



KONTROL ADAPTIF PADA MODEL PENYEBARAN KOLERA DENGAN ADANYA KETIDAKPASTIAN PARAMETER

¹Regina Wahyudyah Sonata Ayu*, ²Hanna Hilyati Aulia

¹Program Studi Matematika, FMIPA, Universitas San Pedro, Indonesia

²Program Studi Ekonomi Syariah, Sekolah Tinggi Ekonomi Islam Darul Qur'an Minak Selehah, Indonesia

E-mail: ¹reginawahyudyahsonataayu@gmail.com , ²hannahilyatiulia@gmail.com

Received: August 2021; Accepted: September 2021; Published: October 2021

Abstract

In this paper the number of humans infected with cholera was controlled under the uncertainty in cholera model parameters. The aim of this research is to design an adaptive control so that the number of infected humans decreases. To achieve this goal, an adaptive controller was proposed to a deterministic model for the transmission of cholera involving five state variables (susceptible humans, infected humans, quarantined humans, recovered humans, and bacterial concentration) and one input control variable, i.e, the proportion of quarantined humans. A control law was designed such that the number of infected humans was decreased tracking the given reference function. The tracking error convergence were analyzed by employing the Lyapunov theorem. The performance of the proposed controller was evaluated through numerical simulations. The results show that the adaptive controller designed to the model ensures the tracking error convergence such that the number of infected humans has declined.

Keywords: Adaptive Controller, Cholera, Lyapunov Theorem, Parameter Uncertainty

Abstrak

Pada paper ini jumlah manusia terinfeksi kolera dikontrol dengan adanya ketidakpastian pada parameter model kolera. Tujuan penelitian ini adalah mendesain pengontrol adaptif sehingga jumlah manusia terinfeksi menurun. Untuk itu, sebuah pengontrol adaptif didesain pada suatu model deterministik penyebaran kolera yang melibatkan lima variabel *state* (manusia rentan, manusia terinfeksi, manusia dikarantina, manusia sembuh dan konsentrasi bakteri) dan satu masukan kontrol berupa proporsi manusia yang dikarantina. Sebuah hukum kontrol dirancang sedemikian sehingga jumlah manusia terinfeksi menurun mengikuti fungsi acuan yang diberikan. Konvergensi *tracking error* diselidiki dengan menggunakan teorema *Lyapunov*. Performansi kontrol adaptif yang telah didesain dievaluasi menggunakan simulasi numerik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan kontrol adaptif pada model menjamin konvergensi *tracking error* sedemikian sehingga jumlah manusia terinfeksi mengalami penurunan.

Kata kunci: Teorema *Lyapunov*, kontrol adaptif, ketidakpastian parameter, kolera

*Corresponding author.

Peer review under responsibility UIN Imam Bonjol Padang.

© 2021 UIN Imam Bonjol Padang. All rights reserved.

p-ISSN: 2580-6726

e-ISSN: 2598-2133

PENDAHULUAN

Kolera adalah infeksi diare akut yang disebabkan oleh konsumsi makanan atau minuman yang terkontaminasi dengan bakteri *Vibrio cholerae*. Tanpa penanganan, kolera dapat menyebabkan kematian dalam waktu 24 jam. Transmisi kolera umumnya dikarenakan kurangnya akses air bersih dan fasilitas sanitasi yang buruk. Daerah berisiko termasuk diantaranya daerah kumuh di pinggiran kota dan tempat pengungsian dengan kebutuhan air bersih serta sanitasi yang tidak terpenuhi. Para peneliti telah memperkirakan bahwa setiap tahun terdapat 1,3 hingga 4 juta kasus dengan 21.000 hingga 400.000 diantaranya berdampak kematian (Ali et al., 2015). Angka beban penyakit kolera secara global tidak dapat ditentukan karena banyaknya kasus yang tidak tercatat disebabkan kurangnya sistem pengawasan serta ketakutan terhadap dampak pada sektor pariwisata negara. Hingga kini kolera masih mewabah di beberapa bagian Afrika, Asia Selatan, dan Amerika Latin dengan kasus terbaru terjadi di Yaman pada Juni 2019, yaitu tercatat 85.681 kasus dalam satu bulan (WHO, 2019). Ini berarti, kolera masih menjadi ancaman sehingga diperlukan strategi untuk mengendalikan penyebaran wabah. Untuk menerapkan berbagai strategi pengendalian dan menilai kelebihan serta kekurangan dalam implementasinya, memahami dinamika penyebaran penyakit menjadi penting.

