



## ESTIMASI MODEL PENYEBARAN PENYAKIT KOLERA DENGAN KARANTINA MENGGUNAKAN ENSEMBEL KALMAN FILTER

Ahmad Maulana Syafi'i

Institut Agama Islam Negeri (IAIN) Samarinda

[Maulanasyafii95@gmail.com](mailto:Maulanasyafii95@gmail.com)

---

Citation:

Syafi'i, Ahmad Maulana. (2021). *Estimasi Model Penyebaran Penyakit Kolera dengan Karantina Menggunakan Ensemble Kalman Filter*. *bjsme*, 1(2), 93-101.

---

### Abstrack

Pada paper ini menjelaskan tentang model penyebaran penyakit kolera. Digunakan model yang diberikan oleh Lemos-Paiao dengan model tipe SIQR (Susceptible-Infected-Quarantined- Recovered) dan mempertimbangkan kelas konsentrasi bakteri. Pada model ini terdapat populasikarantina yang terdiri dari populasi terinfeksi bakteri kolera. Ensemble Kalman Filter adalah metode estimasi modifikasi kalman filter yang dapat digunakan untuk sistem dinamik non-linear. Pada paper ini digunakan metode EnKF untuk mengestimasi model penyebaran penyakit kolera dalam periode waktu tertentu. Hasil yang didapatkan ialah error maksimum relatif dari estimasi setiap populasi didapatkan  $\leq 5\%$ . Dengan demikian metode Ensemble Kalamn Filter merupakan metode yang cocok digunakan dalam mengestimasi model penyebaran penyakit kolera.

**Kata Kunci:** SIQR, ensemble kalman filter, kolera.

---

### A. Pendahuluan

Masalah kesehatan merupakan masalah yang penting bagi keberlangsungan hidup manusia. Kesehatan dapat berkaitan dengan ekologi atau lingkungan tempat tinggal. Salah satu penyakit yang terjadi karena faktor ketidaksehatan lingkungan adalah penyakit kolera([10],[9],[2],[3],[5],[6]). Kolera adalah penyakit diare akut yang disebabkan oleh infeksi usus dengan bakteri *Vibrio cholerae* dengan tipe O1 atau O139 ([10], [5]). Penularan kolera bisa melalui makanan dan minuman yang terkontaminasi oleh bakteri *Vib-rio cholerae*([2], [3], [5],[7]).Gejala utama infeksi kolera adalah banyak diare berair yang hebat, muntah, kram kaki, penurunan tekanan darah, gagal ginjal, dan jika tidak diobati menyebabkan dehidrasi cepat, asidosis, kolaps sirkulasi dan kematian dalam 12-24 jam ([3], [5], [10],[1]). Beberapa penelitian juga mengatakan bahwa orang yang sembuh hanya memiliki kekebalan dalam beberapa minggu atau bulan([3], [10]).

Kolera cepat menyebar di daerah yang padat penduduk, sanitasi air yang buruk dan kurangnya penyediaan air bersih([1],[10],[8]). Oleh karena itu penyakit kolera banyak diidentifikasi di negara miskin dan berkembang [5]. Penyakit kolera muncul pertama kali di India pada tahun 1817 [2]. Selanjutnya Pada tahun 1961, wabah kolera mulai masuk di Indonesia dan selama sekitar 4 dekade wabah kolera mulai bermunculan di dunia [4]. Bakteri *V. cholerae* menginfeksi 1,4 hingga 4,3 juta orang serta 52 negara melaporkan 142.311 kasus kolera dan 4564 kematian pada tahun 2002([5],[4]). Pada tahun 2007-2011 wabah kolera kembali terjadi di Angola, Haiti dan Zimbabwe([9],[3]). Berdasarkan fakta diatas terlihat bahwa penyebaran penyakit kolera masih menjadi penyakit menular yang menakutkan.

