

Prediksi Penyebaran Covid-19 di Indonesia dan Jawa Timur dengan Metode Extended Kalman Filter

Helisyah Nur Fadhilah^{1,2}, Erna Apriliani¹, Didik Khusnul Arif¹

¹Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

²Institut Teknologi Telkom Surabaya, Surabaya

e-mail: helisyah07@gmail.com

Diajukan: 22 Mei 2020, Diperbaiki: 11 Februari 2021, Diterima: 22 Februari 2021

Abstrak

Saat ini pandemi Covid-19 telah menyebar ke seluruh dunia, tidak terkecuali Indonesia. Dalam pemodelan matematika, penyebaran Covid-19 dapat digambarkan melalui model matematika epidemiologi SIRD (*Susceptible, Infected, Recover, Death*). Pertama model non-linier SIRD didiskritkan dan selanjutnya dilakukan prediksi puncak penyebaran Covid-19 dengan menggunakan metode Extended Kalman Filter (EKF). Dengan data aktual *Infected, Recover, dan Death* yang merupakan data harian, modifikasi EKF dapat memprediksi puncak infeksi Covid-19 untuk satu bulan kedepan. Simulasi dilakukan dengan 3 macam pembatasan pergerakan pada masyarakat yaitu : tanpa adanya pembatasan (100%), 75%, dan 50% pergerakan. Hasil prediksi dengan modifikasi EKF menunjukkan dengan dilakukan pembatasan pergerakan 50% pada masyarakat di Indonesia dan Jawa Timur dapat mempercepat terjadinya puncak infeksi dengan jumlah individu terinfeksi lebih sedikit.

Kata Kunci: Extended Kalman Filter, Prediksi EKF, Covid-19

Abstract

In recent years, the pandemic of Covid-19 has spread around the world, including Indonesia. In mathematical modeling, the spread of Covid-19 can be represented as the epidemiological mathematical model of SIRD (Susceptible, Infected, Recover, Death). First, we obtain the discrete SIRD nonlinear model, and then we predict the peak spread of Covid-19 by using the Extended Kalman Filter (EKF) method. With the daily data of Infected, Recover and Death, the modified EKF can predict the peak of Covid-19 infection for the next month. In the simulations, we use three types of restrictions of people mobility i.e., without restrictions (100%), 75%, and 50% mobility. The prediction results with modified EKF show that restrictions on people's mobility in 50% can accelerate the peak of infection with smaller infected individuals in Indonesia and East Java.

Keywords: Extended Kalman Filter, EKF prediction, Covid-19

1 Pendahuluan

Saat ini penyakit yang disebabkan oleh virus Corona atau sering disebut *Corona Virus Disease 2019* (Covid-19) telah menjadi pandemi dan menyebabkan keprihatinan di seluruh dunia. Penyebaran Covid-19 merupakan ancaman serius bagi kesehatan global. Dikutip dari situs Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) pada Rabu (13/5/2020) Tingkat kematian akibat Covid-19

adalah 6,7%. Perlu dicatat bahwa Covid-19 adalah penyakit yang sedang berlangsung sehingga tingkat kematiannya belum final dan kemungkinan besar akan meningkat.

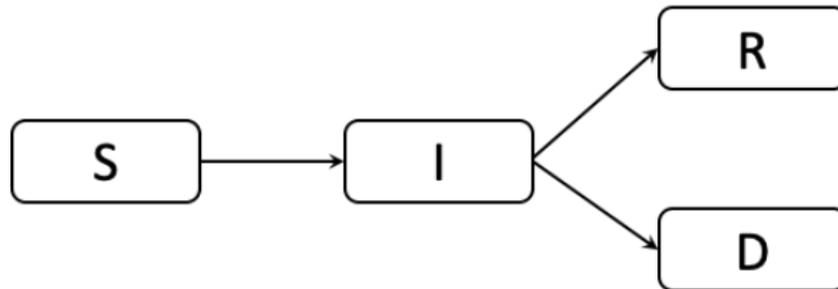
Pandemi Covid-19 masih menghantui banyak negara, khususnya di Indonesia. Sejak kasus pertama diumumkan, lonjakan pasien positif terus terjadi dan kian meningkat. Update sebaran Covid-19 pada Jumat (10/4/2020) mengatakan bahwa wabah Covid-19 sudah menyebar di seluruh Indonesia. Dikutip dari laman resmi kemkes.go.id, hingga Rabu (13/5/2020), jumlah kasus positif Covid-19 mencapai 15438, diikuti jumlah pasien sembuh sebanyak 3287 dan 1028 pasien lainnya meninggal dunia. Hingga Rabu (13/5/2020) provinsi Jawa Timur menempati posisi kedua sebagai provinsi dengan kasus positif terbanyak yakni 1766 dengan 278 pasien sembuh dan 166 pasien meninggal. Berdasarkan data tersebut, dapat dihitung tingkat kematian akibat Covid-19 di Indonesia adalah 6,7% artinya sama dengan tingkat kematian akibat Covid-19 di dunia sedangkan tingkat kematian di Jawa Timur adalah 9,4%, artinya tingkat kematian akibat Covid-19 di Jawa Timur lebih tinggi dibandingkan tingkat kematian secara nasional dan dunia.