Dinamika penyebaran penyakit umumnya dirumuskan dalam suatu model matematika yang disebut sebagai model epidemik. Pemodelan matematika digunakan sebagai alat dalam membandingkan, merencanakan, mengimplementasikan, serta mengevaluasi strategi yang tepat dalam mengatasi penyebaran penyakit. Sejak 1979, beberapa model matematika terkait penyebaran kolera telah diusulkan. Capasso dan Fontana membangun model matematika sederhana yang terdiri atas populasi manusia

terinfeksi dan bakteri *V. cholerae* berdasarkan fenomena epidemik kolera di Mediterania Eropa pada musim panas 1973 (Capasso & Paveri-Fontana, 1979). Lalu, Codeco mengembangkan model Capasso dan Fontana dengan menambahkan populasi manusia rentan disertai asumsi terdapat kontak antara manusia rentan dan sumber air yang terkontaminasi bakteri *V. cholerae* (Torres Codeço, 2001). Cui dkk. mengusulkan strategi penanganan berupa vaksinasi sehingga manusia rentan yang divaksinasi memiliki kekebalan sementara terhadap kolera (Cui et al., 2014). Menurut WHO dalam *Weekly Epidemiological Record* (WHO, 2019), selama enam bulan pertama, vaksinasi memberikan perlindungan sekitar 85%, kemudian menurun hingga menjadi 50% dalam satu tahun pertama dan setelah dua tahun tingkat perlindungan vaksin menjadi turun dibawah 50%. Oleh karena itu, WHO menyarankan vaksinasi hanya sebagai strategi pendamping dalam pengendalian kolera. Kemudian, Lemos-P. dkk. mengusulkan suatu model epidemik kolera dengan kontrol optimal berupa karantina, yaitu dengan mengisolasi dan menangani individu terinfeksi hingga menjadi sembuh (Lemos-Paião et al., 2017).

Penyebaran penyakit termasuk kolera dipengaruhi berbagai faktor seperti kondisi lingkungan dan struktur populasi. Akibatnya, mengidentifikasi dinamika epidemik menjadi rumit dan model matematika yang tepat menjadi sulit diperoleh. Sebagaimana pada sistem dinamik, dinamika penyebaran penyakit juga berpotensi disertai faktor-faktor ketidakpastian dan ketidakakuratan. Oleh karena itu, faktor ketidakpastian juga perlu dipertimbangkan dalam membentuk strategi kontrol sedemikian sehingga tujuan desain kontrol dapat tercapai meskipun terdapat ketidakpastian dalam model. Pendekatan kontrol adaptif telah digunakan untuk mengevaluasi model epidemik dengan adanya ketidakpastian parameter. Moradi dkk. (2015)

dan Rokhforoz dkk. (2017) telah mengkaji kontrol kokoh adaptif untuk model terapi kanker (Moradi et al., 2015). Aghajanzadeh dkk telah mendesain kontrol adaptif untuk pengobatan infeksi hepatitis B (Aghajanzadeh et al., 2017). Pada penelitian lain, Sharifi dan Moradi telah mengevaluasi model terapi kanker menggunakan pendekatan kontrol adaptif komposit taklinear (Sharifi & Moradi, 2019). Kontrol adaptif juga telah didesain pada model penyebaran demam berdarah dengan melibatkan fase akuatik nyamuk (Ayu, 2021). Pada penelitian ini akan didesain kontrol adaptif pada model epidemik kolera yang telah diusulkan oleh Lemos-P., dkk. dengan mempertimbangkan adanya ketidakpastian parameter. Tujuan desain kontrol adaptif ini adalah untuk menurunkan jumlah manusia terinfeksi kolera sesuai dengan fungsi acuan yang diberikan atau dengan kata lain eror *tracking* menuju nol saat waktu menuju takhingga. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kontrol adaptif yang telah didesain pada pada model kolera telah menjamin konvergensi *tracking error* sehingga terjadi penurunan pada jumlah manusia terinfeksi kolera. Selain itu, konsentrasi bakteri *V. cholerae* juga menurun dan jumlah manusia rentan naik.

METODE PENELITIAN

Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan penelitian studi kepustakaan yakni dengan mengkaji referensi dan hasil penelitian sebelumnya yang terkait guna mendapat landasan teori untuk penelitian ini.