Penelitian tentang model penyebaran penyakit kolera telah banyak dilakukan diantaranya dilakukan oleh Neilan dkk pada tahun 2010 yang menerapkan kendali optimal berupa intervensi sebagai strategi penanganan penyebaran penyakit kolera. Pada model ini, bakteri penyebab penyakit kolera dibagi menjadi bakteri yang memiliki hyper infeksi dan less infeksi sehingga pada populasi infected juga dibagi menjadi terinfeksi ringan dan berat [7]. Adapun intervensi yang dilakukan pada penelitiannya adalah berupa vaksin, sanitasi dan pemberian obat rehidrasi.

Selanjutnya Mwasia dkk melakukan pemodelan kolera dengan public health interventions pada tahun 2011. Berbeda seperti Neilan, pada penelitian ini vaksin dan pengobatan bukan sebagai kontrol melainkan dijadikan sebagai variabel state. Pada penelitian ini juga terdapat variabel state populasi terdidik yaitu populasi yang telah mendapat pembelajaran tentang kolera. Pada penelitian ini juga terdapat populasi orang dikarantina dan diasumsikan populasi terdidik akan bersedia untuk dikarantina jika dicuragai terkena penyakit kolera.

Selanjutnya Lemos-Paiao dkk pada tahun 2016 membahas tentang penyebaran model penyakit kolera dengan memberikan kontrol berupa treatment (pengobatan) yang dilakukan pada populasi dikarantina. Pemberian kontrol berupa treatment diterapkan pada populasi infected dengan tujuan mengurangi jumlah populasi yang terinfeksi penyakit kolera. Populasi infected yang dikenai treatment akan dikarantina sehingga terdapat populasi yang dikarantina. Meskipun model yang dibuat berbeda-beda, namun penelitian-penelitian yang telah ada memiliki tujuan yang sama yaitu mengestimasi jumlah populasi dari setiap variabel state dari model penyakit kolera sehingga dapat dilihat bagaimana penyebaran penyakit kolera dalam periode waktu yang diberikan.

Kalman Filter adalah metode estimasi untuk sistem dinamik linear. Namun pada kenyataannya, model penyebaran penyakit kolera merupakan model sistem non-linear. Untuk mengatasi permasalahan tersebut dikembangkan algoritma Kalman Filter yang dapat diterapkan pada model non-linear. Salah satu metode Kalman Filter untuk sistem non-linear adalah Ensembel Kalman Filter (EnKF). EnKF adalah sebuah metode yang efektif untuk estimasi, salah satu dari aplikasi tersebut ialah mengestimasi penyebaran penyakit Kolera dengan pemberian karantina. Beberapa penelitian tentang estimasi parameter suatu sistem non-linear menggunakan metode EnKF telah banyak dilakukan diantaranya Ngatini(2016) telah mengaplikasikan metode EnKF pada sistem Autonomous Underwater Vehicle (UAV). Metode EnKF digunakan untuk mengestimasi posisi AUV tanpa

dilakukan linearisasi. Selanjutnya Ying Zhang melakukan prediksi tren influenza menggunakan metode EnKF. Model influenza merupakan model non-linear sehingga dapat diterapkan metode EnKF.

Berdasarkan penelitian yang telah ada, kami tertarik untuk menggunakan metode EnKF untuk mengestimasi penyebaran penyakit kolera. Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB dan simulasi menunjukkan estimasi model penyebaran penyakit kolera selama periode waktu yang diberikan.

## B. Tinjauan Pustaka

### 1. Model Matematika Penyebaran Penyakit Kolera

Pada paper ini digunakan model [3] dengan tipe *SIQR* (Susceptible-Infected-Quarantined-Recovered) dan mempertimbangkan kelas konsentrasi bakteri ( $B$ ) untuk dinamika kolera. Model dibagi menjadi lima populasi sesuai dengan status penyakit mereka, yaitu; populasi yang rentan  $S(t)$ , populasi terinfeksi penyakit kolera  $I(t)$ , populasi yang sedang dalam pengobatan melalui karantina  $Q(t)$  dan populasi yang telah pulih  $R(t)$ . Adapun populasi akuatik bakteri (tingkat biomassa *V. cholerae*) adalah  $B(t)$  yang mencerminkan konsentrasi bakteri pada saat  $t$ . Pada model ini populasi terinfeksi tidak mempertimbangkan faktor usia dan jenis kelamin.

