

PEMODELAN RAMALAN TREND PENYAKIT INFLUENZA H1N1 MENGUNAKAN MODEL BERSEPADU SEIQRE

(Modelling Predicting of Novel Influenza H1N1 Trend Disease Using Integrated
SEIQRE Model)

EMMERLINE SHELDA SIAW, SARATHA SATHASIVAM*, SABASTINE EMMANUEL
& SALAUDEEN ABDULWAHEED ADEBAYO

ABSTRACT

The H1N1 influenza outbreak, which initially infected over 15,000 individuals in Malaysia, served as a stark warning to healthcare professionals and all stakeholders in Malaysia and global health sectors. This study proposes SEIQRE model to manage and prevent the spread of influenza through quarantine strategies and natural recovery mechanisms. By employing the Runge-Kutta method, the study provides deeper insights into the dynamics of H1N1 influenza and develops effective strategies to mitigate transmission and reduce risk in high-prevalence areas. Analysis of key epidemiological parameters reveals that reinfection plays a significant role in triggering a backward bifurcation, challenging the conventional reliance on a basic reproduction number less than one. A modified model excluding reinfection confirms a forward bifurcation. These findings underscore the importance of incorporating quarantine, bifurcation effects, and scaling factors into effective infection control strategies. This research contributes to global efforts to combat the H1N1 pandemic and safeguard public health in Malaysia.

Keywords: novel influenza H1N1; disease dynamics; preventive measures; transmission risk; epidemiological parameters; basic reproduction number

ABSTRAK

Wabak influenza H1N1, yang pada mulanya menjangkiti lebih daripada 15,000 individu di Malaysia, bertindak sebagai amaran tegas kepada para profesional kesihatan dan semua pemegang kepentingan dalam sektor kesihatan Malaysia dan global. Kajian ini mencadangkan model SEIQRE untuk mengurus dan mencegah penularan influenza melalui strategi kuarantin dan mekanisme pemulihan semula jadi. Dengan menggunakan kaedah *Runge-Kutta*, kajian ini mampu memperoleh pemahaman yang lebih mendalam tentang dinamik influenza H1N1 dan membangunkan strategi yang berkesan untuk mengurangkan penularan dan mengurangkan risiko di kawasan dengan prevalen tinggi. Analisis parameter epidemiologi utama menunjukkan bahawa jangkitan berulang memainkan peranan penting dalam mencetuskan bifurkasi terbalik, mencabar ketergantungan konvensional kepada nombor reproduksi asas yang kurang daripada satu. Model terubah suai yang tidak termasuk jangkitan berulang mengesahkan bifurkasi ke hadapan. Penemuan-penemuan ini menggariskan kepentingan memasukkan kuarantin, kesan bifurkasi, dan faktor skala ke dalam strategi kawalan jangkitan yang berkesan. Penyelidikan ini menyumbang kepada usaha global untuk memerangi pandemik H1N1 dan menjaga kesihatan awam di Malaysia.

Kata kunci: influenza H1N1 novel; dinamik penyakit; langkah pencegahan; risiko penularan; parameter epidemiologi; nombor reproduksi asas

1. Pengenalan

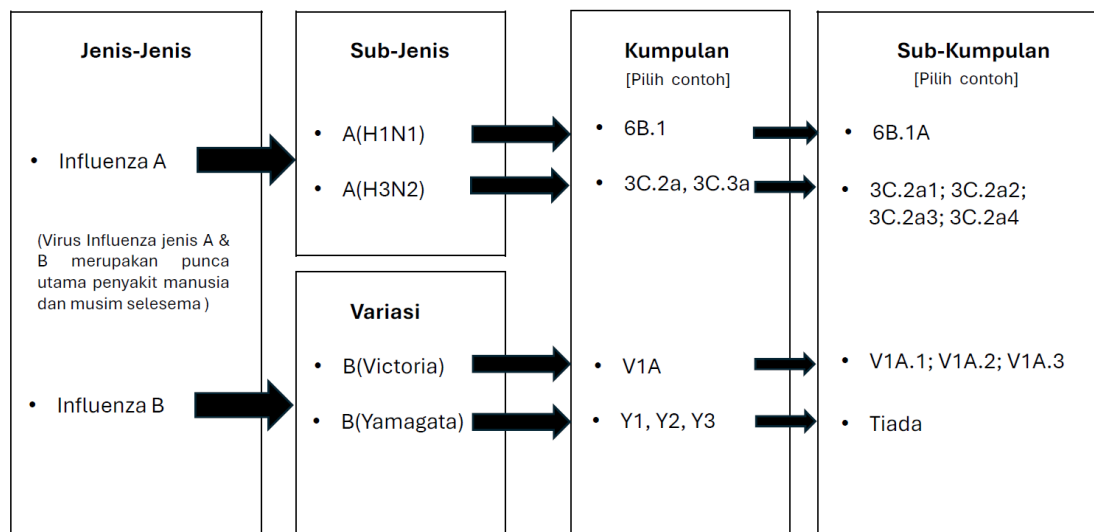
Pelaksanaan langkah-langkah pencegahan telah terbukti sangat berkesan dalam mengurangkan penularan dan kesan keseluruhan penyakit berjangkit terhadap kesihatan manusia, haiwan, dan tumbuhan, kerana ia memainkan peranan penting dalam mengurangkan penyebaran penyakit. Langkah-langkah pencegahan ini merangkumi pelbagai aktiviti, termasuk pendidikan kesihatan awam dan amalan kebersihan yang betul, yang dilaksanakan oleh profesional kesihatan dan kakitangan sokongan mereka. Memahami bagaimana sesuatu wabak merebak dan dinamikanya adalah dilihat sebagai matlamat utama oleh badan professional penjagaan kesihatan di seluruh dunia (Poalillo *et al.* 2010). Inisiatif yang menekankan model matematik sebagai alat penting untuk memahami perkembangan pelbagai penyakit berjangkit dibincangkan (Hossain *et al.* 2017; Hossen *et al.* 2019). Kaedah pencegahan patogen berjangkit boleh dikategorikan kepada pendekatan perubatan dan penjagaan diri, kedua-duanya bertujuan untuk mengurangkan kesan penyakit berjangkit ke atas populasi dan mencegah penyebaran kuman yang boleh menimbulkan ancaman kepada kesihatan awam (Liang *et al.* 2014). Amalan pencegahan diri asas termasuk kerap mencuci tangan, sanitasi yang betul, memakai sarung tangan dan topeng muka, dan mengamalkan etika pernafasan. Sebaliknya, langkah-langkah perubatan seperti ubat-ubatan, vaksinasi, dan pemahaman yang komprehensif tentang penularan penyakit secara dinamik adalah penting untuk mempromosikan kesihatan awam dalam masyarakat (Nordin *et al.* 2015; Rutala & Weber 2019).

Pada tahun 2009, pandemik influenza yang signifikan melanda seluruh dunia disebabkan oleh virus H1N1, dan juga sering disebut sebagai selesema babi (Dawood *et al.* 2012; Karim & Razali 2011). Varian influenza ini mempunyai unsur genetik daripada khinzir, burung dan manusia, menyumbang kepada komposisi genetik yang unik dan keupayaannya untuk menjangkiti manusia. Virus influenza H1N1 kebanyakannya menjangkiti golongan yang berisiko tinggi, termasuklah budak-budak kecil, warga emas dan individu yang mempunyai masalah kesihatan (Guo *et al.* 2022). Virus ini mudah menular melalui titisan pernafasan dan boleh menyebabkan gejala daripada penyakit pernafasan ringan hingga pneumonia yang teruk dan kegagalan pernafasan (Dawood *et al.* 2012). Komuniti kesihatan awam global bertindak balas terhadap wabak H1N1 2009 dengan kempen vaksinasi dan pengawasan yang ditingkatkan. Kempen kesedaran awam boleh membantu melambatkan penyebaran virus dan mengurangkan kesan yang dapat diperhatikan, seperti tekanan darah tinggi, kurang air dalam badan, dan obesiti, terhadap kesihatan keseluruhan populasi (Braga 2024; Johnson & Hariharan 2017). H1N1 masih lagi tersebar sebagai varian influenza bermusim walaupun pandemik awal telah reda. Ini menonjolkan keperluan berterusan untuk pengawasan influenza dan program vaksinasi untuk meminimumkan kesan virus terhadap kesihatan global. Pada bulan Jun 2009, Pertubuhan Kesihatan Sedunia (WHO) mengisytiharkan pandemik akibat wabak influenza A H1N1 yang meluas. Menurut laporan WHO pada 29 Disember 2009, pandemik tersebut telah menjejaskan lebih daripada 208 negara dan wilayah di seluruh dunia, mengakibatkan lebih daripada 150,000 kes disahkan dan sekurang-kurangnya 11,516 kematian di seluruh dunia. Amerika Syarikat melaporkan bilangan kematian tertinggi, terutamanya di kalangan individu berusia lebih 65 tahun yang mempunyai masalah kesihatan (Fowlkes *et al.* 2011).

