

# Estimasi *Time Reproduction Number* Penyebaran Awal COVID-19 di Nusa Tenggara Timur, Indonesia

Astri Atti



Volume 3, Issue 2, Pages 63–67, December 2022

Received 20 December 2022, Accepted 29 December 2022, Published Online 31 December 2022

To Cite this Article : A. Atti, “Estimasi *Time Reproduction Number* Penyebaran Awal COVID-19 di Nusa Tenggara Timur, Indonesia”, *Jambura J. Biomath*, vol. 3, no. 2, pp. 63–67, 2022, <https://doi.org/10.34312/jjbm.v3i2.17652>

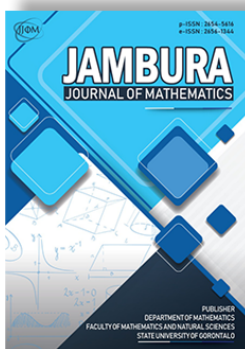
© 2022 by author(s)

## JOURNAL INFO • JAMBURA JOURNAL OF BIOMATHEMATICS



	Homepage	:	<a href="http://ejurnal.ung.ac.id/index.php/JJBM/index">http://ejurnal.ung.ac.id/index.php/JJBM/index</a>
	Journal Abbreviation	:	Jambura J. Biomath.
	Frequency	:	Biannual (June and December)
	Publication Language	:	English (preferable), Indonesia
	DOI	:	<a href="https://doi.org/10.34312/jjbm">https://doi.org/10.34312/jjbm</a>
	Online ISSN	:	2723-0317
	Editor-in-Chief	:	Hasan S. Panigoro
	Publisher	:	Department of Mathematics, Universitas Negeri Gorontalo
	Country	:	Indonesia
	OAI Address	:	<a href="http://ejurnal.ung.ac.id/index.php/jjbm/oai">http://ejurnal.ung.ac.id/index.php/jjbm/oai</a>
	Google Scholar ID	:	XzYgeKQAAAAJ
	Email	:	<a href="mailto:editorial.jjbm@ung.ac.id">editorial.jjbm@ung.ac.id</a>

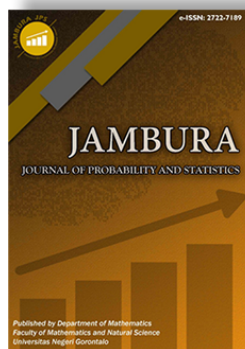
## JAMBURA JOURNAL • FIND OUR OTHER JOURNALS



Jambura Journal of Mathematics



Jambura Journal of Mathematics Education



Jambura Journal of Probability and Statistics



EULER : Jurnal Ilmiah Matematika, Sains, dan Teknologi



# Estimasi *Time Reproduction Number* Penyebaran Awal COVID-19 di Nusa Tenggara Timur, Indonesia

Astri Atti\*

Department of Mathematics, Nusa Cendana University, Indonesia

## ARTICLE HISTORY

Received 20 December 2022  
Accepted 29 December 2022  
Published 31 December 2022

## KEYWORDS

Covid-19  
Time Reproduction Number  
Extended Kalman Filter

**ABSTRAK.** COVID-19 telah menjadi ancaman bagi kehidupan manusia. Sejak awal penyebarannya, jumlah kematian karena COVID-19 telah mencapai jutaan manusia dan telah menyebar ke seluruh wilayah termasuk Nusa Tenggara Timur. Untuk memahami dinamika penyebaran COVID-19 adalah dengan menggunakan model matematika dan indikator yang digunakan untuk mengukur tingkat penyebaran adalah angka reproduksi. Pada makalah ini, estimasi angka reproduksi (*time reproduction number*) dilakukan dengan menggunakan teknik Extended Kalman Filter (EKF). Data yang digunakan adalah data harian penderita COVID-19 dari Agustus sampai Oktober 2021. Hasil estimasi menunjukkan bahwa angka reproduksi COVID-19 pada awal penyebarannya berada di atas satu. Artinya, COVID-19 menyebar dalam populasi.

**ABSTRACT.** COVID-19 has become a threat to human life. Since the beginning of its spread, the number of deaths due to COVID-19 has reached millions of people and has spread throughout the world including East Nusa Tenggara. To understand the dynamics of the spread of COVID-19 is to use a mathematical model and the indicator used to measure the level of spread is the reproduction number. In this paper, the estimation of the reproduction number (*time reproduction number*) is carried out using the Extended Kalman Filter (EKF) technique. The data used is daily data for COVID-19 patients from August to October 2021. The estimation results show that the reproduction number of COVID-19 at the beginning of its spread is above one. This means that COVID-19 is spreading in the population.