Pada model ini terdapat tingkat rekrutmen positif  $\Lambda$  ke dalam kelas populasi yang rentan  $S(t)$  dan tingkat kematian alami dengan laju sebesar  $\mu$  pada saat  $t$  dan berlaku untuk semua populasi manusia. Populasi yang rentan dapat terinfeksi kolera dengan tingkat laju transmisi  $\beta \frac{B(t)}{k+B(t)}$ . Perhatikan bahwa  $\beta > 0$  adalah tingkat konsumsi bakteri melalui sumber yang terkontaminasi,  $k$  adalah setengah saturasi konstan dari populasi bakteri,  $\beta \frac{B(t)}{k+B(t)}$  adalah kemungkinan bahwa individu yang terinfeksi untuk memiliki penyakit kolera karena terjadi kontak dengan sumber yang terkontaminasi.

Populasi infected diasumsikan mengidap diare akut parah yang dapat menyebabkan besarnya kematian dan didenotasikan sebagai  $\alpha_1$ . Pada model ini diasumsikan populasi infected harus mau menerima untuk dikarantina selama periode waktu tertentu agar dapat sembuh dari penyakit kolera. Selama waktu tersebut mereka diisolasi dan mendapatkan pengobatan yang efisien dengan laju  $\delta$ . Populasi yang dikarantina dapat pulih dengan laju penyembuhan sebesar  $\epsilon$ . Ketika dikarantina, tidak menutup kemungkinan populasi infected tersebut dapat meninggal akibat kolera tersebut. Adapun laju kematian yang disebabkan penyakit kolera bagi populasi yang di karantina sebesar  $\alpha_2$ . Populasi yang telah sembuh dapat kehilangan kekebalan dengan laju sebesar  $\omega$  dan karena itu menjadi rentan lagi.

Populasi yang terinfeksi berkontribusi terhadap peningkatan konsentrasi bakteri dengan laju sebesar  $\eta$ . Konsentrasi bakteri dapat menurun pada tingkat kematian  $d$ . Umumnya, individu yang terinfeksi kolera melepaskan kembali bakteri *Vibrio Cholerae* ke lingkungan akuatik, sehingga meningkatkan penyebaran penyakit kolera [5]. Asumsi-asumsi ini diterjemahkan dalam model matematika sebagai berikut:

$$\dot{S}(t) = \Lambda + \omega R(t) - \mu S(t) - \beta \frac{B(t)}{K+B(t)} S(t) \quad (1)$$

$$\dot{I}(t) = \beta \frac{B(t)}{K+B(t)} S(t) - \mu I(t) - \alpha_1 I(t) - \delta I(t) \quad (2)$$

$$\dot{Q}(t) = \delta I(t) - \mu Q(t) - \alpha_2 Q(t) - \epsilon Q(t) \quad (3)$$

$$\dot{R}(t) = \epsilon Q(t) - \mu R(t) - \omega R(t) \quad (4)$$

$$\dot{B}(t) = \eta I(t) - dB(t) \quad (5)$$

## 2. Ensemble Kalman Filter

Ensemble Kalman Filter adalah salah satu dari modifikasi Kalman Filter (Evensen,1994). Ensemble Kalman Filter adalah sebuah metode estimasi untuk sistem dinamik stokastik non-linear berdasarkan pengukuran data. Untuk menerapkan metode EnKF pada model penyebaran penyakit kolera, maka hal pertama yang dilakukan ialah mengubah persamaan 1-5 kedalam bentuk diskrit menggunakan metode beda maju dan didapatkan:

$$S_{k+1} = S_k + \Delta t (\Lambda + \omega R_k - \mu S_k - \beta \frac{B_k}{K+B_k} S_k) \quad (6)$$

$$I_{k+1} = I_k + \Delta t (\beta \frac{B_k}{K+B_k} S_k - \mu I_k - \alpha_1 I_k - \delta_k) \quad (7)$$

$$Q_{k+1} = Q_k + \Delta t (\delta I_k - \mu Q_k - \alpha_2 Q_k - \epsilon Q_k) \quad (8)$$