Malaysia, bersama-sama dengan negara-negara lain di seluruh dunia, adalah salah satu daripada 208 negara yang diancam oleh pandemik H1N1 pada tahun 2009, seperti yang dilaporkan oleh WHO pada 15 Mei 2009. Virus ini tersebar dengan cepat di kalangan populasi yang berisiko tinggi, mengakibatkan pelbagai penyakit seperti influenza dan menyumbang kepada kematian 76 individu di Malaysia dalam masa empat bulan daripada wabak awal (Balraj *et al.* 2011). Tindakan kerajaan yang cepat adalah penting untuk mengurangkan penyebaran virus dan meminimumkan impaknya terhadap kesihatan awam. Ini termasuk mengenalpasti

pantas pesakit sumber yang berpotensi, pengawasan yang dipertingkatkan, kempen kesedaran awam, kempen vaksinasi yang disasarkan untuk populasi yang berisiko tinggi, dan penggunaan peralatan perlindungan diri yang bijaksana untuk mengurangkan penularan penyakit melalui langkah-langkah seperti kawalan pelawat, kebersihan tangan, etika pernafasan, dan amalan pencegahan lain. Tambahan pula, infrastruktur penjagaan kesihatan dan keupayaan tindak balas Malaysia telah diperbaiki secara berterusan untuk mengurus wabak dan ancaman penyakit berjangkit yang berpotensi secara berkesan. Dengan mengamalkan strategi yang komprehensif, Malaysia telah menunjukkan komitmennya untuk menjaga kesihatan dan kesejahteraan rakyatnya melalui Pusat Kawalan dan Pencegahan Penyakit (Hashim *et al.* 2021).

Epidemiologi merupakan satu kajian mengenai taburan dan punca berlakunya sesuatu kejadian yang berkaitan dengan kesihatan di dalam populasi. Epidemiologi melibatkan penyiasatan tentang corak, asal usul, dan hasil keadaan kesihatan dan penyakit dalam kalangan populasi. Pengetahuan ini kemudiannya digunakan untuk mengurus dan mengawal isu-isu kesihatan. Epidemiologi ialah bidang penyelidikan di mana pemodelan matematik digunakan secara meluas untuk mengkaji penyakit berjangkit (Woolhouse 2019). Pemodelan matematik boleh digunakan dalam menggambarkan dan meramalkan penyebaran penyakit dalam populasi melalui simulasi dinamik penyakit, mengenal pasti penentu penyakit, menilai parameter dan menilai strategi intervensi. Maklumat ini kemudian boleh digunakan oleh pemegang kepentingan kesihatan untuk membuat keputusan yang muktamad mengenai kesihatan awam. Dalam kajian ini, kaedah *Runge-Kutta* tertib keempat, digunakan untuk menganalisis penyebaran influenza H1N1 menerusi model petak SEIQRE (*Susceptible, Exposed, Infected, Quarantined, Recovered*).



Rajah 1: Visual virus influenza bermusim

Rajah 1 menunjukkan struktur untuk jenis influenza A dan B dan klasifikasi kedua-dua jenis virus influenza ini. Ia termasuklah visual zarah virus, menyerlahkan ciri utama seperti selaput lemak, permukaan glikoprotein (*hemagglutinin* dan *neuraminidase*), dan genom virus. Selain itu, rajah virus influenza A dan B juga termasuk klasifikasi mereka berdasarkan sifat antigenik, variasi genetik, dan subjenis. Ia berfungsi sebagai bantuan visual untuk memahami perbezaan

antara dua virus ini, cara penularannya, dan implikasinya terhadap kesihatan awam dan strategi vaksinasi.

Berdasarkan kajian literatur dan data sejarah yang sedia ada, kajian ini bertujuan untuk membangunkan dan menilai kuarantin sebagai strategi untuk mengurangkan penyebaran influenza H1N1 dan mengurus wabak. Selain itu, kajian juga bertujuan untuk menganalisis model secara teori dengan mengkaji kewujudan, kepastian, dan keterbatasan penyelesaiannya, serta mengira nombor reproduksi asas. Kajian ini juga termasuk analisis bifurkasi keseimbangan bebas penyakit dan endemik, mengkaji kestabilan tempatan dan globalnya. Tambahan pula, analisis satah fasa digunakan untuk menyiasat interaksi dalam model petak tunggal dan berbilang.

2. Model SEIQR

Motivasi untuk menggunakan model SEIQR (*Susceptible-Exposed-Infectious-Quarantined-Recovered*) di dalam kajian ini adalah kerana keupayaannya untuk menyalin peringkat jangkitan yang terperinci, termasuk tempoh pendedahan dan kuarantin, yang sering diabaikan oleh model yang lebih mudah seperti model SIR atau SIA (*Susceptible-Infectious-Recovered*) yang telah dilakukan oleh Emmanuel *et al.* (2024). Walaupun model SIR memberikan pemahaman asas mengenai dinamik wabak, ia mempunyai keterbatasan dalam keupayaannya untuk mewakili dengan tepat penyakit-penyakit yang mempunyai tempoh tanpa gejala, langkah-langkah kuarantin, atau kemungkinan jangkitan semula. Model SIR menganggap peralihan langsung dari kerentanan kepada jangkitan dan pemulihan, mengabaikan peringkat pertengahan pendedahan dan kesan campur tangan kesihatan awam.

Model SIR terhad oleh ketidakmampuannya untuk mempertimbangkan tempoh tanpa gejala, memasukkan langkah-langkah kuarantin, atau mengambil kira kemungkinan jangkitan semula. Keterbatasan ini amat relevan untuk penyakit seperti influenza dan COVID-19, di mana individu mungkin terdedah tetapi tanpa gejala, kuarantin adalah penting untuk pencegahan, dan imuniti boleh berkurangan dari masa ke masa.

Para penyelidik telah secara beransur-ansur memperbaiki model SIR untuk mengatasi keterbatasannya. Model SEIR (*Susceptible-Exposed-Infectious-Recovered*) telah dibangunkan untuk memasukkan fasa tanpa gejala, di mana individu terdedah tetapi belum berjangkit. Perubahan ini meningkatkan kesesuaiannya untuk penyakit yang dicirikan oleh tempoh tanpa gejala yang ketara antara pendedahan dan manifestasi gejala, seperti influenza atau campak.

Perkembangan selanjutnya menghasilkan model SEIQR (*Susceptible-Exposed-Infectious-Quarantined-Recovered*) yang memasukkan petak kuarantin untuk menilai kesan mengasingkan individu berjangkit. Pengembangan ini amat bermanfaat untuk mensimulasikan penularan penyakit di mana pengasingan adalah penting untuk menguruskan wabak, seperti semasa pandemik. Model SEIQR menawarkan gambaran yang lebih tepat tentang inisiatif kesihatan awam dengan mengintegrasikan langkah-langkah kuarantin.

Model-model terkini telah berkembang lebih lanjut untuk memasukkan petak bagi individu yang telah divaksin, berkurangnya imuniti, dan kesan perubahan tingkah laku yang disebabkan oleh ketakutan dalam komuniti (Pornphol *et al.* 2024). Model-model tertentu, seperti model SEIQR (*Susceptible-Exposed-Infectious-Quarantined-Recovered-Reinfected*), mengintegrasikan mekanisme untuk jangkitan semula, yang amat penting bagi penyakit dengan imuniti yang tidak kekal, seperti influenza bermusim.

Perkembangan ini menunjukkan usaha berterusan untuk menyempurnakan model epidemiologi dan memberikan gambaran yang lebih tepat tentang dinamik penyakit dunia sebenar, membawa kepada ramalan yang lebih baik dan intervensi kesihatan awam yang lebih berkesan. Model SEIQR, khususnya, digunakan secara meluas kerana keupayaannya untuk

menangkap peringkat kompleks perkembangan penyakit, memasukkan langkah-langkah kuarantin, dan memaklumkan strategi kawalan penyakit yang berkesan.