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License. *Editorial of JJBM:* Department of Mathematics, Universitas Negeri Gorontalo, Jln. Prof. Dr. Ing. B. J. Habibie, Bone Bolango 96554, Indonesia.

## 1. Pendahuluan

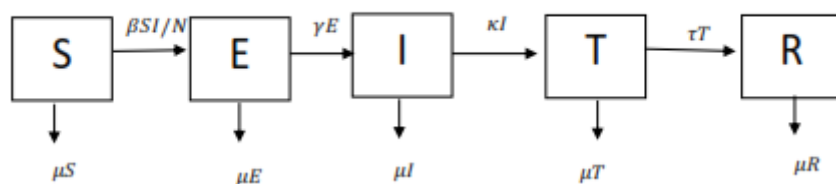
COVID-19 telah menjadi ancaman serius bagi umat manusia. Penyebaran yang begitu cepat telah menginfeksi manusia dan menyebabkan jumlah kematian yang tinggi. COVID-19 telah tersebar pada 223 negara dan per tanggal 10 Agustus 2021, pada tataran global, sebanyak 203.295.170 kasus terkonfirmasi positif COVID-19 dan diantaranya 4.303.515 yang meninggal dunia [1]. Untuk memahami dinamika penyebaran penyakit, model matematika telah banyak digunakan dan salah satu elemen penting selalu dianalisis pada model penyebaran penyakit adalah angka reproduksi dasar yang merupakan ambang batas epidemik, yang dinotasikan dengan  $R_0$ . Angka ini merupakan jumlah rata-rata infeksi baru yang dihasilkan oleh adanya satu individu terinfeksi dalam populasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa angka reproduksi dasar COVID-19 berkisar 2-3 [2, 3]. Angka ini bermakna bahwa apabila nilai  $R_0$  lebih besar dari satu maka satu orang yang terinfeksi virus akan menginfeksi lebih dari satu orang individu terinfeksi baru. Namun, sebaliknya, jika  $R_0 < 1$  maka penyakit akan punah dari populasi.

Salah satu teknik untuk mengestimasi  $R_0$  adalah dengan menggunakan konsep *extended kalman filter* yang mengkonversi model matematika ke dalam bentuk diskrit. Telah banyak model matematika yang diformulasi untuk menganalisis penye-

baran COVID-19 [3–7]. Model-model tersebut melakukan analisis penyebaran COVID-19 dan melakukan estimasi parameter pada konteks wilayah masing-masing. Anggriani dkk. membangun model matematika untuk menganalisis pengaruh individu dengan dan tanpa gejala terhadap dinamika penyebaran penyakit. Aldila dkk. membangun model matematika penyebaran COVID-19 dan menganalisis dinamika penyebaran COVID-19 dengan pengaruh awareness. Namun, model-model yang diformulasi oleh Anggriani dkk serta Aldila dkk. melakukan estimasi parameter untuk konteks penyebaran di Pulau Jawa. Ndi dkk. [5] memformulasi model matematika stokastik dan melakukan estimasi terhadap *Basic Reproduction Number* di Indonesia dan Saudi Arabia. Namun, sejauh ini belum ada penelitian tentang dinamika penyebaran COVID-19 di Nusa Tenggara Timur.

Penelitian yang dilakukan oleh Anggriani dkk serta Aldila dkk melakukan estimasi parameter dengan menggunakan cara melakukan estimasi nilai parameter dari model dan melakukan substitusi pada ekspresi  $R_0$ . Ndi dkk melakukan estimasi parameter dengan menggunakan konsep pertumbuhan awal populasi terinfeksi. Kedua estimasi ini menggunakan data pada awal penyebaran atau beberapa titik data dan nilai  $R_0$  tetap dan tidak berubah seiring perubahan waktu. Namun, pada kenyataannya nilai  $R_0$  ini selalu berubah tiap periode atau waktu. Oleh karena itu, penting untuk melakukan estimasi *Reproduction Number* seiring dengan perubahan waktu.

\*Corresponding Author.