$$R_{k+1} = R_k + \Delta t (\epsilon Q_k - \mu R_k - \omega R_k) \quad (9)$$

$$B_{k+1} = B_k + \Delta t (\eta I_k - dB_k) \quad (10)$$

Selanjutnya dibentuk state space dari model penyakit kolera yaitu

$$X_{k+1} = f(X_k, k) \quad (11)$$

dengan  $X_k = (S_k, I_k, Q_k, R_k, B_k)^T$

Model matematika penyebaran penyakit kolera yang ada tidak terlalu sama persis dengan kenyataan yang ada. Banyak asumsi-asumsi yang masih digunakan dalam memodelkannya sehingga terdapat noise yang terjadi saat pembuatan model dan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$X_{k+1} = f(X_k, k) + w_k \quad (12)$$

dengan  $f(X_k, k)$  adalah fungsi non-linear dari persamaan 1-5,  $X_{k+1}$  adalah state pada waktu  $k + 1$  dan  $w_k$  adalah noise sistem yang berdistribusi Gaussian dengan mean = 0 dan kovarians  $Q_k$ .

Sebuah persamaan observasi didefinisikan untuk membuat korelasi antara state yang diestimasi dan model observasi. Persamaan tersebut ialah

$$Z_k = H X_k + v_k \quad (13)$$

dengan  $Z_k$  adalah observasi,  $H$  adalah representasi matriks model observasi dan  $v_k$  adalah noise observasi yang berdistribusi Gaussian dengan mean = 0 dan kovarians  $R_k$ .

Akhirnya kita telah memiliki sistem dinamik stokastik pada persamaan 12 dan persamaan observasi. Dengan menggunakan metode Ensemble Kalman Filter kita

dapat mengestimasi persamaan 1-5 dengan data observasi pada persamaan 13. Algoritma Ensemble Kalman Filter diberikan sebagai berikut:

a. Kondisi Awal

Bangkitkan  $N$ - ensemble dari nilai estimasi awal  $X_{0,i} = [X_{0,1}, X_{0,2}, X_{0,3}, \dots, X_{0,N}]$ .

Rata-rata dari estimasi awal yang dibangkitkan ialah  $\hat{X}_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{0,i}$

b. Tahap Prediksi

Bangkitkan  $N$ - ensemble untuk state variabel pada tahap prediksi sebagai berikut:

$$\hat{X}_{k+1,i}^- = f(\hat{X}_k, k) + w_{k,i}$$

Dengan  $w_{k,i} \sim N(0, Q_k)$  adalah ensemble dari noise sistem.

Rata-rata estimasi tahap prediksi adalah

$$\hat{X}_k^- = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{X}_{k+1,i}^-$$

Error kovarian dari estimasi tahap prediksi diberikan

$$P_{k+1}^- = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\hat{X}_{k+1,i}^- - \hat{X}_k^-)(\hat{X}_{k+1,i}^- - \hat{X}_k^-)^T$$

c. Tahap Koreksi

d. Bangkitkan ensemble data pengukuran

$$Z_{k+1,i} = Z_k + v_{k,i}$$

Dengan  $v_{k,i} \sim N(0, R_k)$  adalah ensemble dari noise pengukuran.

Kalman Gain didefinisikan sebagai berikut

$$K_k = P_{k+1}^- H^T (H P_{k+1}^- + R_k)^{-1}$$

Estimasi dari tahap koreksi adalah  $\hat{X}_{k+1,i} = \hat{X}_{k+1,i}^- + K_k (Z_{k+1,i} - H \hat{X}_{k+1,i}^-)$

Rata-rata estimasi tahap koreksi adalah

$$\hat{X}_{k+1} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \hat{X}_{k+1,i}$$

Dengan kovarian error diberikan

$$P_{k+1} = [I - K_k H] P_{k+1}^-$$

### C. Hasil dan Pembahasan

Section ini menunjukkan hasil estimasi dari metode EnKF. Model penyebaran penyakit kolera adalah sistem persamaan differensial non-linear. Kita mengubah persamaan tersebut dalam bentuk diskrit dengan  $\Delta t = 0,1$ . Adapun nilai parameter dan kondisi awal setiap populasi diberikan pada Tabel 1. Hasil estimasi diambil dari rata-rata 10 kali percobaan estimasi. Hasil estimasi EnKF dilakukan dengan memberi variasi pada jumlah ensemble. Jumlah ensemble yang dipilih ialah 50,100,200,300.