Prosedur Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan terlebih dahulu membuat formulasi model kontrol yang akan dikaji. Setelah itu, kontrol adaptif didesain berdasarkan model kontrol yang ada. Langkah selanjutnya adalah melakukan simulasi numerik untuk melihat performansi

kontrol adaptif yang telah didesain dalam menurunkan jumlah manusia terinfeksi dengan adanya ketidakpastian parameter.

Formulasi Model Kontrol Kolera

Model kontrol penyebaran kolera dibentuk berdasarkan tipe SIQR (*Susceptible-Infected-Quarantined-Recovered*) dengan mempertimbangkan suatu kelas konsentrasi bakteri *Vibrio cholerae*. Total populasi manusia pada saat t dinotasikan $N(t)$, dibagi menjadi empat kelas, yaitu manusia rentan $S(t)$, manusia terinfeksi $I(t)$, manusia dikarantina $Q(t)$, dan manusia sembuh $R(t)$. Dengan demikian, total populasi manusia saat t adalah $N(t) = S(t) + I(t) + Q(t) + R(t)$. Sementara itu, kelas $B(t)$ menunjukkan konsentrasi bakteri pada waktu t .

Model kontrol penyebaran kolera mengikuti model yang telah dikaji oleh (Lemos-Paião et al., 2017) dengan menambahkan satu input kontrol pada kompartemen manusia terinfeksi yang berupa proporsi manusia yang dikarantina (u). Formulasi model secara lengkap disajikan dalam bentuk sistem persamaan diferensial *nonlinear* sebagai berikut

$$\dot{S} = \frac{dS}{dt} = \Lambda - \frac{\beta B}{\kappa + B} S + \omega R - \mu S, \quad (1.a)$$

$$\dot{I} = \frac{dI}{dt} = \frac{\beta B}{\kappa + B} S - \delta u I - (\alpha_1 + \mu) I, \quad (1.b)$$

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} = \delta u I - (\varepsilon + \alpha_2 + \mu) Q, \quad (1.c)$$

$$\dot{R} = \frac{dR}{dt} = \varepsilon Q - (\omega + \mu) R, \quad (1.d)$$

$$\dot{B} = \frac{dB}{dt} = \eta I - dB. \quad (1.e)$$

Deskripsi parameter model disajikan dalam Tabel 1. Nilai parameter Λ dan μ diambil berdasarkan Index Mundi (Lemos-Paião et al., 2017). Nilai parameter β , η , dan d diambil dari penelitian Capone, dkk. Nilai parameter κ dan

ω masing-masing diambil dari penelitian Sanchez dkk. dan Neilan dkk. (dikutip dalam Lemos-P. dkk., 2017). Sedangkan nilai parameter ε , δ , α_1 , dan α_2 mengikuti nilai dalam penelitian Mwasa dkk. (Lemos-Paião et al., 2017)

Tabel 1. Deskripsi dan Nilai Parameter Model

| Par. | Deskripsi | Nilai |
|---------------|---|---|
| Λ | Laju rekrutmen manusia rentan. | $\frac{24,4N(0)}{365.000}$ hari ⁻¹ |
| μ | Laju kematian alami manusia. | $2,2493 \times 10^{-5}$ hari ⁻¹ |
| β | Laju manusia terpapar bakteri. | 0,8 hari ⁻¹ |
| κ | Konstanta <i>half-saturation</i> . | 10^6 sel/ml |
| ω | Laju penurunan imunitas. | $\frac{0,4}{365}$ hari ⁻¹ |
| ε | Laju kesembuhan. | 0,2 hari ⁻¹ |
| δ | Laju karantina | 0,05 hari ⁻¹ |
| α_1 | Laju kematian karena penyakit pada individu terinfeksi. | 0,015 hari ⁻¹ |
| α_2 | Laju kematian karena penyakit pada individu yang dikarantina. | 0,0001 hari ⁻¹ |
| η | Laju peluruhan bakteri. | $10^{\text{sel/ml}}$ hari ⁻¹ orang ⁻¹ |
| d | Laju kematian bakteri. | 0,33 hari ⁻¹ |