Gambar 1. Flowchart dari model matematika

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk melakukan estimasi *Reproduction Number* seiring perubahan waktu adalah *extended kalman filter*. Dengan konsep ini, maka nilai *reproduction number* yang diperoleh adalah nilai yang berubah sesuai dengan perubahan individu terinfeksi dalam populasi atau dengan kata lain, kita memperoleh nilai *reproduction number* pada kondisi waktu saat itu. Pada artikel ini akan diestimasi nilai *reproduction number* seiring perubahan waktu atau singkatnya  $R_t$  menggunakan metode *extended kalman filter* di Nusa Tenggara Timur.

2. Formulasi Model Matematika

Dalam model ini populasi dibagi kedalam kelompok yang berbeda. Ilustrasi dari model diberikan pada Gambar 1. Model penyebaran COVID-19 dinyatakan dalam sistem persamaan diferensial non-linear berikut

$$\begin{aligned}
 \frac{dS}{dt} &= \Lambda - \beta S \frac{I}{N} - \mu S, \\
 \frac{dE}{dt} &= \beta S \frac{I}{N} - \gamma E - \mu E, \\
 \frac{dI}{dt} &= \gamma E - \kappa I - \mu I, \\
 \frac{dT}{dt} &= \kappa I - \tau T - \mu T, \\
 \frac{dR}{dt} &= \tau T - \mu R.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Populasi manusia diklasifikasikan ke dalam kelas rentan ( $S$ ), terpapar ( $E$ ), terinfeksi (kasus aktif) ( $I$ ), *treatment* ( $T$ ), sembuh ( $R$ ). Asumsi untuk kasus aktif adalah individu yang masih sakit dirawat di Rumah Sakit (RS) ataupun di karantina mandiri di rumah terhitung dalam kasus aktif sehingga diasumsikan tidak menyebarkan penyakit sedangkan  $N$  merupakan total populasi yang adalah  $N = S + E + I + T + R$ . Kasus terinfeksi adalah individu telah terdeteksi terinfeksi COVID-19 dan *treatment* adalah individu yang telah dirawat atau dikarantina pada rumah sakit. Model tersebut yang merupakan modifikasi dari model *SEIR* dapat dilanjutkan dengan mencari nilai *basic reproduction number* ( $R_0$ ) dan diskritisasi untuk ke tahap EKF.

Tabel 1. Deskripsi parameter dari model matematika

Parameter	Deskripsi	Unit
$\Lambda$	Laju kelahiran populasi	hari <sup>-1</sup>
$\beta$	Laju terinfeksi	hari <sup>-1</sup>
$\mu$	Laju kematian populasi	hari <sup>-1</sup>
$\gamma$	Laju inkubasi penyakit	hari <sup>-1</sup>
$\kappa$	Laju kasus yang aktif	hari <sup>-1</sup>
$\tau$	Laju kesembuhan	hari <sup>-1</sup>

3. Basic Reproduction Number

Bilangan *Reproduction Number* ( $R_0$ ) dapat dicari dengan metode *next generation matrix* dari sistem persamaan (1), dimana sistem persamaan ini mempunyai titik kesetimbangan bebas penyakit yaitu:  $(S_0, E_0, I_0, T_0, R_0) = (\frac{\Lambda}{\mu}, 0, 0, 0, 0)$ . Matriks generasi berikutnya (NGM) didefinisikan sebagai  $-F\Sigma^{-1}$  dalam [8] dengan matriks transmisi  $F$  dan matriks transisi  $\Sigma$  sebagai berikut.

$$F = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\beta S}{N} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \Sigma = \begin{bmatrix} -\gamma - \mu & 0 \\ \gamma & -\kappa - \mu \end{bmatrix},$$

kemudian dicari invers dari matriks transisi  $\Sigma$  dan dikalikan dengan matriks transmisi  $F$ ,  $NGM = -F\Sigma^{-1}$

$$NGM = \begin{bmatrix} \frac{\beta\gamma S}{N(\gamma + \mu)(\kappa + \mu)} & \frac{\beta S(\gamma + \mu)}{N(\gamma + \mu)(\kappa + \mu)} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