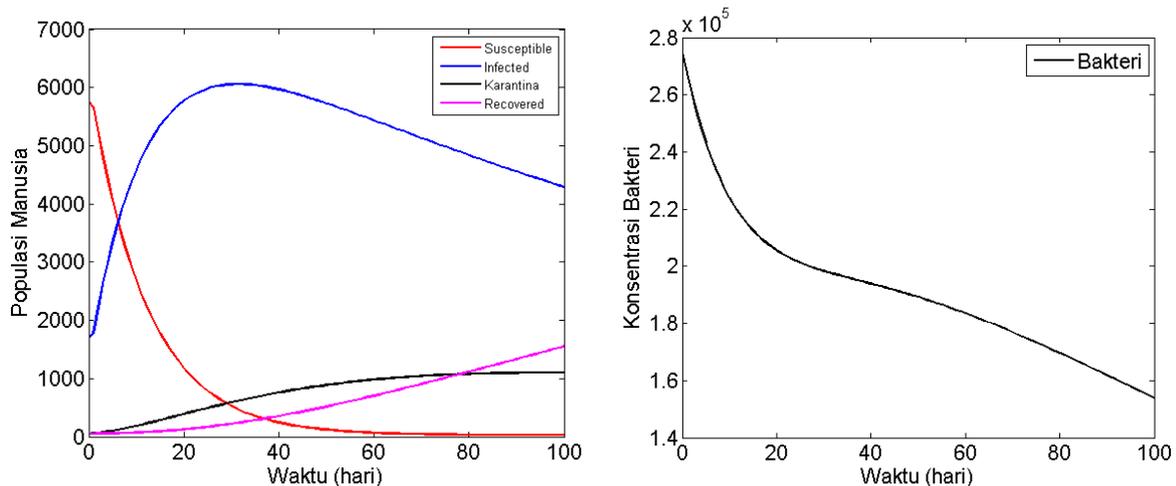
Tabel 2 mempresentasikan akurasi dan waktu komputasi dari tiap ensemble. Tabel 2 menunjukkan bahwa estimasi EnKF dari populasi kolera memiliki akurasi paling baik ketika ensemble ialah 300. Semakin banyak jumlah ensemble maka semakin baik akurasinya. Namun hal ini berbanding terbalik dengan waktu komputasi. Semakin banyak jumlah ensemble maka membutuhkan waktu komputasi yang lebih lama juga.

**Tabel 1.** Nilai Parameter dan Kondisi Awal Model SIQRB

Paramete r	Deskripsi	Nilai	Referensi
$\Lambda$	Laju rekrutmen	$24.4N(0)/365000$	[[3]]
$\mu$	Laju kematian alami	$2.2493 \times 10^{-5}$	[[3]]
$\beta$	<i>Ingestion rate</i>	0.8	[[3]]
$k$	konstanta setengah saturasi	$10^6$	[[3]]
$\omega$	laju kehilangan imunitas	$0.4/365$	[[3]]
$\delta$	laju karantina	0.05	[[3]]
$\epsilon$	laju kesembuhan	0.2	[[3]]
$\alpha_1$	laju kematian (infected)	0.015	[[3]]
$\alpha_2$	laju kematian (karantina)	0.0001	[[3]]
$\eta$	<i>Shedding rate</i>	10	[[3]]
$d$	laju kematian bakteri	$1/30$	[[3]]
$S(0)$	Individu Susceptible saat $t = 0$	5750	[[3]]
$I(0)$	Individu Infected saat $t = 0$	1700	[[3]]
$Q(0)$	Individu Karantina saat $t = 0$	50	[[3]]
$R(0)$	Individu Recovered saat $t = 0$	50	[[3]]
$B(0)$	Konsentrasi Bakteri saat $t = 0$	$275 * 10^3$	[[3]]