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Desain Kontrol Adaptif

Pada bagian ini akan didesain kontrol adaptif untuk model (1) di atas. Tujuan desain kontrol ini adalah untuk menurunkan jumlah manusia terinfeksi. Untuk itu, proporsi manusia yang dikarantina ($0 \leq u \leq 1$) dikontrol sedemikian sehingga jumlah manusia terinfeksi (I) berkurang mengikuti fungsi acuan (I^d)

yang monoton turun dan konvergen ke nol. Kontrol adaptif u diperoleh dengan menyusun ulang persamaan (1.b) menjadi

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

Misalkan $\theta_1 = \frac{1}{\delta}$, $\theta_2 = \frac{\beta B}{\delta(\kappa + B)}$, dan $\theta_3 = \frac{(\alpha_1 + \mu)}{\delta}$, maka persamaan (2) dapat ditulis kembali menjadi

$$u = -\frac{\dot{I}}{I} \theta_1 + \frac{BS}{(\kappa + B)I} \theta_2 - \theta_3. \quad (3)$$

Selanjutnya, misalkan $\tilde{I} = I - I^d = \tilde{I} - k\tilde{I}$, maka persamaan (3) menjadi

$$u = -\frac{\phi}{I} \theta_1 + \frac{BS}{(\kappa + B)I} \theta_2 - \theta_3 = \mathfrak{R}\theta, \quad (4)$$

dimana $\tilde{I} = I - I^d$ menyatakan eror tracking, $\mathfrak{R} = \begin{bmatrix} -\frac{\phi}{I} & \frac{BS}{(\kappa + B)I} & -1 \end{bmatrix}$ menyatakan vektor regresor, $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$ menyatakan vektor konstan berisi parameter tak pasti pada persamaan (1.b), dan $k > 0$ menyatakan gain pengontrol u . Lebih lanjut, karena desain kontrol mempertimbangkan ketidakpastian parameter maka vektor parameter θ kemudian diganti oleh vektor estimasinya yakni $\hat{\theta}$ sehingga diperoleh hukum kontrol adaptif sebagai berikut

$$u = -\frac{\phi}{I} \hat{\theta}_1 + \frac{BS}{(\kappa + B)I} \hat{\theta}_2 - \hat{\theta}_3 = \mathfrak{R}\hat{\theta}. \quad (5)$$

Lyapunov-Like Lemma. Jika suatu fungsi skalar $V(x,t)$ memenuhi

- (i) $V(x,t)$ terbatas di bawah
- (ii) $\dot{V}(x,t) \leq 0$
- (iii) $\dot{V}(x,t)$ kontinu seragam

maka $\dot{V}(x,t) \rightarrow 0$ saat $t \rightarrow \infty$ (Slotine & Li, 1991).

Proposisi. Error tracking jumlah manusia terinfeksi akan konvergen ke nol ($\tilde{I} \rightarrow 0$ saat $t \rightarrow \infty$) dan vektor estimasi $\hat{\theta}$ terbatas dengan menggunakan kontrol adaptif pada persamaan (5) dan mekanisme adaptasi parameter

$$\dot{\hat{\theta}} = \Gamma \mathcal{R}^T \tilde{I}, \quad (6)$$

dengan $\Gamma \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ merupakan matriks definit positif yang menyatakan gain adaptif.

Bukti.

Mensubstitusikan persamaan (5) ke persamaan (3) dan dengan melakukan manipulasi aljabar maka diperoleh dinamika lup tertutup dari jumlah manusia terinfeksi sebagai berikut

$$\dot{\tilde{I}} = -k\tilde{I} - \frac{1}{\theta_1} \tilde{I} \mathcal{R} \tilde{\theta}, \quad (7)$$

dengan $\tilde{\theta} = \hat{\theta} - \theta$ menyatakan error estimasi vektor parameter θ . Selanjutnya, untuk menganalisis kekonvergenan error tracking pilih fungsi Lyapunov

$$V = \frac{1}{2} \left[\tilde{I}^2 + \frac{1}{\theta_1} \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \tilde{\theta} \right] \geq 0,$$

maka

$$\dot{V} = \tilde{I} \dot{\tilde{I}} + \frac{1}{\theta_1} \dot{\tilde{\theta}}^T \Gamma^{-1} \tilde{\theta}. \quad (8)$$