$R_0$  merupakan nilai eigen terbesar yang dipilih dari  $det(NGM - \lambda I)$  yaitu

$$R_0 = \frac{\beta\gamma S}{N(\gamma + \mu)(\kappa + \mu)}$$

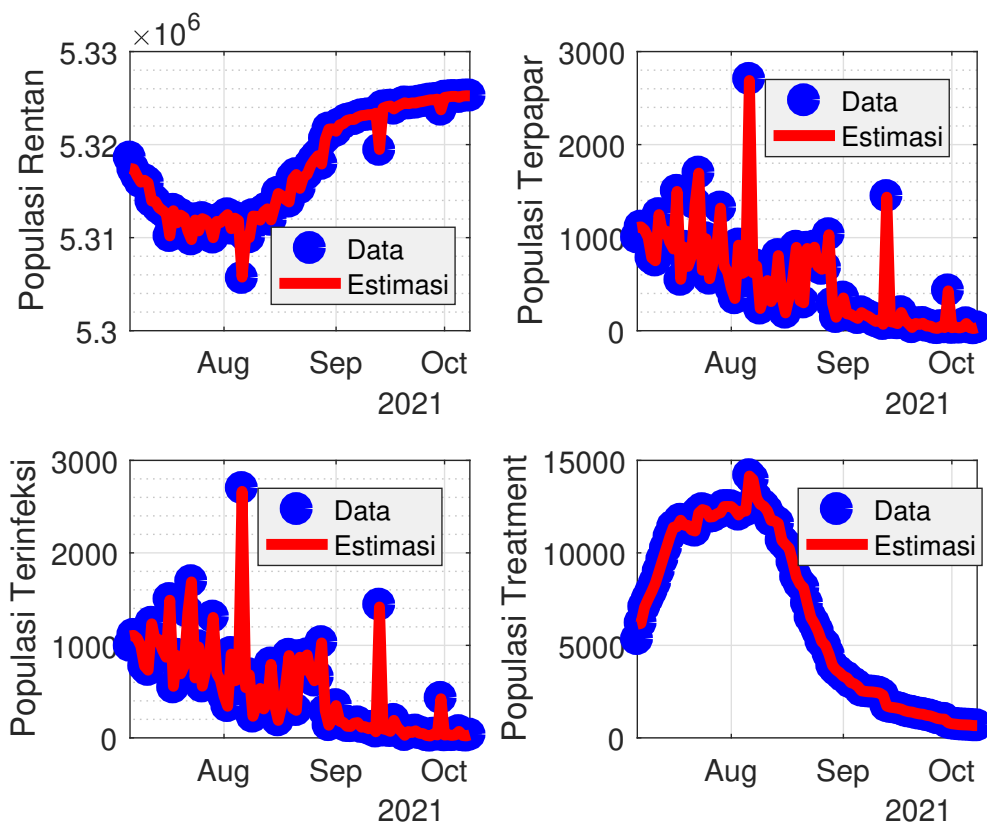
Dalam praktek parameter  $\beta$  adalah waktu yang bervariasi akibat perubahan individu terinfeksi sehingga  $\beta = \beta(t)$  maka *time reproduction number* ( $R_t$ ) yang merupakan nilai *basic reproduction number* ( $R_0$ ) mengalami perubahan nilai seiring perubahan waktu mengikuti perubahan  $\beta(t)$  sebagai berikut:

$$R_t = \frac{\beta(t)\gamma S(t)}{N(\gamma + \mu)(\kappa + \mu)}$$

Akibat adanya perubahan individu terinfeksi tiap waktunya sehingga mempengaruhi jumlah individu rentan yang juga mengalami perubahan tiap waktunya. Dalam artikel ini menggunakan metode *Extended Kalman Filter* (EKF) untuk mengestimasi laju terinfeksi  $\beta(t)$  dan kemudian mengestimasi nilai *time reproduction number* ( $R_t$ ).

4. Pendiskritan Model dengan Penambahan Stokastik

Dalam pendiskritan, kita melakukan perubahan variabel menjadi  $x$  di mana  $S, E, I, T$ , menjadi berturut-turut adalah  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$  sedangkan  $x_6$  adalah untuk parameter  $\beta$  yang bergantung pada waktu. Berikut pendiskritan model (1) menggunakan metode beda hingga maju untuk perubahan variabel terhadap waktu dan adanya penambahan parameter laju terinfeksi