**Tabel 2.** Error Maksimum Relatif dan Waktu Komputasi dari EnKF

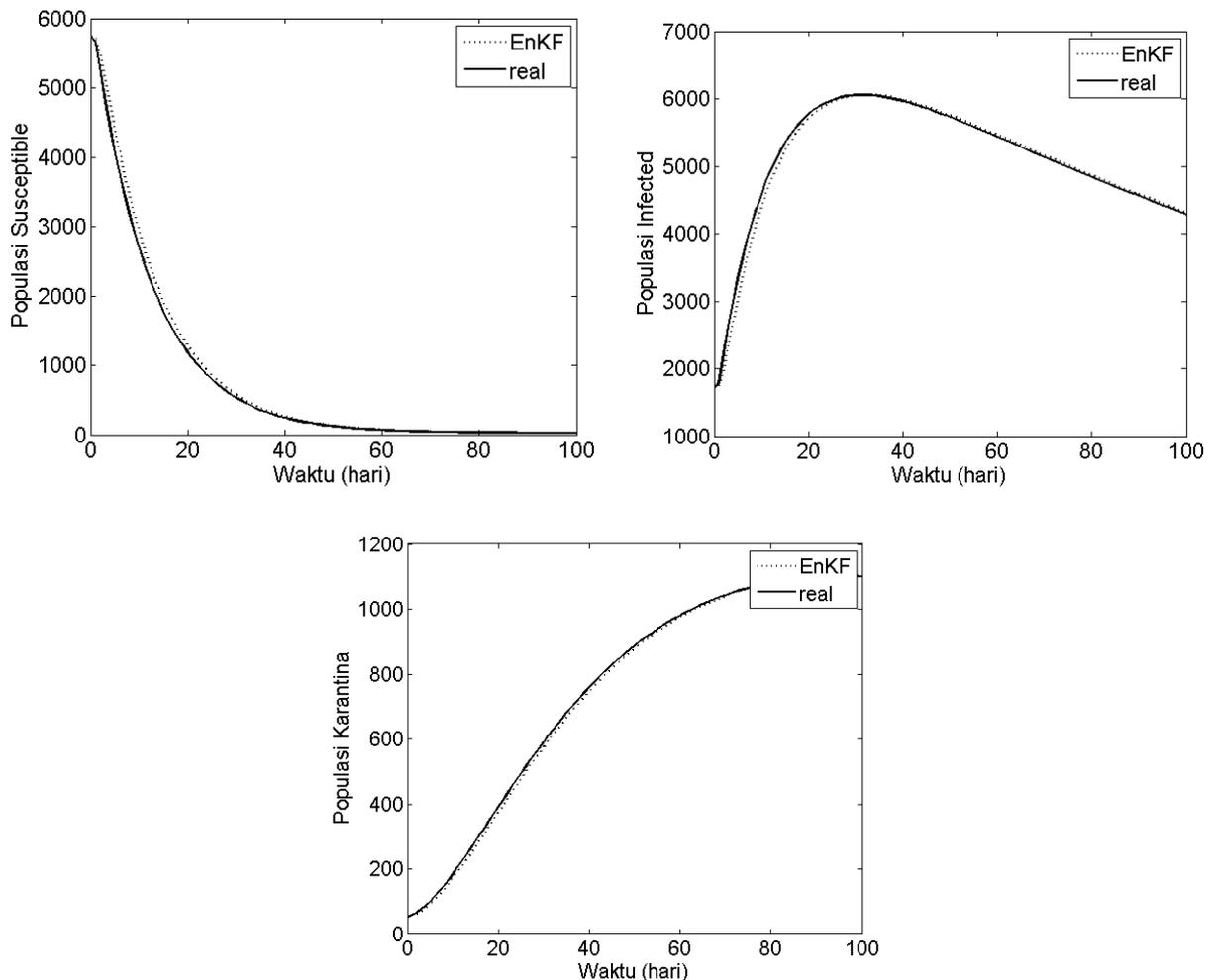
Ensemble	S	I	Q	R	B	Time(s)
50	0.054157	0.013743	0.055161	0.11675	0.005165	0.514196
100	0.0542	0.013727	0.034324	0.084002	0.005166	0.938808
300	0.054153	0.013577	0.022384	0.045817	0.005131	2.749753