Karena $\dot{\tilde{\theta}} = \dot{\hat{\theta}}$ dan dengan mensubstitusi persamaan (6) dan (7) ke persamaan (8) diperoleh

$$\dot{V} = -k\tilde{I}^2 \leq 0.$$

Perhatikan bahwa fungsi Lyapunov $V \geq 0$ dalam \tilde{I} dan $\tilde{\theta}$ serta \dot{V} semi definit negatif ($\dot{V} \leq 0$) maka V terbatas. Akibatnya, \tilde{I} dan $\tilde{\theta}$ juga terbatas. Sementara itu, karena fungsi

acuan untuk jumlah manusia terinfeksi kolera (I^d) dan \tilde{I} terbatas, maka I terbatas. Selanjutnya, tinjau

$$\ddot{V} = -2k\tilde{I}\dot{\tilde{I}}.$$

Karena \tilde{I} dan $\dot{\tilde{I}}$ terbatas, maka \ddot{V} juga terbatas sehingga \dot{V} kontinu seragam. Akibatnya, berdasarkan Lyapunov-Like Lemma, $\dot{V} \rightarrow 0$ saat $t \rightarrow \infty$. Selanjutnya, karena $k > 0$, maka haruslah $\tilde{I} \rightarrow 0$ saat $t \rightarrow \infty$. Lebih lanjut, karena $\tilde{\theta}$ terbatas dan θ konstan, maka $\hat{\theta}$ terbatas. Selain itu, karena error estimasi $\tilde{\theta}$ terbatas maka kontrol adaptif yang telah didesain kokoh terhadap ketidakpastian parameter. ■

Simulasi dan Analisis Numerik

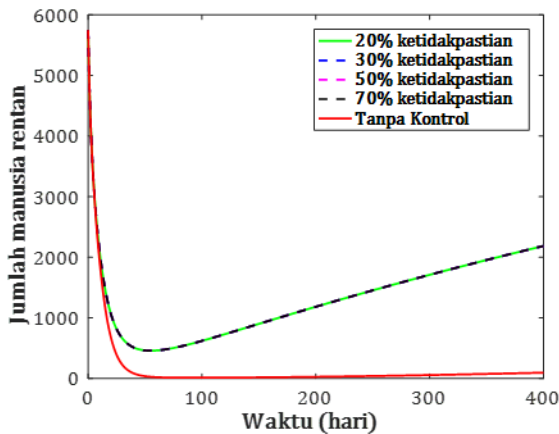
Pada bagian ini akan dilakukan simulasi numerik guna mengevaluasi strategi kontrol adaptif yang sudah didesain untuk kemudian dianalisis pengaruhnya dalam menurunkan jumlah manusia terinfeksi kolera. Simulasi numerik dilakukan dengan menggunakan MATLAB R2016b yakni dengan memanfaatkan perintah ode45 dengan lama periode kontrol adalah 400 hari. Nilai parameter model mengikuti nilai-nilai yang disajikan pada Tabel 1. Sementara itu, nilai awal untuk masing-masing variabel state adalah $S(0) = 5.750$, $I(0) = 1.700$, $Q(0) = 0$, $R(0) = 0$, dan $B(0) = 275.000$.

Strategi kontrol adaptif disimulasikan dengan memilih fungsi acuan sebagai berikut:

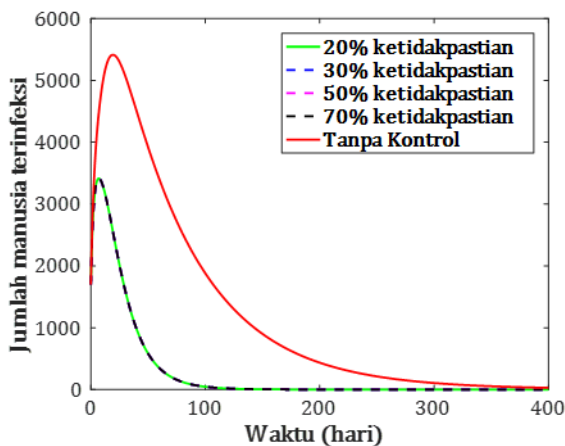
$$I^d(t) = I(0)e^{-\alpha t},$$

Dengan $\alpha = 0,5$. Gain pengontrol pada persamaan (5) dan matriks gain adaptif pada persamaan (6) dipilih melalui proses trial and error sedemikian sehingga konvergensi error tracking tercapai yakni $k = 0,5$ dan $\Gamma = \text{diag}(10^{-8}, 10^{-8}, 10^{-8})$. Lebih lanjut, 20%, 30%, 50%, dan 70% ketidakpastian dipilih