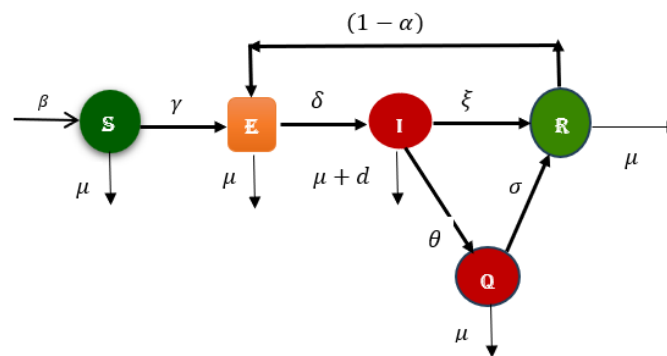
Salah satu model petak yang paling banyak digunakan dalam mengkaji penularan penyakit berjangkit dalam populasi adalah model SIR (*Susceptible-Infectious-Recovered*) (Cooper *et al.* 2020). Di dalam kajian ini, lima petak digunakan untuk mencipta model ramalan untuk menganalisis dinamik influenza. Populasi dibahagikan kepada lima kategori: mudah terjangkit (*susceptible*, *S*), terdedah (*exposed*, *E*), berjangkit (*infectious*, *I*), dikuarantin (*quarantined*, *Q*), dan pulih (*recovered*, *R*). Jumlah populasi (*N*) dianggap tetap, dengan μ mewakili kadar kematian semula jadi, sistem (1) adalah seperti dibawah:

$$\begin{aligned} S' &= \beta - \gamma SI - \mu S, \\ E' &= \gamma SI + (1 - \alpha)\gamma IR - (\mu + \delta)E, \\ I' &= \delta E - (\mu + \xi + \theta + d)I, \\ Q' &= \theta I - (\mu + \sigma)Q, \\ R' &= \xi I + \sigma Q - (\mu + (1 - \alpha)\gamma I)R. \end{aligned} \quad (1)$$

Kadar pengambilan dilambangkan sebagai β , dan daya jangkitan dimodelkan oleh $f = \gamma I$, dengan γ ialah kadar individu mudah terjangkit terdedah kepada jangkitan. Individu yang terdedah menjadi berjangkit dengan kadar δ , pulih daripada jangkitan pada kadar ξ , dan mati akibat jangkitan pada kadar d . Diandaikan bahawa individu yang pulih secara beransur-ansur kehilangan imuniti mereka pada kadar $(1 - \alpha)\gamma$, dengan $0 < \alpha < 1$, yang mencerminkan kemungkinan imuniti terhadap influenza mungkin berkurang dari masa ke masa, menjadikan individu terdedah kepada jangkitan semula. Individu yang berjangkit dikuarantin pada kadar θ dan dilepaskan dari kuarantin pada kadar σ . Keadaan awal sub-populasi ialah

$$S(0) = S_0 \geq 0, E_0 \geq 0, I_0 \geq 0, Q_0 \geq 0, R_0 \geq 0, \text{ untuk masa depan } (t \rightarrow \infty) \quad (2)$$

Semua parameter model diandaikan positif. Rajah 2 menunjukkan dinamik penularan penyakit pada model SEIQRE manakala Jadual 1 menerangkan keterangan terperinci tentang parameter model.



Rajah 2: Dinamik penularan penyakit pada model SEIQRE

Jadual 1: Keterangan terperinci tentang parameter model

Nombor	Parameter	Huraian	Nilai	Sumber
1	β	Kadar pengambilan	$5 \times 10^2 \text{ minggu}^{-1}$	Mohammad (2025)
2	μ	Kadar kematian semula jadi	$5 \times 10^{-2} \text{ minggu}^{-1}$	Mohammad (2025)
3	d	Kadar kematian akibat penyakit (influenza)	0.3 minggu^{-1}	Mohammad (2025)
4	γ	Kadar kontak	0.75 minggu^{-1}	-
6	θ	Kadar individu berjangkit dikuarantin	0.4 minggu^{-1}	Diandaikan
7	α	Faktor perskalaan untuk kadar kitaran semula	-	-
8	$(1 - \alpha)\gamma$	Kadar jangkitan semula	-	-
9	ξ	Kadar pulih daripada jangkitan	0.65 minggu^{-1}	Mohammad (2025)
10	σ	Kadar yang berjangkit dilepaskan dari kuarantin	-	-
11	δ	Kadar peralihan dari E kepada I	0.75 minggu^{-1}	Mohammad (2025)
12	N	Jumlah populasi	520	Mohammad (2025)

3. Sifat-sifat Asas Model SEIQRE

Perbincangan sifat-sifat asas model yang dibentangkan adalah seperti yang berikutnya.

3.1. Rantau yang tidak berubah

Lema 1. Keadaan awal penyelesaian sistem (1) terkandung dalam rantau $\zeta \in \mathfrak{R}_+^5$ yang ditakrifkan sebagai

$$\zeta = \{(S, E, I, Q, R) \in \mathfrak{R}^5 : 0 \leq N \leq \frac{\beta}{\mu}\}. \quad (3)$$

Bukti. Biar N ialah jumlah sub-populasi. Iaitu $N = S + E + I + Q + R$, kemudian

$$\frac{dN}{dt} = \frac{dS}{dt} + \frac{dE}{dt} + \frac{dI}{dt} + \frac{dQ}{dt} + \frac{dR}{dt}, \quad (4)$$

$$\frac{dN}{dt} = \beta - \mu N - \mu d. \quad (5)$$

Bila tiada kematian akibat daripada virus influenza, persamaan tersebut diringkaskan menjadi salah satu ketaksamaan.

$$\frac{dN}{dt} \leq \beta - \mu N. \quad (6)$$

Menyelesaikan ketaksamaan ini, memberikan

$$\zeta = \{(S, E, I, Q, R) \in \mathfrak{R}^5 : 0 \leq N \leq \frac{\beta}{\mu}\}. \quad (7)$$

Oleh itu, jika S_0, E_0, I_0, Q_0 dan R_0 terdapat di dalam ζ maka $S(t), E(t), I(t), Q(t)$ dan $R(t)$ akan kekal dalam ζ apabila $t \rightarrow \infty$. Seperti juga jika keadaan awal bermula di luar ζ , maka penyelesaian akan menghampiri ζ apabila $t \rightarrow \infty$. Ini melengkapkan bukti teorem. $\square$

3.2. Penyelesaian yang positif

Teorem 1. *Biar $D = (S, E, I, Q, R) \in \mathfrak{R}^5 : S_0 > 0, E_0 > 0, I_0 > 0, Q_0 > 0, R_0 > 0$; Maka semua penyelesaian $\{S, E, I, Q, R\}$ adalah positif untuk $t \geq 0$.*

Bukti. Pertimbangkan bentuk setiap persamaan, untuk populasi yang mudah terjangkau S :

$$S' = \beta - \gamma Si - \mu S. \quad (8)$$

Istilah β mewakili kadar kelahiran tetap, yang positif, istilah $-\gamma Si$ mewakili kadar jangkitan dan kerana $S, I \geq 0$, ia tidak boleh menyebabkan S menjadi negatif. Istilah $-\mu S$ mewakili kematian semula jadi, yang mengurangkan nilai S tetapi tidak menyebabkannya menjadi negatif melainkan jika S sudah sifar. Begitu juga, untuk populasi yang terdedah E :

$$E' = \gamma SI + (1 - \alpha)\gamma IR - (\mu + \delta)E. \quad (9)$$

Istilah γSI adalah positif, kerana kedua-dua S dan I adalah bukan negatif. Istilah $-(\mu + \delta)E$ adalah negatif dan hanya mengurangkan E , tetapi tidak menolaknya di bawah sifar kecuali E pada awalnya sifar.

Dengan menggunakan teori perbandingan untuk persamaan pembezaan, kita boleh menunjukkan bahawa jika nilai awal $\{S_0, E_0, I_0, Q_0, R_0\}$ adalah bukan negatif, maka penyelesaian kekal bukan negatif untuk semua $t \geq 0$. Alasannya adalah tiada satu pun daripada persamaan perbezaan termasuk istilah yang boleh memacu petak kepada nilai negatif melainkan keadaan awal adalah negatif dimana ini adalah mustahil secara biologi.

