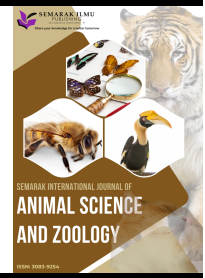




Semarak International Journal of Animal Science and Zoology

Journal homepage:
<https://semarakilmu.my/index.php/sijaszi/index>
ISSN: 3083-9254



Pendekatan Matematik bagi Usaha Pemuliharaan yang Bertujuan Memodelkan Perubahan Populasi Penyu Laut Terancam di Chagar Hutang, Malaysia

Mathematical Approach for Conservation Initiatives to Model Population Dynamics of Endangered Sea Turtles in Chagar Hutang, Malaysia

Emmerline Shelda Siaw^{1,2}, Saratha Sathasivam^{2,*}, Salaudeen Abdulwaheed Adebayo², Majid Khan Majahar Ali², Vedyappan Govindan³

¹ Centre for Pre-University Studies, Universiti Malaysia Sarawak, Kota Samarahan 94300, Sarawak, Malaysia

² School of Mathematical Sciences, Universiti Sains Malaysia, USM, Penang 11800, Malaysia

³ Department of Mathematics, Hindustan Institute of Technology and Science, Chennai 603103, India

ARTICLE INFO

Article history:

Received 31 October 2024

Received in revised form 28 November 2024

Accepted 14 March 2025

Available online 31 March 2025

ABSTRACT

Aktiviti manusia seperti pembandaran, perindustrian, dan pertanian secara besaran-besaran seperti penanaman berputar sering membawa kepada kemusnahan habitat, perubahan iklim, dan penggunaan berlebihan sumber semula jadi. Hal ini juga membuatkan spesies terancam menghadapi risiko kepupusan. Pemeliharaan spesies terancam adalah penting bukan sahaja untuk nilai intrinsiknya tetapi juga untuk mengekalkan ekosistem dan kepelbagaian biologi. Usaha pemuliharaan yang berkesan adalah penting untuk mencegah kehilangan spesies berharga ini dan memulihkan populasi mereka ke tahap mampan. Penyu adalah salah satu spesies terancam yang menghadapi cabaran kepupusan di Malaysia, terutama di Teluk Chagar Hutang, Pulau Redang yang terletak di luar pantai negeri Terengganu, pantai timur Semenanjung Malaysia. Kajian ini menggunakan model matematik untuk membimbing inisiatif pemuliharaan bagi spesies terancam melalui kajian perubahan populasi penyu dalam tempoh masa tertentu. Penyelidikan terdahulu menunjukkan ancaman segera kepupusan penyu laut, disokong oleh bukti penurunan populasi penyu laut di Malaysia. Untuk menangani masalah ini, kajian ini mencadangkan sebuah model matematik yang dirumus sebagai satu sistem persamaan pembezaan biasa berdasarkan pandangan daripada kajian terdahulu. Kajian ini menggunakan dua kaedah berangka yang berkesan iaitu kaedah *Runge-Kutta* Tertib ke-4, dan kaedah Beza Terhingga, untuk menyelesaikan model matematik yang dirumus. Penemuan kajian menunjukkan bahawa di bawah keadaan tertentu, kedua-dua kaedah berangka yang digunakan berfungsi dengan cemerlang dalam menyelesaikan model matematik dengan menunjukkan perbezaan yang minimum dalam penyelesaian mereka. Model ini juga mengenal pasti parameter yang diperlukan untuk mengekalkan kestabilan dalam

* Corresponding author.

E-mail address: saratha@usm.my

ekosistem dan untuk memastikan populasi telur penyu laut dan anak penyu di Chagar Hutang berada dalam keadaan sederhana sambil mengurangkan kemungkinan kepupusan dan mencapai keseimbangan jangka panjang bersama pemangsa popular. Kajian mensimulasikan model di bawah keadaan ini dan membincangkan hasilnya melalui plot siri masa dan rajah potret fasa.