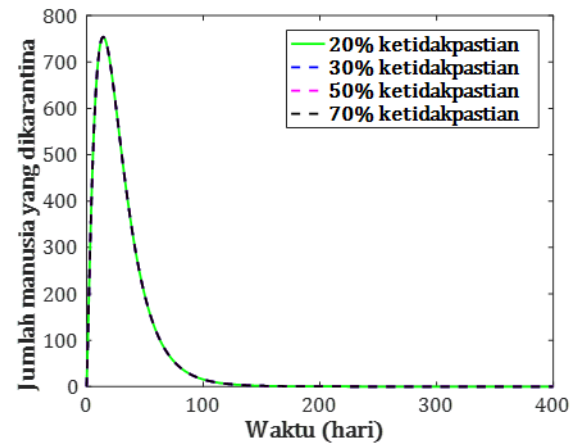
sebagai nilai awal untuk mekanisme adaptasi parameter pada persamaan (6). Pemilihan presentase ketidakpastian ini dilakukan secara *trial and error* untuk melihat bagaimana performansi kontrol adaptif yang telah didesain dengan adanya ketidakpastian parameter.



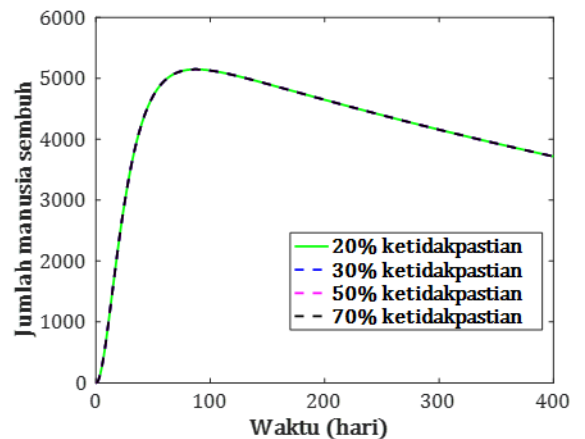
Gambar 1. Simulasi Numerik Perbandingan Jumlah Manusia Rentan Sebelum dan Sesudah Dikenakan Kontrol Adaptif untuk Empat Kondisi Ketidakpastian (20%, 30%, 50%, dan 70%).



Gambar 2. Simulasi Numerik Perbandingan Jumlah Manusia Terinfeksi Sebelum dan Sesudah Dikenakan Kontrol Adaptif untuk Empat Kondisi Ketidakpastian (20%, 30%, 50%, dan 70%).



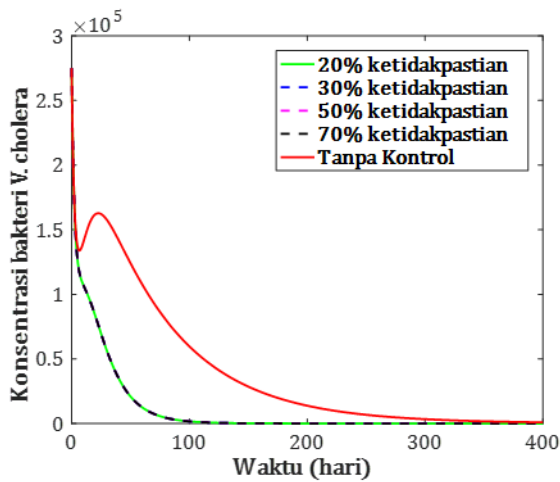
Gambar 3. Simulasi Numerik Perbandingan Jumlah Manusia yang Dikarantina Sebelum dan Sesudah Dikenakan Kontrol Adaptif untuk Empat Kondisi Ketidakpastian (20%, 30%, 50%, dan 70%).



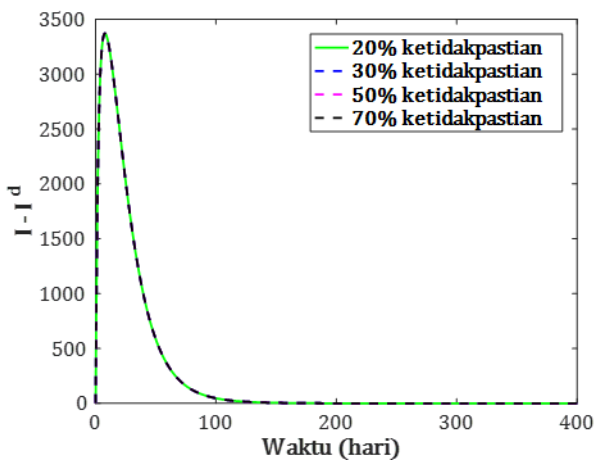
Gambar 4. Simulasi Numerik Perbandingan Jumlah Manusia Sembuh Sebelum dan Sesudah Dikenakan Kontrol Adaptif untuk Empat Kondisi Ketidakpastian (20%, 30%, 50%, dan 70%).