Kajian juga mengesahkan bahawa apabila petak menghampiri sempadan (iaitu, menghampiri sifar), aliran populasi ke dalam petak tersebut kekal negatif. Sebagai contoh:

Jika $S \rightarrow 0, \frac{dS}{dt}$ menjadi β , memastikan bahawa S akan kekal bukan negatif.

Begitu juga, apabila $E, I, Q, R \rightarrow 0$, persamaan adalah pasti bahawa mereka tidak akan menjadi negatif. Selesaikan persamaan ini dengan menggunakan keadaan awal menghasilkan

$$S(t) \geq S_0 e^{-\mu t} \geq 0. \quad (10)$$

Demikian juga, daripada persamaan (3) – (6), kita mendapat

$$\begin{aligned} E(t) &\geq E_0 e^{-(\mu+\delta)t} \geq 0, \\ I(t) &\geq I_0 e^{-(\mu+\xi+\theta+d)t} \geq 0, \\ Q(t) &\geq Q_0 e^{-(\mu+\sigma)t} \geq 0, \\ R(t) &\geq R_0 e^{-\mu t} \geq 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Ini melengkapkan bukti teorem tersebut. Maka, penyelesaian model adalah sentiasa positif dari masa ke masa, $(t \rightarrow \infty)$. $\square$

3.3. Titik keseimbangan bebas jangkitan

Keseimbangan bebas jangkitan (*infections-free equilibrium*) menyatakan bahawa E_0 pada model SEIQRE (1) boleh didapati dengan menyamakan bahagian kanan persamaan kepada sifar dan menyelesaikan untuk S dengan membiarkan $E = I = Q = R = 0$. Daripada persamaan pertama, menghasilkan

$$S = \frac{\beta}{\mu}, \quad (12)$$

$$E_0 = \left(\frac{\beta}{\mu}, 0, 0, 0, 0 \right). \quad (13)$$

3.4. Nombor reproduksi ($\mathcal{R}_{inf}$) yang efektif

Hanya petak I (Infected), E (Exposed) dan Q (Quarantined) menyumbang kepada jangkitan. Individu yang mudah terjangkit, S , berisiko dijangkiti oleh individu yang dijangkiti, terdedah, dan dikurung. Kami menganggap bahawa petak I , E , dan Q menyumbang kepada jangkitan pada kadar yang berbeza. Memperkenalkan kadar-kadar penghantaran ini: γI untuk petak berjangkit, γE untuk petak terdedah E jangkitan. Nombor reproduksi yang efektif dikira menggunakan kaedah matriks generasi seterusnya (Razali & Karim 2013). Biar F mewakili matriks jangkitan baharu, dan biar V mewakili matriks istilah peralihan, maka:

$$F = \begin{pmatrix} \gamma SI + (1 - \alpha)\gamma IR \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (14)$$

$$V = \begin{pmatrix} (\mu + \delta)E \\ -\delta E + (\mu + \xi + \theta + d)I \\ -\theta I + (\mu + \sigma)Q \end{pmatrix}.$$

Oleh itu, oleh kerana $S = \frac{\beta}{\mu}$ pada persamaan (12), matriks generasi yang seterusnya adalah

$$F = \left(\frac{df_1}{dE} \quad \frac{df_1}{dI} \quad \frac{df_1}{dQ} \right) \bigg|_{E_0} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{\gamma\beta}{\mu} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (15)$$

dan

$$V = \left(\frac{dv_1}{dE} \quad \frac{dv_1}{dI} \quad \frac{dv_1}{dQ} \right) \bigg|_{E_0} = \begin{pmatrix} (\mu + \delta) & 0 & 0 \\ -\delta & (\mu + \xi + \theta + d) & 0 \\ 0 & -\theta & (\mu + \sigma) \end{pmatrix}, \quad (16)$$

$$FV^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{\beta\delta\gamma}{\mu(\mu+\delta)(\xi+\mu+\theta+d)} & \frac{\beta\gamma}{\mu(\xi+\mu+\theta+d)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (17)$$

Nombor reproduksi asas $\mathfrak{R}_{inf}$ diperoleh dengan mengira nilai eigen matriks generasi seterusnya. Menyelesaikan persamaan ciri dari : Persamaan ciri matriks diberikan oleh

$$\det(FV^{-1} - \lambda I) = 0. \quad (18)$$

Selepas dipermudahkan,

$$\lambda^3 - \frac{\beta\delta\gamma}{\mu(\mu+\delta)(\xi+\mu+\theta+d)}\lambda^2 = 0, \quad (19)$$

dengan penyelesaian $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$ dan $\lambda_3 = \frac{\beta\delta\gamma}{\mu(\mu+\delta)(\xi+\mu+\theta+d)}$.

Oleh itu, kajian mendapati bahawa nilai iegen terbesar (yang diwakili $\mathfrak{R}_{inf}$) adalah kira-kira λ_3 . Oleh itu, nombor reproduksi asas ialah

$$\mathfrak{R}_{inf} = \frac{\beta\delta\gamma}{\mu(\mu+\delta)(\xi+\mu+\theta+d)}. \quad (20)$$

Salah satu idea utama epidemiologi ialah nombor reproduktif asas $\mathfrak{R}_{inf}$. Ia mewakili purata bilangan sekunder yang boleh dihasilkan oleh seorang individu yang dijangkiti dalam kumpulan yang mudah terjangkit. Dengan $\mathfrak{R}_{inf}$ lebih besar daripada 1, setiap individu yang dijangkiti menyebarkan jangkitan kepada beberapa orang, berpotensi menyebabkan wabak. Jika $\mathfrak{R}_{inf} = 1$, individu yang dijangkiti menjangkiti tepat satu individu tambahan secara purata, tiada pertumbuhan atau penurunan populasi dijangka untuk keadaan tersebut dan akhirnya jika $\mathfrak{R}_{inf}$ adalah kurang daripada 1, bermakna setiap individu yang dijangkiti menjangkiti kurang daripada satu orang lain, jadi jangkitan akan mati.

4. Indeks Sensitiviti dan Analisis Parameter

Analisis sensitiviti parameter model telah dijalankan menggunakan nombor reproduksi asas untuk menilai impaknya terhadap aktiviti pengesanan. Analisis ini membantu mengenal pasti parameter kawalan yang paling berkesan untuk mengurangkan nilai $\mathfrak{R}_{inf}$ dan memberi maklumat kepada pembangunan strategi intervensi yang optimum untuk menghentikan penyebaran jangkitan. Indeks sensitiviti ke hadapan yang dinormalkan bagi nombor reproduksi berkenaan dengan pembolehubah-pembolehubah ini telah dikira. Indeks sensitiviti ke hadapan yang dinormalkan kuantifikasi hubungan antara perubahan dalam nombor reproduksi asas dan perubahan dalam parameter model. Formula indeks sensitiviti ke hadapan yang dinormalkan, ialah (Karim & Razali 2011; Rustum & Al-Temimi 2022):

$$\Delta_{\theta}^{\mathfrak{R}_{inf}} = \frac{d\mathfrak{R}_{inf}}{d\theta} X \frac{\theta}{\mathfrak{R}_{inf}}. \quad (21)$$

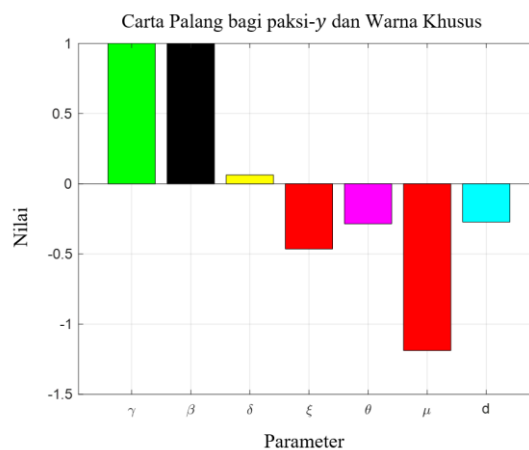
Indeks sensitiviti yang dikira bagi parameter model dibentangkan dalam Jadual 2.

Jadual 2: Indeks sensitiviti nombor reproduksi asas berkenaan dengan parameter model.