Gambar 2. Fitting estimasi kasus melalui model matematika menggunakan metode EKF

$\beta$  sebagai variabel ke-enam :

$$\begin{aligned}
 x_1(k+1) &= x_1(k) + \left( \Lambda - x_6(k)x_1(k) \frac{x_3(k)}{N} - \mu x_1(k) \right) \Delta t + w_1(k), \\
 x_2(k+1) &= x_2(k) + \left( x_6(k)x_1(k) \frac{x_3(k)}{N} - \gamma x_2(k) - \mu x_2(k) \right) \Delta t + w_2(k), \\
 x_3(k+1) &= x_3(k) + \left( \gamma x_2(k) - \kappa x_3(k) - \mu x_3(k) \right) \Delta t + w_3(k), \\
 x_4(k+1) &= x_4(k) + \left( \kappa x_3(k) - \tau x_4(k) - \mu x_4(k) \right) \Delta t + w_4(k), \\
 x_5(k+1) &= x_5(k) + \left( \tau x_4(k) - \mu x_5(k) \right) \Delta t + w_5(k), \\
 x_6(k+1) &= x_6(k) + w_6(k).
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

$\Delta t$  merupakan perubahan waktu dengan  $\Delta t = 0.01$  [9]. Adanya penambahan noise  $\mathbf{w}(k) = (w_1(k) \ w_2(k) \ w_3(k) \ w_4(k) \ w_5(k))^T$  diasumsikan memiliki sebaran normal dengan mean nol.

### 5. Extended Kalman Filter

Estimasi Time-reproduction number dilakukan dengan menggunakan Extended Kalman Filter. Untuk menyederhanakan cara

menuliskannya, kita definisikan

$$\mathbf{x}(k+1) = \begin{pmatrix} S(k+1) \\ E(k+1) \\ I(k+1) \\ T(k+1) \\ R(k+1) \end{pmatrix} \tag{3}$$

sehingga model (2) dapat ditulis dalam bentuk

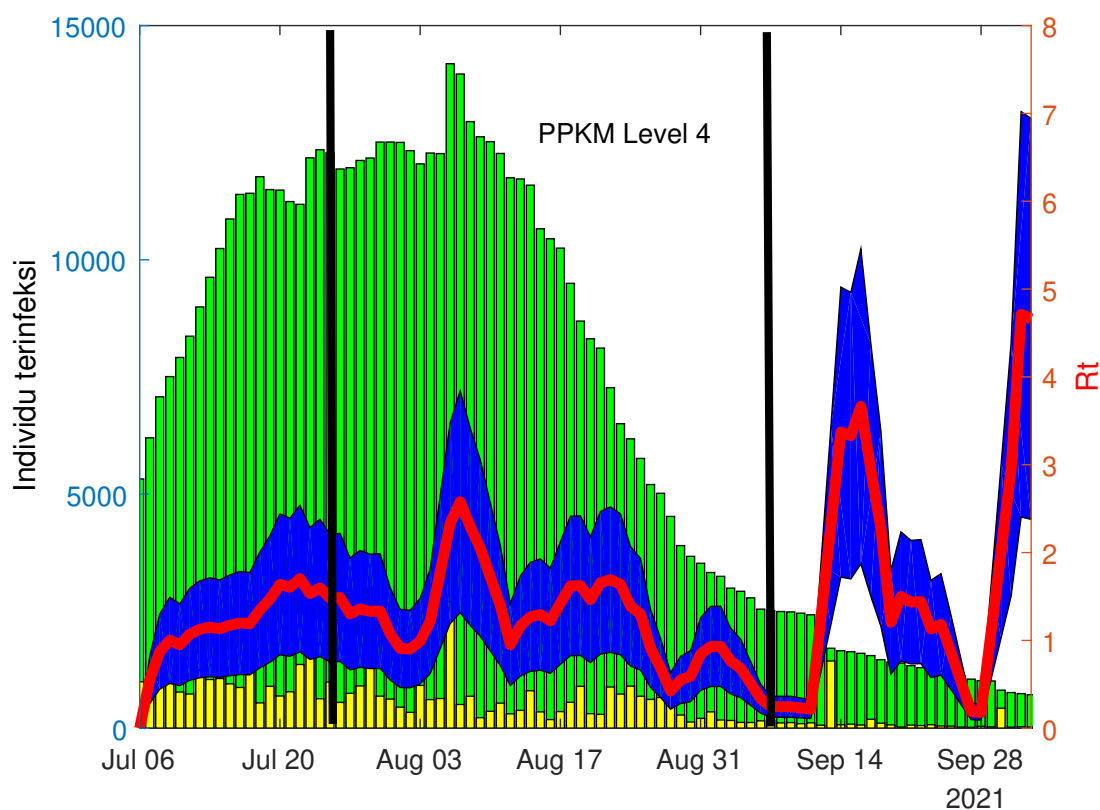
$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(k)) + \mathbf{w}(k) \tag{4}$$

di mana  $\mathbf{f}$  merupakan ruas kanan dari model (2). Notasikan  $\hat{\mathbf{x}}$  sebagai estimasi dari  $\mathbf{x}$  dari Extended Kalman Filter. Jacobian dari  $\mathbf{f}$  pada estimasi dari  $\mathbf{x}(k)$  adalah sebagai berikut.