Penyebaran pandemi Covid-19 dapat digambarkan melalui model matematika epidemiologi. Model matematika SIRD (*Susceptible, Infected, Recover, Death*) digunakan oleh beberapa peneliti untuk menggambarkan pola penyebaran virus Covid-19 [1][2]. Model SIRD merupakan modifikasi dari model SIR dimana di dalamnya ditambah satu variabel baru yakni variabel jumlah kematian (*Death*). Studi penyebaran pandemi Covid-19 berdasarkan model SIRD juga dilakukan oleh beberapa peneliti. Fanelli dkk [3] menggunakan model SIRD untuk memprediksi penyebaran Covid-19 di China, Italia, dan Iran. Penentuan parameter model dilakukan dengan menggunakan *stochastic differential evolution*. Metode Kalman filter yang terintegrasi dengan model SIR telah dibahas oleh Qian dkk [4] dengan hasil yang cukup baik.

Pada makalah ini, akan dilakukan prediksi penyebaran Covid-19 di Indonesia dan Jawa Timur berdasarkan model SIRD dengan menggunakan metode Extended Kalman Filter (EKF) [5]. Modifikasi EKF dilakukan untuk menghasilkan prediksi beberapa bulan kedepan. Tujuan dari prediksi penyebaran Covid-19 dengan modifikasi EKF adalah memberikan gambaran pada masyarakat bagaimana dinamika penyebaran Covid-19 jika diberikan 3 macam pembatasan pergerakan pada masyarakat, sehingga diharapkan dapat menjadi referensi bagi pemerintah pusat maupun daerah dalam mengambil kebijakan untuk menekan penyebaran Covid-19 di Indonesia dan Jawa Timur.

2 Model SIRD

Dalam model kompartemen SIRD diasumsikan bahwa setiap individu dalam kompartemen yang sama memiliki karakteristik yang sama. Model SIRD dengan empat kompartemen diberikan seperti pada Gambar 1 [1].



Gambar 1. Kompartemen model SIRD

dengan S adalah kompartemen rentan, I adalah kompartemen terinfeksi, R adalah kompartemen sembuh, dan D adalah kompartemen kematian.

Diasumsikan bahwa total populasi adalah konstan, yang berarti bahwa dalam periode waktu yang dipertimbangkan laju kelahiran dan kematian (termasuk yang terkait dengan Covid-19) adalah sama [6]. Hal ini terutama berlaku untuk penyakit mematikan yang rendah dengan wabah yang sangat besar. Selanjutnya diasumsikan bahwa orang yang pulih tidak dapat terinfeksi kembali [7]. Persamaan diferensial biasa, dengan masing-masing kondisi awal, yang menggambarkan pergerakan orang dari satu kompartemen ke yang lain dapat dituliskan dalam Persamaan (1)-(4) berikut.

$$\dot{S}(t) = -rS(t)I(t) \quad (1)$$

$$\dot{I}(t) = rS(t)I(t) - (a + d)I(t) \quad (2)$$

$$\dot{R}(t) = aI(t) \quad (3)$$

$$\dot{D}(t) = dI(t) \quad (4)$$

dengan,

- r adalah parameter laju infeksi, yaitu probabilitas per satuan waktu yang menyatakan bahwa seseorang yang rentan (S) penyakit ketika melakukan kontak dengan orang yang terinfeksi,
- a adalah parameter laju kesembuhan (R) seseorang per satuan waktu setelah terinfeksi,
- d adalah parameter laju kematian (D) seseorang per satuan waktu setelah terinfeksi.

3 Extended Kalman Filter

Metode Extended Kalman Filter adalah modifikasi dari metode Kalman Filter yang digunakan untuk estimasi sistem dinamik stokastik non-linier [5]. Perbandingan antara algoritma Kalman Filter (KF) dan Extended Kalman Filter (EKF) dapat dilihat pada Tabel 1 berikut [8].

Tabel 1. Tabel perbandingan algoritma Kalman Filter dan Extended Kalman Filter

Kalman Filter (KF)	Extended Kalman Filter (EKF)
Model Sistem dan Pengukuran	Model Sistem dan Pengukuran
$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + Gw_k$ $z_{k+1} = H_{k+1}x_{k+1} + v_k$	$x_{k+1} = f(x_k, u_k, w_k, k)$ $z_k = h(x_k, v_k, k)$
Inisialisasi	Inisialisasi
$x_0 N(\bar{x}, P_0)$	$x_0 N(\bar{x}, P_0)$
Tahap Prediksi	Tahap Prediksi
$x_{k+1}^- = Ax_k + Bu_k$ $P_{k+1}^- = AP_k A^T + Bu_k + GQG^T$	$x_{k+1}^- = f(x_k, u_k)$ $P_{k+1}^- = AP_k A^T + Bu_k + GQG^T$ $A = \frac{\partial f}{\partial x}; B = \frac{\partial f}{\partial u}$
Tahap Koreksi	Tahap Koreksi
$K_{k+1} = (I - KH)P_{k+1}^-$ $P_{k+1} = P_{k+1}^- H^T (HP_{k+1}^- H^T + R)^{-1}$ $x_{k+1} = x_{k+1}^- + K(z_{k+1} - H_k x_{k+1}^-)$	$K_{k+1} = (I - KH)P_{k+1}^-$ $P_{k+1} = P_{k+1}^- H^T (HP_{k+1}^- H^T + R)^{-1}$ $x_{k+1} = x_{k+1}^- + K(z_{k+1} - h(x_{k+1}^-))$ $H = \frac{\partial h}{\partial x}$