Parameter	Hubungan antara parameter lain	Indeks	Tanda
δ	$\frac{\mu}{(\mu+\delta)} > 0$	0.063	+ve
γ	1	1.000	+ve
β	1	1.000	+ve
ξ	$\frac{-\xi}{(\xi+\mu+\theta+d)} < 0$	-0.464	-ve
θ	$\frac{-\theta}{(\xi+\mu+\theta+d)} < 0$	-0.285	-ve
μ	$\frac{-[(\mu+\delta)(\xi+\mu+\theta+d)+\mu(\xi+\mu+\theta+d)+\mu(\mu+\delta)]}{(\mu+\delta)(\xi+\mu+\theta+d)} < 0$	-1.188	-ve
d	$\frac{-d}{(\xi+\mu+\theta+d)} < 0$	-0.272	-ve

4.1. Tafsiran indeks sensitiviti parameter

Jadual 2 membentangkan indeks sensitiviti parameter model. Parameter γ, β dan δ secara signifikan mempengaruhi penyebaran jangkitan kerana peningkatan dalam nilai-nilai ini membawa kepada peningkatan dalam purata bilangan jangkitan sekunder. Untuk meminimumkan jangkitan, adalah perlu untuk mengurangkan parameter-parameter ini. Parameter kritikal tambahan untuk mengawal jangkitan adalah termasuk kadar pulih ξ , kadar kuarantin θ , kadar kematian semula jadi μ , dan kadar kematian akibat dari jangkitan d . Kesemua parameter ini mempunyai indeks sensitiviti negatif. Rajah 3 membentangkan carta palang indeks sensitiviti parameter, menunjukkan bahawa parameter dengan palang menunjuk ke atas harus dikurangkan, manakala yang mempunyai palang menunjuk ke bawah harus ditingkatkan. Bagaimanapun, tidaklah mungkin secara biologi atau etika untuk meningkatkan kadar kematian semula jadi atau kadar kematian berkaitan jangkitan untuk menghapuskan jangkitan, kerana objektif utama adalah untuk menyelamatkan nyawa, bukan menyebabkan kerugian selanjutnya.



Rajah 3: Carta palang indeks sensitiviti

4.2. Kestabilan tempatan analisis titik keseimbangan bebas jangkitan

Dalam pemodelan matematik, kestabilan tempatan berkaitan dengan tingkah laku sistem berdekatan dengan titik keseimbangan, di mana pembolehubah kekal tidak berubah sepanjang masa. Untuk menilai kestabilan tempatan, kita menghasilkan persamaan linear sistem pada titik keseimbangan dan menilai nilai eigen matriks Jacobian. Pada titik keseimbangan (S^* , E^* , I^* , Q^* , R^*), apabila semua kadar perubahan sama dengan sifar, kita memperoleh matriks Jacobian dengan mengira kadar perubahan separa setiap persamaan berkenaan setiap pembolehubah dan menilai pada titik ini. Nilai eigen Jacobian adalah penting dalam menilai kestabilan jangka panjang sistem.

Kriteria *Routh Hurwitz* menetapkan bahawa semua punca polynomial mempunyai komponen sebenar negatif jika dan hanya jika pekali adalah positif dan determinan matriks $HG > 0$ untuk $i = 0, 1, 2, 3, 4$. Oleh itu,

Teorem 2. *Titik keseimbangan bebas jangkitan adalah stabil apabila $\mathcal{R}_{inf} < 1$ dan tidak stabil apabila $\mathcal{R}_{inf} > 1$.*

Bukti. Untuk membuktikan kestabilan tempatan titik keseimbangan bebas jangkitan, matriks *Jacobian* sistem (1) telah dinilai pada titik keseimbangan bebas jangkitan E_0 . Matriks *Jacobian* untuk sistem persamaan (1) pada titik keseimbangan bebas jangkitan jangkitan menjadi

$$J(E_0) = \begin{pmatrix} -\mu & 0 & -\frac{\beta\gamma}{\mu} & 0 & 0 \\ 0 & -(\mu + \delta) & \frac{\beta\gamma}{\mu} & 0 & 0 \\ 0 & \delta & -(\mu + \xi + \theta + d) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \theta & -(\mu + \sigma) & 0 \\ 0 & 0 & \xi & \theta & -\mu \end{pmatrix}. \quad (22)$$

Setelah mengira persamaan ciri, nilai λ ditentukan sebagai

$$\lambda_1 = \lambda_2 = -\mu, \quad \lambda_3 = -(\mu + \sigma). \quad (23)$$

Dua nilai eigen yang selebihnya adalah punca persamaan kuadratik, yang dipermudahkan kepada

$$\mu\lambda^2 + \mu(d + \theta + \xi + 2\mu + \delta)\lambda + \mu(\mu + \delta)(\xi + \mu + \theta + d)(1 - \mathcal{R}_{inf}) = 0, \quad (24)$$

yang juga boleh diwakili sebagai

$$\mathcal{H}_0\lambda^2 + \mathcal{H}_1\lambda + \mathcal{H}_2 = 0, \quad (25)$$

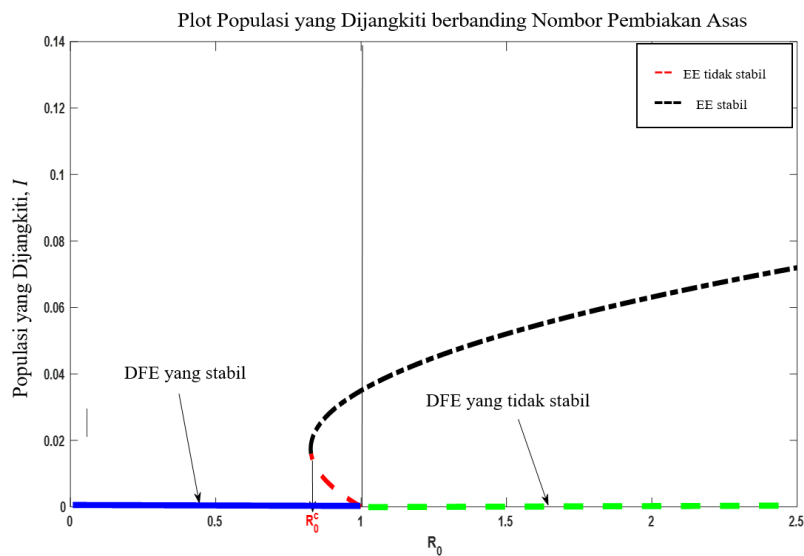
dengan

$$\begin{aligned} \mathcal{H}_0 &= \mu, \\ \mathcal{H}_1 &= \mu(d + \theta + \xi + 2\mu + \delta), \\ \mathcal{H}_2 &= \mu(1 - \mathcal{R}_{inf})(\mu + \delta)(\xi + \mu + \theta + d). \end{aligned}$$

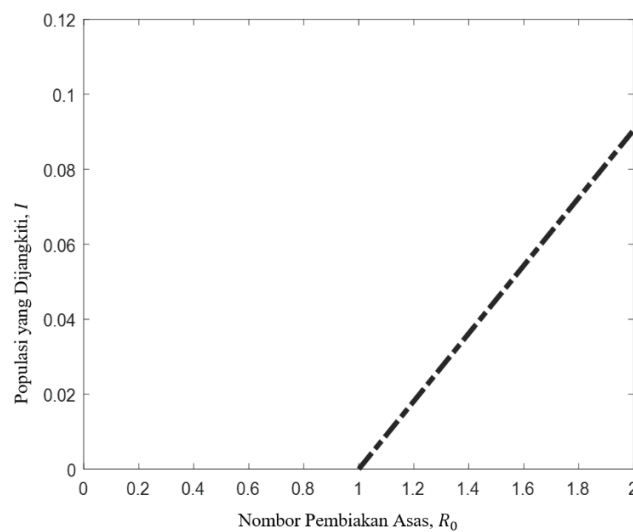
Berdasarkan kriteria *Routh-Hurwitz*, semua nilai eigen matriks mempunyai bahagian nyata negatif. Oleh itu, sistem persamaan, termasuk persamaan ciri yang disebutkan di atas, adalah stabil secara tempatan.

4.3. Bifurkasi

Model ini mengalami bifurkasi dari terbalik ke hadapan apabila faktor skala untuk jangkitan semula meningkat daripada 0 hingga 1, seperti yang ditunjukkan pada Rajah 4 dan 5. Ini adalah kerana hubungan $(1 - \delta) \gamma = F$ dimana $\partial \alpha / \partial F = -1/\gamma$, menunjukkan penurunan dalam faktor skala apabila kadar jangkitan semula meningkat. Meningkatkan faktor skala membawa kepada penurunan kadar jangkitan semula, dan sebaliknya.



