 2, no. 1, pp. 11–22, 2020.
7. M. Pelatihan *et al.*, “Khusus Peserta,” 2022.
8. “Badan Pusat Statistik Provinsi Jawa Barat.” <https://jabar.bps.go.id/pressrelease/2021/01/21/1010/hasil-sensus-penduduk-2020-di-provinsi-jawa-barat.html> (accessed Jun. 21, 2024).
9. “Dinas Kesehatan Provinsi Jawa Barat.” https://diskes.jabarprov.go.id/informasipublik/detail_berita/ek83c0cvd2hZb1JxaDdDTzV5VEZ3UT09 (accessed Jun. 21, 2024).
10. L. N. Nkamba, T. T. Manga, F. Agouanet, and M. L. M. Manyombe, “Mathematical model to assess vaccination and effective contact rate impact in the spread of tuberculosis,” *J. Biol. Dyn.*, vol. 13, no. 1, pp. 26–42, Jan. 2019, doi: 10.1080/17513758.2018.1563218.
11. A. Y. Ayinla, W. A. M. Othman, and M. Rabiun, “A Mathematical Model of the Tuberculosis Epidemic,” *Acta Biotheor.*, vol. 69, no. 3, pp. 225–255, Sep. 2021, doi: 10.1007/S10441-020-09406-8.
12. C. F. Liantoko and L. K. Budiasih, “Bifurkasi Mundur dalam Model Matematika Penyebaran Penyakit Tuberculosis dengan Mempertimbangkan Laju Deteksi dan Pengobatan,” vol. 4, no. 1, pp. 2986–4180, 2023, [Online]. Available: <https://online-journal.unja.ac.id/msa>
13. E. F. G. Goldberg, G. R. De Souza, and M. C. Goldberg, “Particle swarm for the traveling salesman problem,” *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 3906 LNCS, no. September, pp. 99–110, 2006, doi: 10.1007/11730095_9.
14. D. Nuraiman, F. Ilahi, Y. Dewi, and E. A. Z. Hamidi, “A New Hybrid Method Based on Nearest Neighbor Algorithm and 2-Opt Algorithm for Traveling Salesman Problem,” *Proceeding 2018 4th Int. Conf. Wirel. Telemat. ICWT 2018*, pp. 2018–2021, 2018, doi: 10.1109/ICWT.2018.8527878.



15. Singiresu S. Rao, *Engineering Optimization Theory and Practice*. John Wiley & Sons, Ltd, 2019. doi: <https://doi.org/10.1002/9781119454816.ch13>.
16. J. Kennedy and R. Eberhart, “Particle swarm optimization,” *Proc. ICNN’95 - Int. Conf. Neural Networks*, vol. 4, pp. 1942–1948, doi: 10.1109/ICNN.1995.488968.
17. R. A. Azdy and F. Darnis, “Use of Haversine Formula in Finding Distance between Temporary Shelter and Waste End Processing Sites,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1500, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1500/1/012104.
18. A. N. Abadi Nugroho, “Penerapan Metode Haversine Formula Untuk Penentuan Titik Kumpul pada Aplikasi Tanggap Bencana,” *Metik J.*, vol. 4, no. 2, pp. 69–75, 2020, doi: 10.47002/metik.v4i2.190.