**Gambar 1.** Dinamika Populasi Manusia dan Konsentrasi Bakteri Pada Penyebaran Penyakit Kolera.

Gambar 1 menunjukkan bagaimana penyebaran penyakit kolera terjadi pada periode waktu 100 hari. Gambar 1 menjelaskan bahwa populasi susceptible berkurang secara terus menerus mulai awal waktu hingga hari ke 100. Hal ini menandakan bahwa banyaknya populasi susceptible yang terkontaminasi dengan lingkungan maupun

makanan yang telah tercampur bakteri *C. Cholerae* sehingga terjangkit penyakit kolera. Pada waktu yang bersamaan populasi infected terus mengalami peningkatan pada waktu awal hingga sekitar waktu  $t = 40$ . Populasi infected ini diharuskan masuk karantina untuk dilakukan pengobatan sehingga sejak waktu awal populasi karantina terus mengalami peningkatan dikarenakan banyaknya populasi infected yang dikarantina. Meskipun demikian, besarnya transmisi penyebaran penyakit kolera dibanding jumlah populasi infected yang dikarantina menyebabkan populasi infected terus mengalami pertambahan hingga sekitar waktu  $t = 40$  hari. Ketika populasi karantina meningkat maka populasi recovered juga meningkat dikarenakan besarnya laju kesembuhan populasi infected yang masuk karantina. Hal ini disebabkan karena populasi infected yang dikarantina mendapatkan sebuah pengobatan efektif sehingga populasi tersebut cepat mengalami kesembuhan. Kemudian pada  $t > 40$  hari, populasi infected mengalami pengurangan terus menerus disebabkan karena sedikitnya jumlah populasi susceptible dan besarnya populasi infected yang masuk dalam karantina.

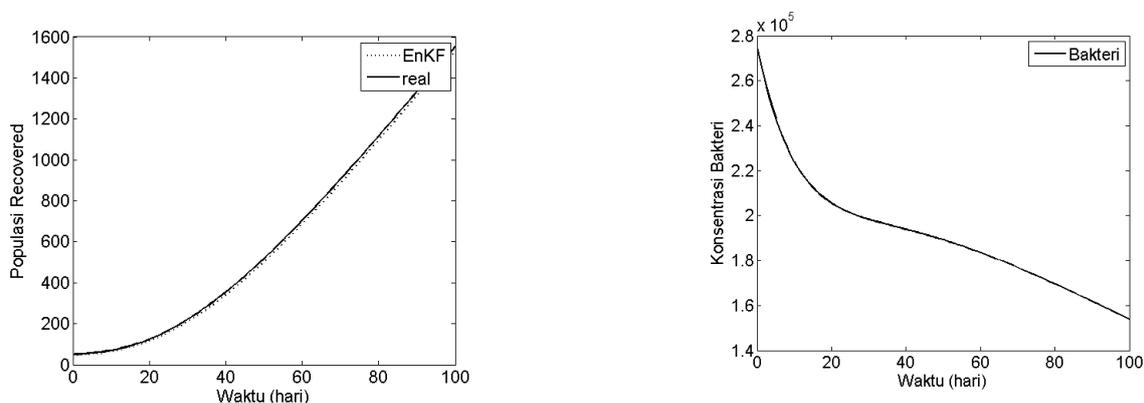


**Gambar 2.** Metode EnKF

Gambar 1 juga menunjukkan bahwa populasi bakteri mengalami pengurangan sejak awal waktu disebabkan besarnya laju kematian bakteri. Bakteri mengalami pertambahan

melalui kotoran populasi infected. Pada waktu awal hingga waktu  $t = 40$  hari terlihat bahwa populasi infected terus mengalami peningkatan sehingga seharusnya bakteri juga mengalami peningkatan pada waktu tersebut. Namun besarnya laju kematian bakteri dibanding pertambahannya yang membuat bakteri terus mengalami pengurangan. Meskipun begitu, tetap ada pengaruh yang cukup signifikan dari perkembangan populasi infected terhadap konsentrasi bakteri. Pada Gambar 1 terlihat bahwa grafik bakteri pada waktu tidak mengalami pengurangan drastis hingga  $t = 40$  hari. Ketika  $t > 40$  hari, populasi infected berkurang terus menerus sehingga pasokan bakteri juga berkurang dan menyebabkan populasi bakteri juga mengalami pengurangan seperti populasi infected.