Rajah 4: Bifurkasi terbalik



Rajah 5: Bifurkasi hadapan

5. Kaedah Runge-Kutta Tertib Keempat

Kaedah *Runge-Kutta* tertib keempat (RK4) ialah kaedah berangka yang banyak digunakan untuk menyelesaikan persamaan pembezaan biasa, terutamanya apabila penyelesaian analitik atau bentuk tertutup sukar atau mustahil untuk diperoleh (Cartwright & Piro 1992). Kaedah ini secara cekap menghampiri penyelesaian dengan bermula dari keadaan awal yang diketahui dan secara berulang-ulang menyempurnakan penyelesaian melalui empat anggaran kecerunan berwajaran pada setiap langkah. Kaedah ini memastikan ketepatan tinggi antara titik berturut-turut (Rustum & Al-Temimi 2022; Sathasivam *et al.* 2024). Kaedah *Runge-Kutta* tertib keempat (RK4) boleh digunakan untuk menyelesaikan persamaan pembezaan biasa (ODE) apabila keadaan awal $y(x_0) = y_0$ dan persamaan yang mengawal, $\frac{dy}{dx} = f(x, y)$ yang mewakili senario sebenar kehidupan diketahui. Empat anggaran berwajaran bagi cerun penyelesaian pada pelbagai titik pertengahan dalam setiap saiz langkah $(x_{i+1} - x_i)$ untuk meningkatkan ketepatan adalah dikira dengan:

$$\begin{aligned} K_1 &= f(x_i, y_i), \\ K_2 &= f\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{hK_1}{2}\right), \\ K_3 &= f\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{hK_2}{2}\right), \\ K_4 &= f(x_i + h, y_i + hK_3). \end{aligned} \quad (26)$$

Penyelesaian yang berjaya pada setiap fungsi peringkat, K_i dikira menggunakan formula dalam persamaan (23) di bawah

$$y_{i+1} = y_i + \frac{h}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4), \quad (27)$$

dimana h adalah saiz langkah.

Persamaan (23) boleh dibuat diubahsuai untuk disesuaikan dengan persamaan petak dalam persamaan (1), dengan mengubahsuai setiap petak seperti berikut:

Bagi populasi yang mudah terdedah,

$$S_{i+1} = S_i + \frac{h}{6}(K_1^S + 2K_2^S + 2K_3^S + K_4^S), \quad (28)$$

dimana

$$\begin{aligned} K_1^S &= \beta - \gamma S(i)I(i) - \mu S(i), \\ K_2^S &= \beta - \gamma \left(I(i) + \frac{hK_1^S}{2}\right) \left(S(i) + \frac{hK_1^S}{2}\right) - \mu \left(S(i) + \frac{hK_1^S}{2}\right), \\ K_3^S &= \beta - \gamma \left(I(i) + \frac{hK_2^S}{2}\right) \left(S(i) + \frac{hK_2^S}{2}\right) - \mu \left(S(i) + \frac{hK_2^S}{2}\right), \\ K_4^S &= \beta - \gamma (I(i) + hK_3^S)(S(i) + hK_3^S) - \mu (S(i) + hK_3^S). \end{aligned} \quad (29)$$

Keadaan awal bagi sistem, seperti yang ditakrifkan oleh persamaan (27) sehingga (28), telah digunakan dalam kaedah *Runge-Kutta* tertib keempat, iaitu $x_0 = t_0, y_0 = S_0, I_0, R_0$ dan $x_1 = t_1, y_1 = \{S_1, E_1, I_1, Q_1, R_1\}$. Langkah yang sama telah digunakan kepada petak-petak

selebihnya E , I , Q , dan R untuk mengekalkan konsistensi dalam analisis, dan $\frac{dW}{dt} = f(t_i, S_i, E_i, I_i, Q_i, R_i)$, $W = S, E, I, Q, R$ mewakili persamaan (1).

Persamaan (28) dan (29) adalah persamaan yang diperlukan yang perlu diselesaikan secara berulang untuk menghampiri penyelesaian pada titik-titik diskret dalam masa. Urutan penyelesaian ini mewakili dinamik H1N1. Kaedah Runge-Kutta tertib ke-4 adalah sangat mudah untuk dilaksanakan, dan ia dianggap sebagai skema berangka yang cekap dan tepat untuk menyelesaikan sistem persamaan pembezaan. Ia dikenali kerana ketepatan yang lebih tinggi apabila dibandingkan dengan kaedah peringkat rendah. Ini menjadikannya cekap untuk menyelesaikan sistem kompleks persamaan pembezaan, di mana ketepatan adalah penting. Kelenturan kaedah ini membolehkannya mengendalikan pelbagai jenis persamaan pembezaan, termasuk persamaan pembezaan biasa (ODE) dan persamaan pembezaan separa. Beberapa kajian telah melaporkan bahawa kaedah Runge-Kutta (RK4) menghasilkan keputusan yang agak tepat, dan telah digunakan dalam pelbagai aplikasi dalam pemodelan matematik, kejuruteraan, dan sains (Ashgi 2021; Hossen *et al.* 2019; Sathasivam *et al.* 2024; Tan & Zheng 2012).

5.1. Algoritma untuk Model SEIQRE menggunakan Kaedah RK4

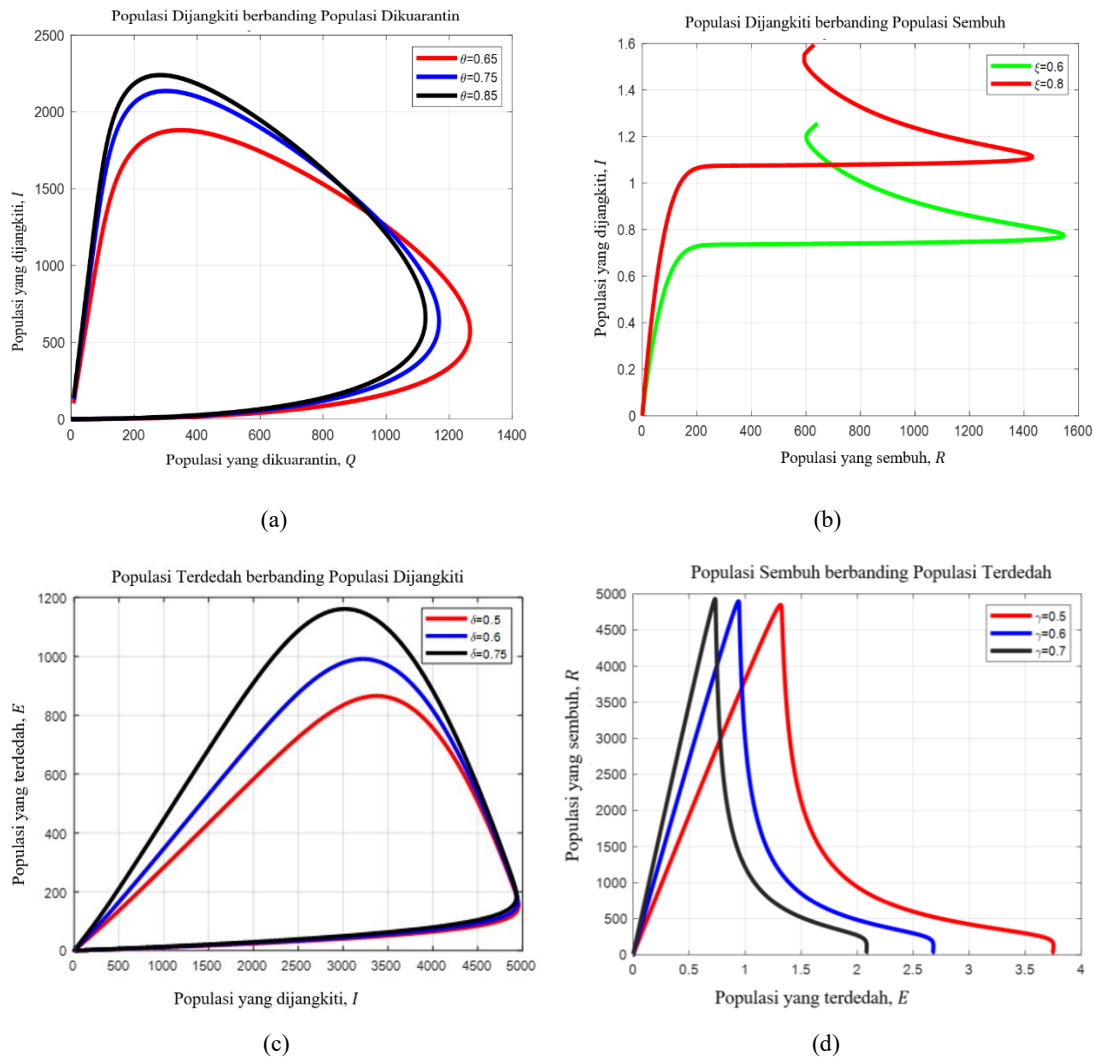
1. Pengaturan awal parameter/petak: $S(0), E(0), I(0), Q(0), R(0)$ dengan masa $t = 0$.
2. Ketika $t \leq T$ (masa akhir), ulang langkah-langkah berikut:
 - i. Kira K_1, K_2, K_3 dan K_4 untuk setiap petak, seperti untuk S ,
 - ii. $S_{i+1} = S_i + \frac{h}{6} (K_1^S + 2K_2^S + 2K_3^S + K_4^S)$.
 - iii. Kemaskini semua petak menggunakan RK4 untuk E, I, Q , dan R .
 - iv. Tambahkan masa mengikut saiz langkah
3. Lukis graf evolusi masa S, E, I, Q , dan R mengikut masa t , menunjukkan dinamik wabak H1N1.