Dalam KF, model sistem yang digunakan adalah linier, sedangkan dalam EKF, pelinieran hanya dilakukan untuk memperoleh matriks A dan H yang digunakan dalam menghitung kovariansi pada tahap prediksi, tahap koreksi, dan untuk menghitung Kalman gain.

Tahap prediksi yaitu memprediksi variabel keadaan dan tingkat akurasiya dihitung menggunakan persamaan kovarian eror atau norm kovariansi eror. Pada tahap koreksi, hasil estimasi variabel keadaan dikoreksi menggunakan model pengukuran. Salah satu bagian dari tahap ini yaitu menentukan matriks Kalman Gain yang digunakan untuk meminimumkan kovariansi eror. Tahap prediksi dan tahap koreksi akan diulang terus menerus sampai waktu k yang ditentukan.

Pada KF dan EKF, keduanya dapat melakukan prediksi satu satuan waktu kedepan (*one step ahead*) berdasarkan model matematika, dalam hal ini SIRD. Model SIRD merupakan model sistem non-linier sehingga pada makalah ini digunakan metode EKF untuk prediksi. Pada hasil prediksi kemudian dilakukan koreksi berdasarkan data pengukuran. Sehingga perlu adanya modifikasi algoritma untuk dapat melakukan prediksi dengan keterbatasan data pengukuran/data aktual sehingga waktu prediksi yang didapatkan bisa lebih panjang.

Prediksi EKF adalah salah satu modifikasi EKF. Keterbatasan data aktual merupakan salah satu kendala dalam melakukan prediksi jauh kedepan, maka dalam prediksi EKF dilakukan modifikasi algoritma pada tahap prediksi. Tahap prediksi EKF pada Tabel 1 tidak terdapat *noise* model, *noise* digunakan pada kovarian tahap prediksi dan diperbaiki pada tahap koreksi.

Ketika data prediksi pengukuran telah habis (tidak ada), maka dapat dibangkitkan sebuah data pengukuran dari hasil estimasi waktu satuan sebelumnya x_{k-1} , sehingga data bangkitan tersebut dapat digunakan pada tahap koreksi. Dapat dikatakan, selama data pengukuran masih ada, maka proses estimasi berjalan sesuai dengan algoritma EKF pada Tabel 1, setelah data habis maka prediksi EKF yang digunakan sampai waktu yang ditentukan.

Misalkan diberikan persamaan model sistem non-linier dan pengukuran sebagai berikut.

$$x_{k+1} = f(x_k, w_k, k) \quad (5)$$

$$z_k = h(x_k, v_k, k) \quad (6)$$

dengan f adalah fungsi non-linier yang bergantung pada variabel keadaan x_k , h adalah matriks pengamatan, w_k adalah *noise* model dengan $w_k \sim (0, Q)$, dan v_k *noise* pengukuran dengan $v_k \sim (0, R)$. Persamaan (6) diasumsikan tidak memiliki input sistem.

Misalkan terdapat data pengukuran sebanyak x_k data, maka dapat dicari estimasi data ke x_{k+1} dengan menggunakan algoritma EKF pada Tabel 1.

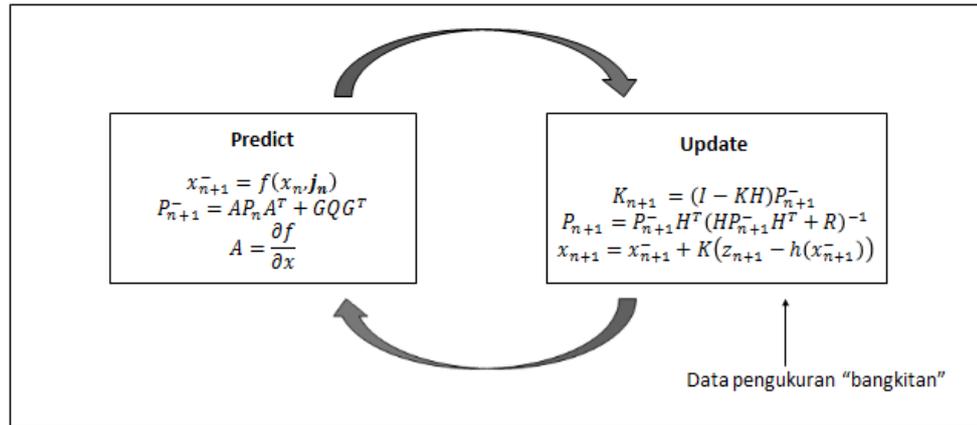
Selanjutnya untuk prediksi x_{n+1} dengan $n > k$ bilangan bulat dan selisih $n - k = 1$ atau $n = k + 1$. Dilakukan inisialisasi model dan pengukuran yaitu

$$x_{n+1} = f(x_n, j_n, n) \quad (7)$$

$$z_{n+1} = h(x_n, q_n, n) \quad (8)$$

dengan j_n dan q_n masing-masing *noise* sistem dan *noise* pengukuran dengan $j_n \sim (0, B)$ dan $q_n \sim (0, L)$. Pada Persamaan (8), data pengukuran dibangkitkan dengan deta hasil estimasi ditambah *noise*.