Gambar 2 dan Gambar 3 menjelaskan bagaimana metode EnKF bekerja dalam mengestimasi penyebaran penyakit kolera untuk setiap populasi. Terlihat bahwa estimasi EnKF cukup mendekati dengan nilai real yang diberikan. Adapun maksimum error relatif yang didapatkan dapat dilihat pada Tabel 2 yaitu error populasi Susceptible sebesar 5%, error populasi Infected sebesar 1,35%, error populasi karantina sebesar 2,23%, error populasi recovered sebesar 4,58% dan error konsentrasi bakteri sebesar 0,5%.



**Gambar 3.** Metode EnKF bekerja dalam mengestimasi penyebaran penyakit kolera untuk setiap populasi

#### D. Kesimpulan

Pada paper ini dilakukan estimasi jumlah populasi pada model penyebaran penyakit kolera. Nilai dari sistem dinamik model penyebaran penyakit kolera digunakan sebagai nilai sebenarnya dan dibandingkan dengan nilai estimasi. Pada paper ini diaplikasikan Ensemble Kalman Filter (EnKF) untuk mengestimasi jumlah populasi kolera berdasarkan sistem dinamik model penyebaran penyakit kolera. Performansi dari variasi jumlah ensemble diberikan untuk melihat jumlah ensemble yang cocok untuk mendapatkan akurasi dan waktu komputasi yang optimal. Berdasarkan maksimum error relatif pada Tabel 2 terlihat bahwa jumlah ensemble yang memiliki akurasi error terkecil ialah 300. Pada Tabel 2 juga terlihat bahwa estimasi untuk setiap populasi pada penyebaran penyakit kolera ialah  $\leq 5\%$ . Dengan demikian Metode Ensemble Kalman Filter cocok untuk digunakan sebagai metode estimasi model penyebaran penyakit kolera.

#### Referensi

Cai.L., Modnak.C., Wang.J., An age-structured model for cholera control with vaccination. Applied Mathematics and Computation 299 (2017) 127140

- Dangbe.E., Irepran.D., Perasso.A., Bekolle.D., Mathematical modelling and numerical simulations of the inuence of hygiene and seasons on the spread of cholera. *Mathematical Biosciences* (2017)
- Lemos-Paiao. A.P., Silva. C.J., and Torres. D.F.M.,An epidemic model for cholera with optimal control treatment.*Journal of Computational and Applied Mathematics* (2016).
- Misra. A.K.,Gupta. A.,and Venturino. E.,Cholera dynamics with Bacteriophage infection: A mathematical study.*Chaos, Solitons and Fractals* (2016) 610-621.
- Mwasa.A.,Tchueenche.,Mathematical analysis of a cholera model with public health interventions:*biosystems* 105 (2011) 190-200.
- Na\_cy. A., dkk, Treatment and Vaccination Strategies to Control Cholera in Sub-Saharan Refugee Settings. *JAMA* (1998) Vol 279 No.7
- Neilan Miller.L.Rachael.,Schaefer Elsa.,Gra\_.Holly.,Fister Renee.K.,Lenhart. S.,Modeling Optimal Intervention Strategies for Cholera.*Bulletin of Mathematical Biology* (2010) 72: 2004 (2018).
- Sisodiya. S., Misra.O.P., Dhar.J., Dynamics of Cholera Epidemics with Impulsive Vaccination and Disinfection. *Mathematical Biosciences* (2018)
- Sun.G. dkk, Transmission Dynamics of Cholera: Mathematical Modelling and Control Strategies. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* (2016)
- World Health Organization. *Cholera Outbreak : Assessing the Outbreak Response and Improving Preparedness.* (2004).