6. Graf Dapatan Kajian

Kajian ini membangunkan model matematik untuk menyiasat corak penularan influenza, berfokuskan kepada kemungkinan jangkitan semula, iaitu model ini mengambil kira individu yang pulih yang boleh dijangkiti semula selepas terdedah kepada virus kemudiannya, di bawah tetapan parameter tertentu. Penyelidikan model mengenal pasti fenomena bifurkasi terbalik. Hasil kajian mendapati bahawa meningkatkan faktor skala jangkitan semula mengalihkan model daripada bifurkasi terbalik kepada bifurkasi ke hadapan, mengurangkan populasi yang dijangkiti dari masa ke masa. Rajah 4 menunjukkan bahawa untuk mencapai keadaan bebas influenza, nombor reproduksi kritikal $\mathcal{R}_{inf}$, perlu jauh lebih rendah daripada satu.

Rajah 6(a) menggambarkan kesan kadar kuarantin terhadap populasi yang dijangkiti dari masa ke masa. Apabila kadar kuarantin meningkat daripada 0 kepada 1, kajian mengesan peningkatan awal dalam populasi yang dijangkiti. Hasil paradoks ini menunjukkan bahawa hanya meningkatkan langkah-langkah kuarantin tanpa mempertimbangkan aspek tambahan mungkin tidak dapat mengurangkan jangkitan dengan segera. Punca mungkin kelewatan dalam melaksanakan langkah-langkah kuarantin yang sesuai atau kemungkinan kemunduran dalam pemulihan individu dalam kuarantin. Kesan jangka panjang prosedur kuarantin yang dipertingkatkan adalah penting. Kadar kuarantin yang meningkat dapat mengurangkan interaksi antara orang sakit dan orang yang mudah terjangkit, dengan itu menurunkan kadar

penghantaran keseluruhan. Akibatnya, walaupun kesan pertama mungkin menunjukkan peningkatan jangkitan, langkah-langkah kuarantin yang berpanjangan dijangka akan mengakibatkan pengurangan populasi yang dijangkiti dari masa ke masa, menggariskan kepentingan pelaksanaan strategi kesihatan awam yang berterusan dan segera.



Rajah 6: Plot populasi yang dijangkiti mengikut masa

Rajah 6(b) mengkaji korelasi antara kadar pemulihan dan populasi yang dijangkiti. Apabila kadar pemulihan meningkat, kuantiti orang yang terjejas menurun dengan ketara. Hubungan ini menunjukkan kepentingan campur tangan perubatan dan keberkesanan rawatan dalam mengawal wabak. Kadar pemulihan yang tinggi menunjukkan bahawa individu kembali ke keadaan mudah terjangkit dengan lebih cepat, oleh itu mengurangkan kemungkinan kitaran penghantaran yang berpanjangan. Jika kadar pemulihan rendah, tempoh jangkitan meningkat, mengakibatkan kebarangkalian penyebaran yang lebih tinggi. Ini menggariskan elemen penting strategi kesihatan awam: melabur dalam infrastruktur penjagaan kesihatan dan alternatif rawatan dapat mempengaruhi pengurusan penghantaran influenza secara signifikan.

Rajah 6(c) menunjukkan bahawa apabila kadar jangkitan meningkat, begitu juga bilangan individu yang dijangkiti. Hasil ini adalah dijangka dan menekankan keperluan untuk intervensi kesihatan awam yang bertujuan untuk mengehadkan pendedahan kepada virus. Hubungan di sini adalah langsung; peningkatan kadar di mana individu yang terdedah menjadi dijangkiti membawa kepada kadar penyebaran yang lebih tinggi. Penemuan ini mengukuhkan kepentingan langkah-langkah pencegahan, seperti vaksinasi dan kempen kesedaran awam, untuk meminimumkan pendedahan kepada virus influenza.

Untuk memahami dinamik keseluruhan penghantaran influenza, seseorang mesti memahami interaksi antara komponen-komponen ini. Rajah 6(a), 6(b), dan 6(c) menunjukkan model yang membantu menjelaskan bagaimana perubahan dalam satu bahagian sistem dapat memberi kesan besar terhadap bahagian lain. Sebagai contoh, meningkatkan kadar kuarantin mempunyai kesan yang meluas; ia mempengaruhi populasi yang sakit secara langsung, tetapi ia juga mempunyai keupayaan untuk mempengaruhi kadar pemulihan, dinamika jangkitan, dan jumlah keseluruhan kes baharu.

Apabila menilai kesan kumulatif langkah-langkah kuarantin yang dipertingkatkan, kita boleh menjangkakan interaksi pelbagai aspek di antara semua elemen model: Populasi yang mudah terjangkit (S) mungkin melihat peningkatan yang perlahan dalam jangkitan akibat langkah-langkah kuarantin yang mengurangkan kadar kontak, berpotensi membawa kepada kestabilan atau pengurangan dari masa ke masa. Populasi yang terdedah (E) mungkin meningkat pada awalnya dengan peningkatan penyakit; namun, dengan langkah-langkah kuarantin yang cekap, kumpulan ini dapat ditangani dengan lebih cekap, mengakibatkan pengurangan jangkitan baharu. Populasi yang dijangkiti (I) mungkin meningkat pada awalnya dengan pelaksanaan kuarantin; namun, hasil jangka panjang dijangka akan menurun akibat pengurangan jangkitan baharu yang disebabkan oleh pengurangan kadar kontak. Populasi yang pulih (R) akan meningkat apabila orang yang dijangkiti sembuh, terutamanya jika langkah-langkah kuarantin meningkatkan pemulihan dengan meningkatkan akses penjagaan kesihatan.

7. Kesimpulan

Untuk mengawal dan menghapuskan sepenuhnya influenza, pendekatan pelbagai aspek yang menekankan strategi untuk mengurangkan pendedahan semula dan menguruskan parameter epidemiologi yang kritikal adalah perlu. Kawalan kadar kontak, yang merujuk kepada kekerapan dan intensiti interaksi antara individu, adalah penting untuk pencegahan penularan virus. Risiko wabak influenza dapat dikurangkan secara substansial melalui intervensi yang dirancang untuk mengurangkan interaksi ini, seperti penjarakan sosial, mandat topeng muka, dan nasihat kesihatan awam, yang dirancang untuk mengurangkan kadar kontak tinggi yang memudahkan penyebaran influenza. Kadar pemulihan, iaitu kadar di mana individu yang dijangkiti pulih dan kembali ke keadaan tidak berjangkit, juga kritikal. Intervensi perubatan yang tepat pada masanya, akses kepada rawatan antiviral, dan perkhidmatan penjagaan kesihatan yang komprehensif dapat dilaksanakan untuk meningkatkan kadar pemulihan. Penularan virus dikurangkan apabila individu pulih dengan lebih cepat, kerana mereka menyumbang lebih sedikit agen berjangkit kepada kolam. Pencegahan pendedahan semula kepada virus oleh individu yang pulih adalah komponen penting strategi ini. Usaha penghapusan rumit oleh kitaran jangkitan semula, yang boleh mengakibatkan berlanjutannya penularan dalam komuniti. Pemeliharaan imuniti dan pencegahan wabak berpotensi dapat dicapai dengan mempromosikan vaksinasi di kalangan individu yang pulih dan melaksanakan sistem pemantauan yang berkesan. Hasil ini menekankan keperluan untuk dasar kesihatan awam yang komprehensif yang menggabungkan pelbagai intervensi, seperti jadual imunisasi untuk menggalakkan vaksinasi yang meluas, protokol pengasingan yang cekap untuk mencegah