Proses prediksi EKF pada makalah ini dapat digambarkan pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Algoritma prediksi EKF pada model SIRD

Selanjutnya, akan dilakukan simulasi prediksi EKF pada model SIRD (1)-(4) untuk mengetahui prediksi penyebaran Covid-19 di Indonesia dan di Jawa Timur.

4 Simulasi

Pada bagian ini akan diterapkan metode prediksi Extended Kalman Filter (EKF) untuk memprediksi penyebaran Covid-19 dengan model SIRD dan mengetahui puncak Infeksi (I). Untuk mengaplikasikan metode prediksi EKF diperlukan model linier untuk matriks A . Dari sini terlebih dahulu dilakukan pelinieran dengan membentuk matriks Jacobian dari Persamaan (1)-(4). Titik setimbang diperoleh $(S, I, R, D) = (\frac{a+d}{r}, 0, 0, 0)$. Hasil linierisasi pada titik setimbang adalah sebagai berikut.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -(a+d) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Selanjutnya di cari pendiskritan dari model non-linier (1)-(4) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} S_k &= -rS_k^- I_k^- dt + S_k^-, \\ I_k &= [rS_k^- I_k^- - (a+d)I_k^-] dt + I_k^-, \\ R_k &= aI_k^- dt + R_k^-, \\ D_k &= dI_k^- dt + D_k^-. \end{aligned}$$

Selanjutnya digunakan algoritma genetika [9] untuk mendefinisikan nilai awal parameter r, a, d , dan nilai awal state S_0 . Dalam simulasi masing-masing akan diprediksi berdasarkan kebijakan pembatasan pergerakan yang telah dikeluarkan pemerintah baik pusat dan daerah Jawa Timur. Faktor pergerakan dilakukan dengan cara mengalikan parameter r dengan faktor pengali 100%, 75%, dan 50%.

Kasus Indonesia

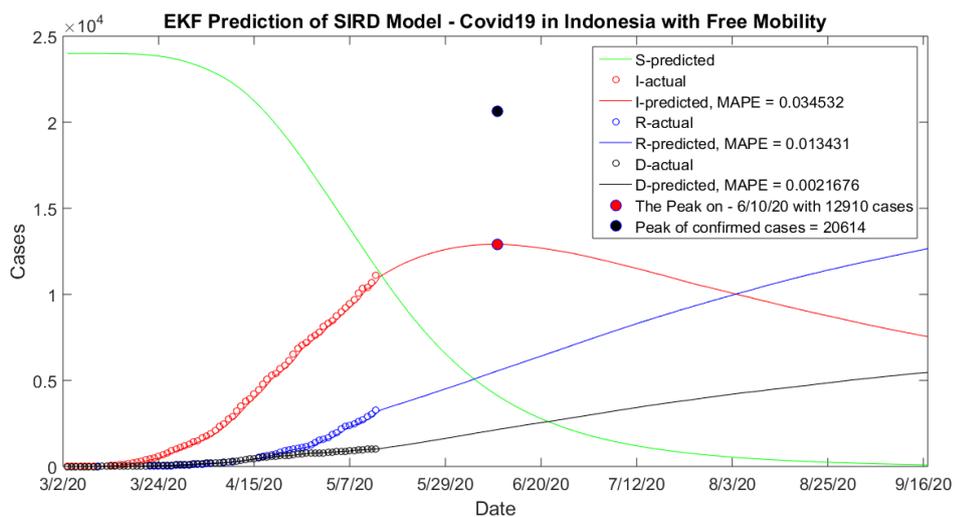
Pada bagian ini akan disimulasikan prediksi penyebaran Covid-19 di Indonesia dengan metode prediksi EKF. Data aktual I, R, dan D diambil dari kawalcovid19.id yang dimulai tanggal 2/3/2020 sampai 13/5/2020. Diasumsikan bahwa tidak semua penduduk Indonesia yang tidak terpapar Covid-19 merupakan individu yang rentan. Hal tersebut cukup beralasan karena paparan Covid-19 selama ini lebih banyak mengenai penduduk di pulau Jawa, Bali, dan Sumatera yang merupakan pulau dengan penduduk terbanyak di Indonesia. Sedangkan beberapa pulau yang bukan padat penduduk, kasus Covid-19 masih tergolong kecil.