$$F = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_1(k)} & \frac{\partial F_1}{\partial x_2(k)} & \frac{\partial F_1}{\partial x_3(k)} & \frac{\partial F_1}{\partial x_4(k)} & \frac{\partial F_1}{\partial x_5(k)} & \frac{\partial F_1}{\partial x_6(k)} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x_1(k)} & \frac{\partial F_2}{\partial x_2(k)} & \frac{\partial F_2}{\partial x_3(k)} & \frac{\partial F_2}{\partial x_4(k)} & \frac{\partial F_2}{\partial x_5(k)} & \frac{\partial F_2}{\partial x_6(k)} \\ \frac{\partial F_3}{\partial x_1(k)} & \frac{\partial F_3}{\partial x_2(k)} & \frac{\partial F_3}{\partial x_3(k)} & \frac{\partial F_3}{\partial x_4(k)} & \frac{\partial F_3}{\partial x_5(k)} & \frac{\partial F_3}{\partial x_6(k)} \\ \frac{\partial F_4}{\partial x_1(k)} & \frac{\partial F_4}{\partial x_2(k)} & \frac{\partial F_4}{\partial x_3(k)} & \frac{\partial F_4}{\partial x_4(k)} & \frac{\partial F_4}{\partial x_5(k)} & \frac{\partial F_4}{\partial x_6(k)} \\ \frac{\partial F_5}{\partial x_1(k)} & \frac{\partial F_5}{\partial x_2(k)} & \frac{\partial F_5}{\partial x_3(k)} & \frac{\partial F_5}{\partial x_4(k)} & \frac{\partial F_5}{\partial x_5(k)} & \frac{\partial F_5}{\partial x_6(k)} \\ \frac{\partial F_6}{\partial x_1(k)} & \frac{\partial F_6}{\partial x_2(k)} & \frac{\partial F_6}{\partial x_3(k)} & \frac{\partial F_6}{\partial x_4(k)} & \frac{\partial F_6}{\partial x_5(k)} & \frac{\partial F_6}{\partial x_6(k)} \end{bmatrix}$$

di mana

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial F_1}{\partial x_1(k)} &= 1 - \frac{x_6(k)x_3}{N} \Delta t - \mu \Delta t, & \frac{\partial F_2}{\partial x_1(k)} &= \frac{x_6(k)x_3}{N} \Delta t, \\
 \frac{\partial F_2}{\partial x_2(k)} &= 1 - (\gamma + \mu) \Delta t, & \frac{\partial F_3}{\partial x_2(k)} &= \gamma \Delta t,
 \end{aligned}$$



**Gambar 3.** Estimasi  $R_t$  di Nusa Tenggara Timur. Warna biru adalah daerah interval kepercayaan sedangkan garis merah adalah rata-rata nilai  $R_t$ .

**Tabel 2.** Nilai RMSE terhadap metode Extended Kalman Filter(EKF)

$RMSE_x$	$E$	$I$	$T$	$R$
$9.6591x10^{-4}$	$6.2873x10^{-5}$	$1.5285x10^{-4}$	$1.1x10^{-3}$	$2.6x10^{-3}$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_1}{\partial x_3(k)} &= -\frac{x_6(k)x_1(k)}{N} \Delta t, & \frac{\partial F_2}{\partial x_3(k)} &= \frac{x_6(k)x_1(k)}{N} \Delta t, \\ \frac{\partial F_3}{\partial x_3(k)} &= 1 - (\alpha + \mu)\Delta t, & \frac{\partial F_1}{\partial x_6(k)} &= -x_1(k) \frac{x_3(k)}{N} \Delta t, \\ \frac{\partial F_2}{\partial x_6(k)} &= x_1(k) \frac{x_3(k)}{N} \Delta t, & \frac{\partial F_4}{\partial x_3(k)} &= \alpha \Delta t \\ \frac{\partial F_4}{\partial x_4(k)} &= 1 - (\tau + \mu)\Delta t, & \frac{\partial F_5}{\partial x_4(k)} &= \tau \Delta t, \\ \frac{\partial F_5}{\partial x_5(k)} &= 1 - \mu \Delta t, & \frac{\partial F_6}{\partial x_6(k)} &= 1. \end{aligned}$$

sedangkan terminologi lainnya adalah nol. Dalam algoritma EKF terdapat dua parameter tuning yang dipilih sedemikian sehingga menghasilkan error yang kecil antara data dan hasil estimasi [10].