Berdasarkan hasil simulasi, solusi model penyebaran kolera sesudah dikenakan kontrol adaptif memiliki tren yang serupa untuk keempat kondisi ketidakpastian parameter yang diberikan. Perhatikan bahwa jumlah manusia terinfeksi mengalami penurunan yang signifikan dan konvergen ke nol lebih cepat

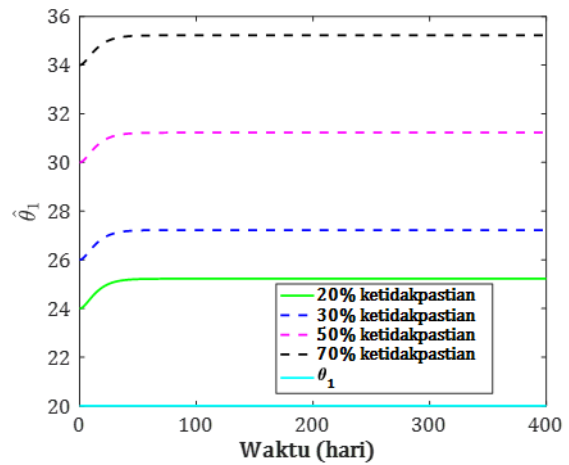
jika dibandingkan dengan keadaan sebelum dikontrol (Gambar 2). Sebagai akibatnya jumlah manusia rentan pun mengalami peningkatan (Gambar 1). Penurunan jumlah manusia terinfeksi juga menyebabkan penurunan pada jumlah manusia yang dikarantina (Gambar 3) dan manusia sembuh (Gambar 4). Sementara itu, konsentrasi bakteri *V. cholerae* juga mengalami penurunan signifikan setelah dikontrol secara adaptif (Gambar 5).



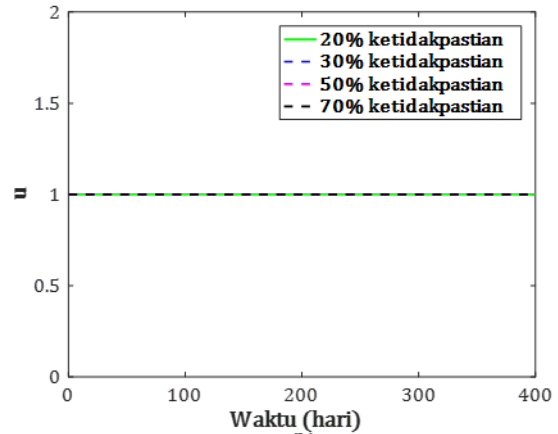
Gambar 5. Simulasi Numerik Perbandingan Konsentrasi Bakteri *V. Cholera* Sebelum dan Sesudah Dikenakan Kontrol Adaptif untuk Empat Kondisi Ketidakpastian (20%, 30%, 50%, dan 70%).



Gambar 6. Simulasi Numerik Tracking Error Jumlah Manusia Terinfeksi untuk 20%, 30%, 50%, dan 70% Ketidakpastian.



Gambar 7. Simulasi Numerik Vektor Estimasi Parameter $\hat{\theta}_1$ untuk 20%, 30%, 50%, dan 70% Ketidakpastian.



Gambar 8. Simulasi Numerik Proporsi Jumlah Manusia yang Dikarantina (u) untuk 20%, 30%, 50%, dan 70% Ketidakpastian.