Oleh karena itu, nilai awal S_0 dihitung dengan menggunakan algoritma genetika untuk mendapatkan jumlah individu yang rentan pada simulasi ini. Didapatkan nilai awal dengan algoritma genetika seperti pada Tabel 2 berikut:

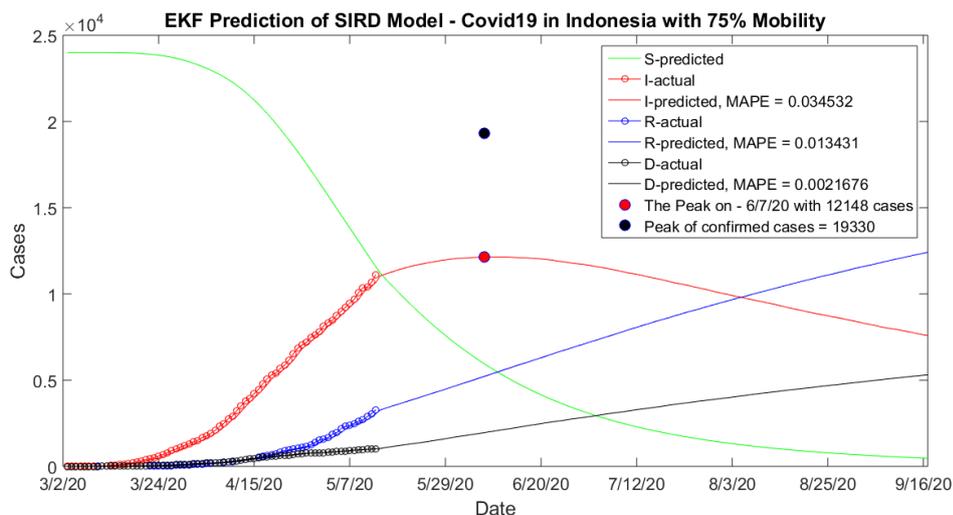
Tabel 2. Nilai awal parameter kasus Indonesia

Parameter	Nilai
S_0	24000
r	2.95095×10^{-6}
a	0.011731133
d	0.005463589

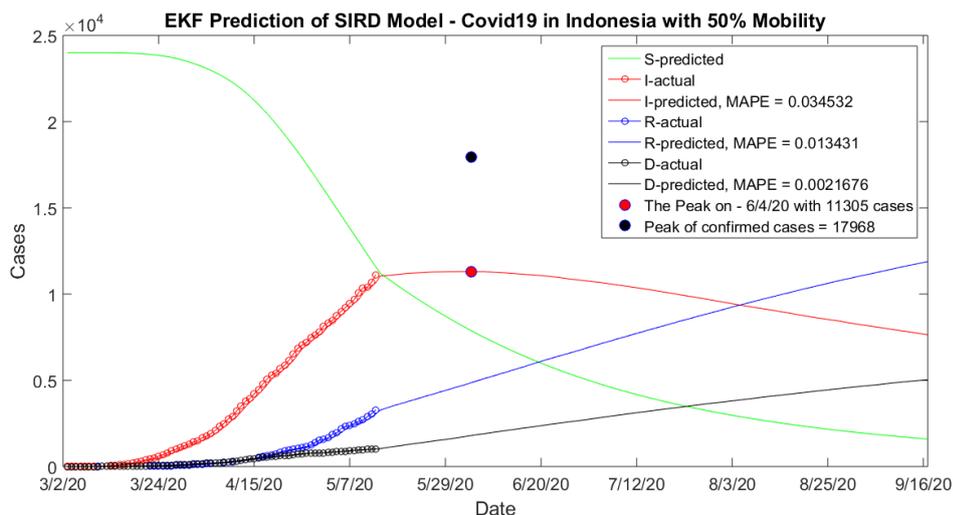
Pada simulasi ini, nilai awal S_0 tidak diambil dari data real penduduk Indonesia yang tidak terpapar Covid-19, melainkan dihitung dengan menggunakan algoritma genetika. Hal tersebut dilakukan Hasil simulasi penyebaran Covid-19 di Indonesia dengan metode prediksi EKF ditunjukkan pada Gambar 3-5.



Gambar 3. Penyebaran Covid-19 di Indonesia tanpa pembatasan pergerakan dengan EKF