Pada penelitian ini digunakan ukuran tingkat ketelitian yakni *root mean square error* (*RMS*) sebagai berikut:

$$RMSE = \sqrt{\sum \frac{(x_i - F_i)^2}{n}}$$

dengan  $x_i$  solusi numerik untuk iterasi ke  $i$  dan  $F_i$  nilai estimasi untuk iterasi yang sama. Nilai *RMSE* yang semakin kecil menunjukkan bahwa hasil estimasi semakin mendekati solusi

idealnya (analitik/numerik). Sehingga, dapat dikatakan hasil estimasinya semakin baik atau dipercaya [11].

### 6. Hasil Estimasi

Gambar 2 menunjukkan data hasil estimasi dengan data yang dilaporkan nilainya hampir mendekati. Model SEITR yang didiskritkan kemudian dilanjutkan penerapan metode EKF mempunyai nilai error yang cukup kecil ditampilkan pada Tabel 2 dengan menyetel parameter  $Q$  dan  $R$  mengikuti literatur [9]. Gambar 2 dan Tabel 2 membuktikan bahwa metode EKF mempunyai hasil estimasi yang baik sehingga dapat dilanjutkan dengan mengestimasi nilai  $R_t$ . Gambar 3 merupakan grafik estimasi nilai  $R_t$ . Kenaikan nilai  $R_t$  dapat terjadi akibat adanya interaksi dengan orang yang sudah terinfeksi sehingga dilakukan upaya pencegahan dengan memantau perubahan nilai  $R_t$  untuk rentan waktu tertentu dalam mengambil kebijakan. Pada tanggal 6-24 Juli 2021 terjadi kenaikan nilai  $R_t$  dengan  $R_t > 1$  yang dapat mengakibatkan kenaikan individu terinfeksi apabila adanya interaksi individu rentan dengan individu terinfeksi sehingga pada tanggal 25 Juli 2021 diterapkan PPKM level 4 di kota Kupang, Kabupaten Sikka, Kabupaten Ende, dan Kabupaten Sumba Timur. Kebijakan dalam menerapkan PPKM level 4 berupa : 1) Kegiatan

belajar mengajar secara daring. 2) Pelaksanaan kegiatan pada sektor non esensial diberlakukan 100% Work From Home (WFH). 3) Pelaksanaan kegiatan pada sektor esensial dapat beroperasi dengan kapasitas 50%. 4) Untuk supermarket, pasar tradisional, pasar swalayan dibatasi jam operasional sampai jam 19.00 WITA. Nilai  $R_t$  tentu berpengaruh terhadap pengambilan keputusan dalam menerapkan kebijakan-kebijakan yang dilakukan pemerintah, dengan kebijakan yang dilakukan dalam PPKM level 4 diharapkan agar nilai  $R_t < 1$ . Namun, selama diberlakukan PPKM level 4 terjadi kenaikan dan penurunan nilai  $R_t$  yang dapat diakibatkan oleh beberapa faktor hingga awal september terjadi penurunan  $R_t < 1$ . Setelah diberlakukan PPKM level 3 pada tanggal 8 September 2021 beberapa daerah seperti kota Kupang di mana pembelajaran tatap muka dibuka terjadi kenaikan nilai  $R_t$  hingga mencapai angka 3.665 yang lebih tinggi dibandingkan nilai  $R_t$  saat PPKM level 4. Adanya kenaikan nilai  $R_t$  bisa terjadi akibat penerapan PPKM tidak dijalankan sesuai dengan protokol kesehatan, penerapan PPKM tidak diterapkan di semua wilayah di NTT, dan masyarakat yang tidak patuh akan protokol kesehatan. Dari Gambar 3 perubahan nilai  $R_t$  yang mendominasi adalah nilai  $R_t > 1$  yang artinya covid-19 masih akan menyebar dalam populasi. Pentingnya melihat perkembangan nilai  $R_t$  membantu dalam mengambil kebijakan pencegahan penyebaran COVID-19 di NTT.