individu yang dijangkiti bergaul dengan populasi yang sihat, dan kempen kesedaran awam untuk memaklumkan komuniti tentang kepentingan amalan kebersihan dan vaksinasi. Selain itu, adalah penting untuk memperkukuh sistem penjagaan kesihatan untuk mempercepatkan proses pemulihan dan mengurangkan tempoh berjangkit. Akses kepada penjagaan perubatan berkualiti tinggi menjamin individu menerima rawatan segera, dengan itu mengurangkan beban penyakit keseluruhan ke atas masyarakat. Pihak berkuasa kesihatan awam dapat menguruskan penyebaran influenza dengan berkesan, mengurangkan kadar jangkitan, dan akhirnya mengurangkan beban keseluruhan masyarakat yang berkaitan dengan wabak influenza dengan menggabungkan strategi-strategi ini ke dalam program intervensi yang koheren. Selain menangani masalah kesihatan awam yang segera, pendekatan proaktif ini juga memupuk ketahanan terhadap wabak masa depan, memastikan komuniti lebih bersedia untuk menguruskan situasi kecemasan kesihatan yang setanding. Masa depan dengan komplikasi yang lebih sedikit berkaitan influenza dan hasil kesihatan awam yang dipertingkatkan dapat dicapai melalui gabungan pendidikan, pencegahan, dan tindak balas yang cepat.

Penghargaan

Penyelidikan ini dibiayai oleh Universiti Sains Malaysia.

Rujukan

- Ashgi R. 2021. Comparison of numerical simulation of epidemiological model between Euler method with 4th order Runge Kutta method. *International Journal of Global Operations Research* **2**(1): 37–44.
- Balraj P., Sidek H., Suppiah J., Khoo A.S.B. & Saat Z. 2011. Molecular analysis of 2009 pandemic influenza A(H1N1) in Malaysia associated with mild and severe infections. *The Malaysian Journal of Pathology* **33**(1): 7–12.
- Braga J.U. 2024. Clinical predictors of severe forms of influenza A(H1N1)pdm09 in adults and children during the 2009 epidemic in Brazil. *PLoS One* **19**(2): e0291843.
- Cartwright J.H.E. & Piro O. 1992. The dynamics of Runge–Kutta methods. *International Journal of Bifurcation and Chaos* **2**(3): 427–449.
- Cooper I., Mondal A. & Antonopoulos C.G. 2020. A SIR model assumption for the spread of COVID-19 in different communities. *Chaos, Solitons & Fractals* **139**: 110057.
- Dawood F.S., Iuliano A.D., Reed C., Meltzer M.I., Shay D.K., Cheng P.Y., Bandaranayake D., Breiman R.F., Brooks, W.A., Buchy P., Feikin D.R., Fowler K.B., Gordon A., Hien N.T., Horby P., Huang Q.S., Katz M. A., Krishnan A., Lal R. & Widdowson M.A. 2012. Estimated global mortality associated with the first 12 months of 2009 pandemic influenza A H1N1 virus circulation: A modelling study. *The Lancet Infectious Diseases* **12**(9): 687–695.
- Emmanuel S., Sathasivam S., Hasmadi N.H.I., Mohamad Nasir N.H. & Velavan M. 2024. Estimating Upsurge of Hiv Cases in Malaysia by Using Heun's Predictor-Corrector Method. *Journal of Science and Mathematics Letters* **12**(1): 43–52.
- Fowlkes A.L., Arguin P., Biggerstaff M.S., Gindler J., Blau D., Jain S., Dhara R., McLaughlin J., Turnipseed E., Meyer J.J., Louie J.K., Siniscalchi A., Hamilton J.J., Reeves A., Park S.Y., Richter D., Ritchey M.D., Cocoros N.M., Blythe D., ... & Finelli L. 2011. Epidemiology of 2009 pandemic influenza A (H1N1) deaths in the United States, April–July 2009. *Clinical Infectious Diseases* **52**(suppl_1): S60–S68.
- Guo Y., Ding P., Li Y., Zhang Y., Zheng Y., Yu M., Suzuki Y., Zhang H. & Ping J. 2022. Genetic and biological properties of H10N3 avian influenza viruses: A potential pandemic candidate? *Transboundary and Emerging Diseases* **69**(5): e3171–e3182.
- Hashim J.H., Adman M.A., Hashim Z., Mohd Radi M.F. & Kwan S.C. 2021. COVID-19 epidemic in Malaysia: Epidemic progression, challenges, and response. *Frontiers in Public Health* **9**: 560592.
- Hossain M.T., Miah M.M. & Hossain M.B. 2017. Numerical study of kermack-mckendrick SIR model to predict the outbreak of ebola virus diseases using euler and fourth order runge-kutta method. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences* **37**(1): 1–21.
- Hossen M.K., Ahmed Z.E. & Hossain Z. 2019. A comparative investigation on numerical solution of initial value problem by using modified euler's method and runge-kutta method. *ISOR Journal of Mathematics (IOSR-JM)* **15**(4): 40–45.

- Johnson E.J. & Hariharan S. 2017. Public health awareness: Knowledge, attitude and behaviour of the general public on health risks during the H1N1 influenza pandemic. *Journal of Public Health* **25**(3): 333–337.
- Karim S.A.A. & Razali R. 2011. A proposed mathematical model of influenza A, H1N1 for Malaysia. *Journal of Applied Sciences* **11**(8): 1457–1460.
- Liang S.Y., Theodoro D.L., Schuur J.D. & Marschall J. 2014. Infection prevention in the emergency department. *Annals of Emergency Medicine* **64**(3): 299–313.
- Mohammad K.M., Akhi A.A. & Kamrujjaman M. 2025. Bifurcation analysis of an influenza A (H1N1) model with treatment and vaccination. *PLoS One* **20**(1): e0315280.
- Nordin N.A., Ahmad R. & Ahmad R. 2015. Optimal control of vector-borne disease with direct transmission. *Jurnal Teknologi* **76**(13): 53–60.
- Poalillo F.E., Geiling J. & Jimenez E.J. 2010. Healthcare personnel and nosocomial transmission of pandemic 2009 influenza. *Critical Care Medicine* **38**(4): e98–e102.
- Pornphol P., Hammachukiattikul P., Sabastine E., Vadivel R. & Sathasivam S. 2024. Modelling the study of hand, foot and mouth disease using SVEIQR derived model. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology* **47**(2): 193–212.
- Razali R. & Karim S.A. 2013. Estimation of the reproduction number of the novel influenza A, H1N1 in Malaysia. *International Journal of Science Inventions Today* **2**(5): 359–366.
- Rustum N.S. & Al-Temimi S.A.S. 2022. Estimation of the epidemiological model with a system of differential equations (SIRD) using the Runge-Kutta method in Iraq. *International Journal of Nonlinear Analysis and Applications* **13**(2): 2807–2814.
- Rutala W.A. & Weber D.J. 2019. Best practices for disinfection of noncritical environmental surfaces and equipment in health care facilities: A bundle approach. *American Journal of Infection Control* **47**: A96–A105.
- Sathasivam S., Adebayo S.A., Velavan M., Yee T.H. & Yi T.P. 2024. Transmission of hepatitis B dynamics in Malaysia using modified SIS hybrid model with Euler and Runge-Kutta method. *AIP Conference Proceedings* **3016**(1):020010.
- Tan D. & Zheng C. 2012. On a general formula of fourth order Runge-Kutta method. *Journal of Mathematical Science & Mathematics Education* **7**(2): 1–10.
- Woolhouse M.E.J. 2019. Mathematical models of the epidemiology and control of foot-and-mouth disease. In Sobrino F. & Domingo E. (eds.). *Foot and Mouth Disease*: 355–381. Boca Raton, FL: CRC Press.

School of Mathematical Sciences

Universiti Sains Malaysia

11800 USM,

Penang, MALAYSIA

E-mail: seshelda@unimas.my, saratha@usm.my, sabastine.emmanuel@fulokoja.edu.ng, salaudeenadebayo@student.usm.my*

Centre for Pre-University Studies

Universiti Malaysia Sarawak

94300 Kota Samarahan,

Sarawak, MALAYSIA

E-mail: seshelda@unimas.my

Dihantar: 30 Ogos 2024

Diterima: 8 November 2024

*Pengarang koresponden