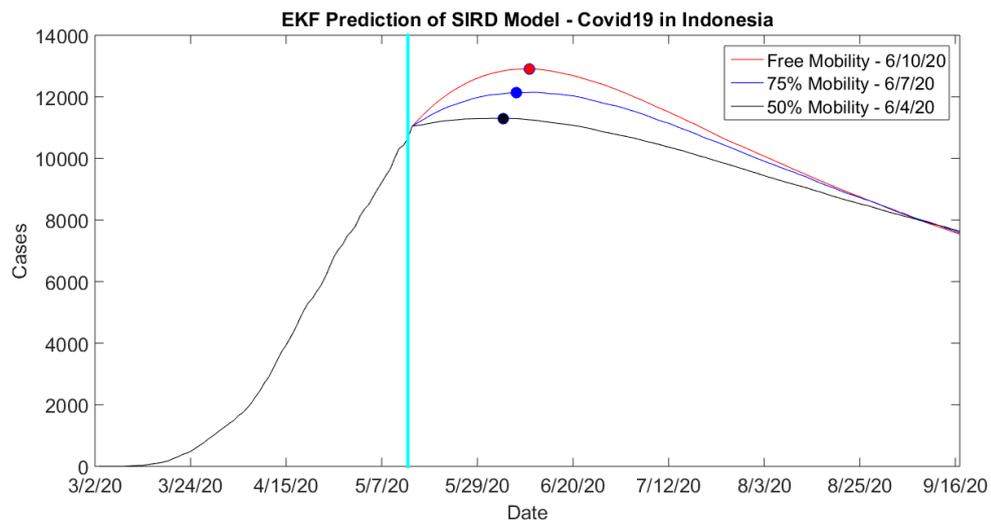
Gambar 4. Penyebaran Covid-19 di Indonesia dengan pergerakan 75% dengan metode prediksi EKF



Gambar 5. Penyebaran Covid-19 di Indonesia dengan pergerakan 50% dengan metode prediksi EKF

Dapat dilihat pada Gambar 3-5 grafik I memiliki puncak pada waktu yang berbeda-beda dan total infeksi yang berbeda pula pada masing-masing kasus. Untuk grafik R dan D pada masing-masing kasus cenderung naik konstan. Hal tersebut dapat terjadi dikarenakan penambahan kasus sembuh dan meninggal setiap harinya cenderung sedikit dan konstan, hal sebaliknya terjadi pada kasus infeksi dimana penambahan kasus infeksi di Indonesia cenderung naik dengan penambahan yang besar pada setiap harinya.

Grafik infeksi Covid-19 di Indonesia dengan tiga macam pembatasan pergerakan pada Gambar 3-5 dapat dirangkum pada pada Gambar 6 berikut.



Gambar 6. Grafik individu terinfeksi Covid-19 di Indonesia dengan 3 macam faktor pergerakan dengan metode prediksi EKF

Berdasarkan Gambar 6, puncak infeksi Covid-19 di Indonesia dengan pembatasan pergerakan 75% dan 50% memiliki puncak yang lebih landai dibandingkan tanpa adanya pembatasan pergerakan. Dengan pelambatan puncak infeksi pada pembatasan pergerakan, diharapkan tenaga medis dapat lebih maksimal dalam menangani pasien Covid-19 dan *collapse* rumah sakit rujukan Covid-19 di Indonesia dapat dihindari.

Tabel 3. Hasil prediksi puncak infeksi dan total individu terinfeksi Covid-19 di Indonesia

No	Pergerakan	Puncak infeksi	Total individu terinfeksi pada puncak infeksi
1	100%	10/6/2020	12910
2	75%	7/6/2020	12148
3	50%	4/6/2020	11035

Pada simulasi, pembatasan pergerakan (*mobility*) dimulai tanggal 14/5/2020. Berdasarkan Tabel 3, pembatasan pergerakan dapat mempengaruhi kecepatan puncak infeksi dan jumlah individu terinfeksi. Khusus kasus penyebaran Covid-19 di Indonesia, pembatasan pergerakan dapat mempercepat terjadinya puncak infeksi dengan total individu yang terinfeksi pada puncak infeksi lebih sedikit.

Kasus Jawa Timur

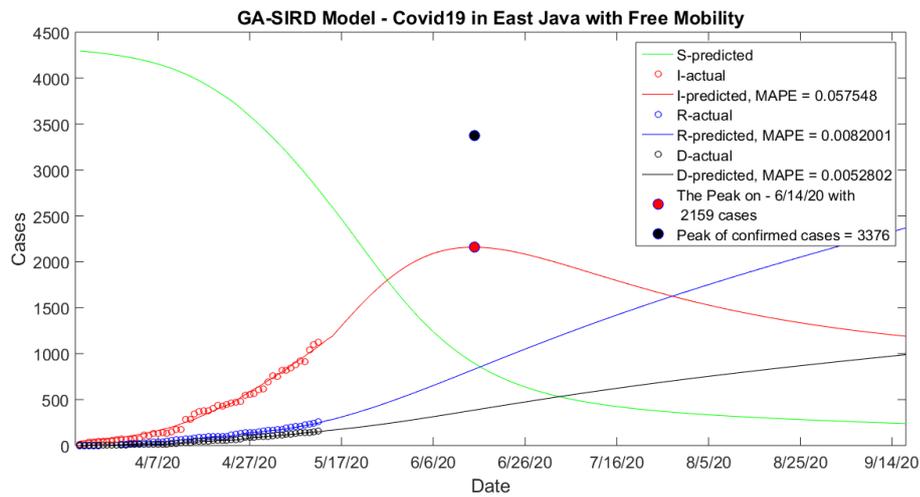
Pada bagian ini akan dilakukan simulasi kedua yaitu prediksi penyebaran Covid-19 di Jawa Timur dengan metode prediksi EKF. Data aktual I, R, dan D diambil dari detik.com yang dimulai

tanggal 18/3/2020 sampai 13/5/2020. Didapatkan nilai awal dengan algoritma genetika seperti pada Tabel 4 berikut:

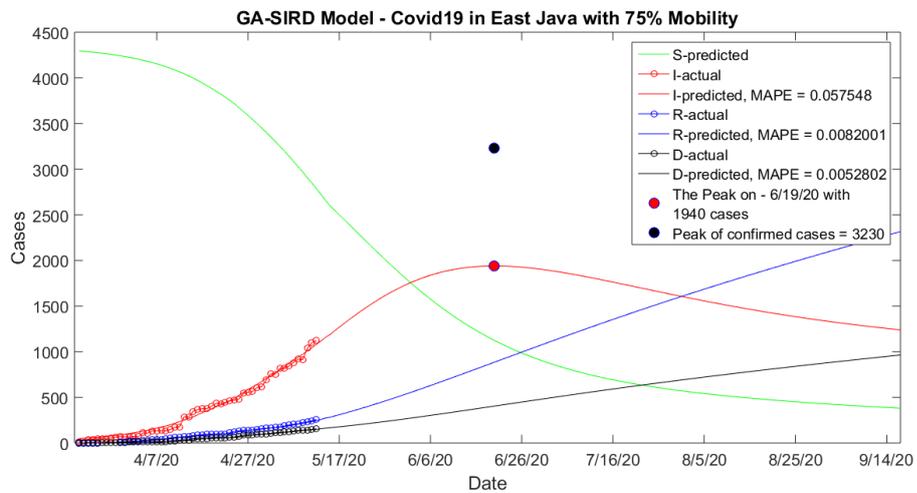
Tabel 4. Nilai awal parameter kasus Jawa Timur

Parameter	Nilai
S_0	4300
r	2.18505×10^{-5}
a	0.01407089
d	0.008476428

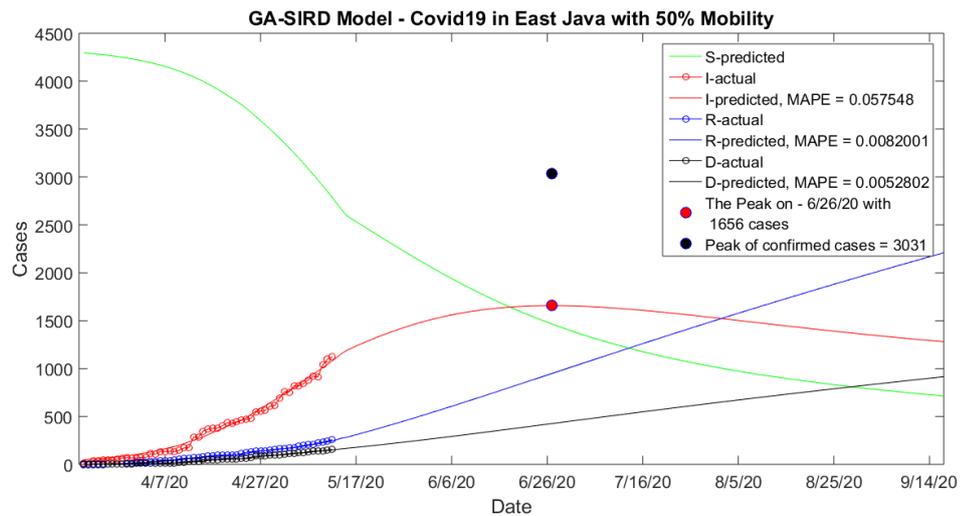
Hasil simulasi penyebaran Covid-19 di Jawa Timur dengan metode prediksi EKF ditunjukkan pada Gambar 7-9.



Gambar 7. Penyebaran Covid-19 di Jawa Timur tanpa pembatasan pergerakan dengan metode prediksi EKF



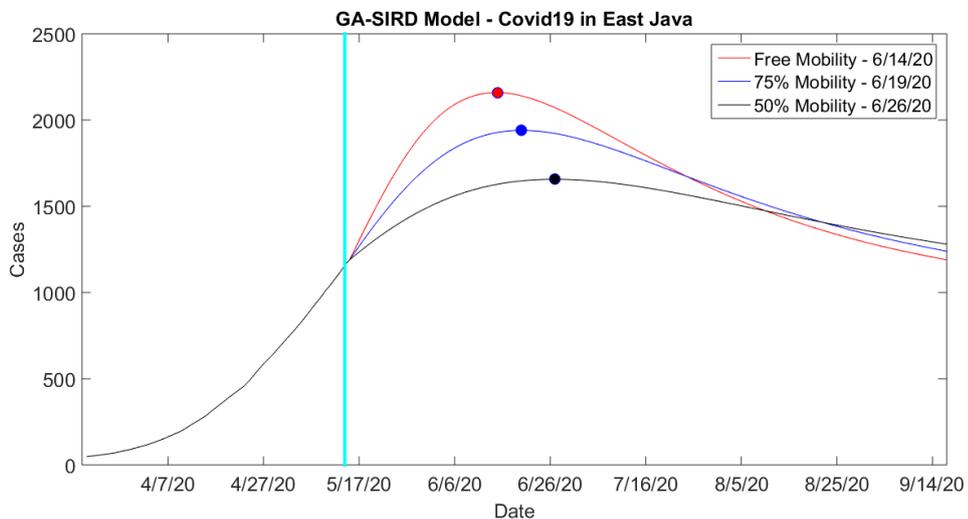
Gambar 8. Penyebaran Covid-19 di Jawa Timur dengan pergerakan 75% dengan metode prediksi EKF