Kontrol adaptif pada persamaan (5) dan mekanisme adaptasi parameter pada persamaan (6) menjamin konvergensi *error tracking*. Sebagaimana telah dibuktikan pada bagian sebelumnya yakni melalui analisis Lyapunov, *error tracking* jumlah manusia terinfeksi konvergen ke nol saat waktu mendekati takhingga untuk semua kondisi ketidakpastian yang diberikan (lihat Gambar 6). Selain itu, vektor estimasi parameter pun terbatas (lihat Gambar 7). Parameter estimasi

lainnya ($\hat{\theta}_2$ dan $\hat{\theta}_3$) juga terbatas namun hasil simulasi tidak disajikan dalam paper ini untuk alasan keringkasan. Lebih lanjut, berdasarkan Gambar 8 terlihat bahwa kontrol adaptif u dapat beradaptasi (kokoh) dengan adanya ketidakpastian parameter sedemikian sehingga konvergensi eror *tracking* tercapai.

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Pada penelitian ini kontrol adaptif berupa proporsi manusia yang dikarantina didesain pada model penyebaran kolera dimana parameter model mengandung ketidakpastian. Tujuan desain ini adalah menurunkan jumlah manusia terinfeksi. Konvergensi *tracking error* dan kekokohan (*robustness*) terhadap ketidakpastian parameter dianalisis menggunakan fungsi Lyapunov yang bersesuaian dengan terlebih dahulu menentukan aturan kontrol adaptif dan mekanisme adaptasi parameter.

Simulasi numerik telah dilakukan untuk mengevaluasi performansi kontrol adaptif yang telah didesain dengan mempertimbangkan empat kondisi ketidakpastian parameter yakni 20%, 30%, 50%, dan 70% ketidakpastian. Berdasarkan hasil simulasi terlihat bahwa solusi model dengan kontrol adaptif serupa sekalipun terdapat ketidakpastian parameter. Desain ini juga menjamin eror *tracking* tercapai sedemikian sehingga tujuan desain kontrol, yakni penurunan jumlah manusia terinfeksi, tercapai.

Saran

Penelitian ini hanya mempertimbangkan unsur ketidakpastian parameter dan belum melibatkan bentuk ketidakpastian lainnya. Untuk itu, pada penelitian selanjutnya, dapat ditambahkan ketidakpastian lainnya seperti fungsi disturbansi atau gangguan.

REFERENSI

- Aghajanzadeh, O., Sharifi, M., Tashakori, S., & Zohoor, H. (2017). Nonlinear adaptive control method for treatment of uncertain hepatitis B virus infection. *Biomedical Signal Processing and Control*, 38, 174–181.
- Ali, M., Nelson, A. R., Lena Lopez, A., & Sack, D. A. (2015). *Updated Global Burden of Cholera in Endemic Countries*. 9(6). <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0003832>
- Ayu, R. W. S. (2021). *Desain kendali adaptif pada model penyebaran demam berdarah dengan melibatkan fase akuatik Nyamuk*. 1(1), 1–10. <https://ejurnal.unisap.ac.id/index.php/leibniz/article/view/38>
- Capasso, V., & Paveri-Fontana, S. (1979). A mathematical model for the 1973 cholera epidemic in the European Mediterranean region. *Revue d'épidémiologie et de Santé Publique*, 27(2), 121–132. <https://europepmc.org/article/med/538301>
- Cui, an, Wu, Z., & Zhou, X. (2014). *Mathematical Analysis of a Cholera Model with Vaccination*. <https://doi.org/10.1155/2014/324767>
- Lemos-Paião, A. P., Silva, C. J., & Torres, D. F. M. (2017). An epidemic model for cholera with optimal control treatment. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 318, 168–180. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2016.11.002>
- Moradi, H., Sharifi, M., & Vossoughi, G. (2015). Adaptive robust control of cancer chemotherapy in the presence of parametric uncertainties: A comparison between three hypotheses. *Computers in Biology and Medicine*, 56, 145–157. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compbimed.2014.11.002>
- Sharifi, M., & Moradi, H. (2019). Nonlinear composite adaptive control of cancer chemotherapy with online identification of uncertain parameters. *Biomedical*

Signal Processing and Control, 49(360–374).

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bspc.2018.07.009>

Slotine, J.-J. E., & Li, W. (1991). *APPLIED NONLINEAR CONTROL*.

Torres Codeço, C. (2001). Endemic and epidemic dynamics of cholera: the role of the aquatic reservoir. *BMC Infectious Diseases*, 1(1), 1.

<http://www.biomedcentral.com/1471-2334/1/1>

WHO. (2019). *Cholera Situation in Yemen*. May, 22765273.

http://www.emro.who.int/images/stories/csr/documents/Cholera_situation_update_Yemen_February_2019.pdf?ua=1