## 7. Kesimpulan

Penyebaran COVID-19 telah menjadi ancaman serius bagi manusia. Oleh karena itu, memahami dinamika penyebaran penyakit menjadi sesuai yang penting. Salah satu elemen penting dalam analisis penyebaran COVID-19 adalah dengan mengetahui Angka Reproduksi Dasar yang dapat memberikan informasi tingkat penyebaran penyakit tersebut. Penelitian ini bertujuan melakukan estimasi terhadap *time-reproduction number* di Nusa Tenggara Timur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terjadi fluktuasi dalam *time-reproduction number* dan pada umumnya lebih besar dari satu. Hal tersebut mengindikasikan bahwa pada awalnya, tingkat penyebaran COVID-19 tinggi di NTT. Pemberlakuan PPKM level 4 sempat menurunkan laju penularan COVID-19 tetapi kemudian jumlah kasus naik lagi. Hal ini mengindikasikan bahwa penerapan protokol kesehatan masih san-

gat diperlukan sebagai upaya pencegahan penyebaran COVID-19 di Nusa Tenggara Timur.

## Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Meksianis Z. Ndiid dan Karolina Nadia Nukul atas masukan dan saran terhadap penelitian ini.

## References

- [1] World Health Organization, *Coronavirus disease (COVID-19) pandemic*, 2021.
- [2] M. A. Billah, M. M. Miah, and M. N. Khan, "Reproductive number of coronavirus: A systematic review and meta-analysis based on global level evidence," *PLoS One*, vol. 15, no. 11, p. e0242128, 2020. DOI: 10.1371/journal.pone.0242128
- [3] N. Anggriani, M. Z. Ndiid, R. Amelia, W. Suryaningrat, and M. A. A. Pratama, "A mathematical COVID-19 model considering asymptomatic and symptomatic classes with waning immunity," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 1, pp. 113–124, 2022. DOI: 10.1016/j.aej.2021.04.104
- [4] D. Aldila, M. Z. Ndiid, and B. M. Samiadji, "Optimal control on COVID-19 eradication program in Indonesia under the effect of community awareness," *Mathematical Biosciences and Engineering*, vol. 17, no. 6, pp. 6355–6389, 2020. DOI: 10.3934/mbe.2020335
- [5] M. Z. Ndiid, P. Hadisoemarto, D. Agustian, and A. K. Supriatna, "An analysis of Covid-19 transmission in Indonesia and Saudi Arabia," *Communication in Biomathematical Sciences*, vol. 3, no. 1, pp. 19–27, 2020. DOI: 10.5614/cbms.2020.3.1.3
- [6] K. Sarkar, S. Khajanchi, and J. J. Nieto, "Modeling and forecasting the COVID-19 pandemic in India," *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 139, p. 110049, 2020. DOI: 10.1016/j.chaos.2020.110049
- [7] W. Zhou, A. Wang, F. Xia, Y. Xiao, and S. Tang, "Effects of media reporting on mitigating spread of COVID-19 in the early phase of the outbreak," *Mathematical Biosciences and Engineering*, vol. 17, no. 3, pp. 2693–2707, 2020. DOI: 10.3934/mbe.2020147
- [8] M. Z. Ndiid, *Pemodelan matematika dinamika populasi dan penyebaran penyakit teori, aplikasi, dan numerik*. Deepublish, 2018. ISBN 9786232090354.
- [9] A. Hasan and Y. Nasution, "A compartmental epidemic model incorporating probable cases to model covid-19 outbreak in regions with limited testing capacity," *ISA Transactions*, vol. 124, pp. 157–163, 2022. DOI: 10.1016/j.isatra.2021.01.029
- [10] M. Z. Ndiid, L. K. Beay, N. Anggriani, K. N. Nukul, and B. S. Djahi, "Estimating the Time Reproduction Number in Kupang City Indonesia, 2016–2020, and Assessing the Effects of Vaccination and Different Wolbachia Strains on Dengue Transmission Dynamics," *Mathematics*, vol. 10, no. 12, p. 2075, 2022. DOI: 10.3390/math10122075
- [11] S. M. Isman, "Penerapan metode extended kalman filter untuk estimasi transmisi filariasis." Skripsi, Jurusan Matematika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2016.