Gambar 9. Penyebaran Covid-19 di Jawa Timur dengan pergerakan 50% dengan metode prediksi EKF

Dapat dilihat pada Gambar 7-9 grafik I memiliki puncak pada waktu yang berbeda-beda dan total infeksi yang berbeda pula pada masing-masing kasus. Untuk grafik R dan D pada masing-masing kasus cenderung naik konstan

Dapat dibandingkan grafik infeksi berdasarkan Gambar 7-9 pada Gambar 10 berikut.



Gambar 10. Grafik individu terinfeksi Covid-19 di Jawa Timur dengan 3 macam faktor pergerakan dengan metode prediksi EKF

Berdasarkan Gambar 10, puncak infeksi dengan pembatasan pergerakan memiliki puncak yang lebih landai dibandingkan tanpa adanya pembatasan pergerakan. Dengan pelambatan puncak infeksi pada pembatasan pergerakan 75% dan 50%, diharapkan tenaga medis dapat lebih maksimal dalam menangani pasien Covid-19 dan *collapse* rumah sakit di Jawa Timur akibat membludaknya pasien Covid-19 dapat dihindari.

Tabel 4. Hasil prediksi puncak infeksi dan total individu terinfeksi Covid-19 di Jawa Timur dengan metode prediksi EKF

No	Pergerakan	Puncak infeksi	Total individu terinfeksi pada puncak infeksi
1	100%	14/6/2020	2159
2	75%	19/6/2020	1940
3	50%	26/6/2020	1656

Pada simulasi, pembatasan pergerakan (mobility) dimulai tanggal 14/5/2020. Berdasarkan Tabel 4, pembatasan pergerakan dapat mempengaruhi kecepatan puncak infeksi dan jumlah individu terinfeksi. Berbeda dengan kasus di Indonesia secara umum, khusus kasus penyebaran Covid-19 di Jawa Timur pembatasan pergerakan dapat mempercepat terjadinya puncak infeksi dengan total individu yang terinfeksi pada puncak infeksi lebih sedikit.

5 Simpulan

Berdasarkan hasil simulasi prediksi penyebaran Covid-19 baik di Indonesia dan di Jawa Timur dapat dilakukan dengan metode prediksi EKF pada model SIRD. Pembatasan pergerakan dilakukan dalam simulasi yaitu faktor pergerakan 100%, 75%, dan 50%, dapat disimpulkan bahwa kebijakan pembatasan pergerakan yang dikeluarkan pemerintah cukup efektif dan dapat menekan jumlah individu terinfeksi pada puncak infeksi berlangsung.

6 Daftar Pustaka

- [1] D. Caccavo, "Chinese and Italian COVID-19 outbreaks can be correctly described by a modified SIRD model," *medRxiv Prepr.* doi <https://doi.org/10.1101/2020.03.19.20039388>, pp. 1–12, 2020.
- [2] C. I. Jones and S. Gsb, "Estimating and Simulating a SIRD Model of COVID-19 for Many Countries , States , and Cities," 2020.
- [3] N. Science, C. Phenomena, D. Fanelli, and F. Piazza, "Analysis and forecast of COVID-19 spreading in China , Italy and France," *Chaos, Solitons Fractals Interdiscip. J. Nonlinear Sci. Nonequilibrium Complex Phenom.*, vol. 134, p. 109761, 2020.
- [4] W. G. Kennedy and D. Hutchison, *Social Computing, Behavioral-Cultural Modeling, and Prediction*. Washington, DC: Springer Cham Heidelberg, 2014.
- [5] A. N. A. Syarifudin, D. A. Merdekawati, and E. Apriliani, "Perbandingan Metode Kalman Filter , Extended Kalman Filter , dan Ensemble Kalman Filter pada Model Penyebaran Virus HIV / AIDS," *LIMITS*, vol. 15, no. 1, pp. 17–29, 2018.

- [6] A. B. Gumel *et al.*, “Modelling strategies for controlling SARS outbreaks,” *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.*, vol. 271, no. 1554, pp. 2223–2232, 2004.
- [7] L. Bao *et al.*, “Reinfection could not occur in SARS-CoV-2 infected rhesus macaques,” *bioRxiv Prepr. doi <https://doi.org/10.1101/2020.03.13.990226>* ;, pp. 1–17, 2020.
- [8] L. Frank, L. Xie, and D. Popa, *Optimal and Robust Estimation With an Introduction to Stochastic Control Theory*, Second Edi. Boca Raton, FL: CRC Press, 2008.
- [9] J. McCall, “Genetic algorithms for modelling and optimisation,” *J. Comput. Appl. Math.*, vol. 184, pp. 205–222, 2005.