Endangered species are at risk of extinction due to various human activities such as urbanization, agricultural practices, vegetation management, shifting cultivation practices, and industrialization, which often lead to habitat decimation, fragmentation, climate change, pollution, and overuse of natural resources. Preserving endangered species is essential not only for their intrinsic value but also for maintaining ecosystem health and biodiversity. Effective conservation efforts are crucial to prevent the loss of these precious species and restore their populations to sustainable levels. Turtles are one of the endangered species that is facing an extinction challenge in Malaysia, especially at the Bay of Chagar Hutang, Redand Island, off the coast of Terengganu State, Peninsular Malaysia's east coast. A reason why we deployed the use of a mathematical model to guide conservation initiatives for endangered species through the study of their population dynamics over a specified number of years. Prior research demonstrates an imminent threat of sea turtle extinction, supported by evidence of declining sea turtle populations in Malaysia. To address this conservation concern, we propose a mathematical model formulated as a system of ordinary differential equations (ODE) based on insights from previous studies. This paper deployed two effective numerical methods; the Runge-Kutta method of order 4, and finite difference methods, to solve the formulated mathematical model. Our findings suggest that under specific conditions, the two numerical methods deployed perform brilliantly in solving mathematical models by showing minimal differences in their solutions. The model identifies the parameters needed to maintain stability within the ecosystem and to keep the population of sea turtle eggs and hatchlings in Chagar Hutang in a moderate state while mitigating the possibilities of extinction and attaining long term stable co-existence with popular predictors. We simulate the model under these conditions and discuss the results through time series plots and phase portrait diagrams.

Keywords:

Spesies terancam; kepelbagaian biologi; kemusnahan; perubahan iklim

Endangered species; biological diversity; destruction; climate change

1. Pengenalan

Pemeliharaan kepelbagaian biologi, terutama perlindungan spesies terancam tidak kira tumbuhan dan haiwan, merupakan perhatian utama dalam dunia yang berubah dengan pesat pada hari ini. Aktiviti buatan manusia, termasuk pembandaran, pertanian, dan perindustrian, menimbulkan ancaman besar kepada spesies terancam apabila populasi manusia berkembang dan permintaan sumber meningkat. Ketika populasi manusia bertambah, bandar-bandar berkembang, dan habitat semula jadi spesies terancam ditransformasikan menjadi infrastruktur bandar, taman rekreasi, dan industri melalui pembersihan tanah, penyahhutanan, pembinaan rumah, empangan, taman, dan jalan raya, serta projek pembangunan infrastruktur lain dimana aktiviti-aktiviti ini mendedahkan spesies terancam kepada kehilangan habitat, pencemaran, pemecahan, pengurangan ketersediaan makanan, air, tempat tinggal, dan kawasan pembiakan bagi spesies terancam [1]. Perindustrian menimbulkan ancaman yang lebih besar kepada habitat semula jadi seperti tanah lembap, bakau, terumbu karang, hutan, padang rumput, dan juga padang pasir. Perindustrian mendedahkan habitat kepada bahaya melalui pelepasan pencemaran berbahaya ke udara dan air dengan kesan buruk yang tinggi terhadap kedua-dua tumbuhan dan haiwan, membawa kepada gangguan ekosistem jangka panjang sambil menyebabkan pelbagai masalah kesihatan bagi spesies terancam [2]. Pemusnahan habitat hidupan liar sedang berlaku pada kadar yang membimbangkan, mewujudkan kesan yang dahsyat terhadap kepelbagaian biologi. Pada dasarnya, industri maritim merupakan sumber utama pencemaran di dalam air dan udara. Salah satu punca utama tumpahan minyak ke permukaan lautan adalah operasi kapal, iaitu diesel. Spesies akuatik biasanya terbunuh dalam kemalangan yang melibatkan pemindahan minyak dan air balast dari kapal tangki. Kesan merosakkan pelbagai hidrokarbon yang berasal daripada minyak mentah mempunyai pengaruh yang

besar terhadap alam sekitar dan boleh menghapuskan sepenuhnya berjuta-juta tumbuhan dan haiwan akuatik dalam satu ekosistem [3,4], memaksa banyak spesies pupus, walaupun bahawa hakikatnya banyak yang telah melakukannya baru-baru ini [5]. Interaksi antara pemangsa dan mangsa, dikategorikan sebagai salah satu subjek yang paling banyak dikaji dalam ekologi. Kepentingannya yang berterusan dalam ekologi secara teori dan eksperimen adalah disebabkan oleh kehadirannya yang meluas di seluruh dunia [6]. Respons berfungsi pemangsa, diukur sebagai bilangan mangsa yang dimakan setiap pemangsa dalam satu unit masa tertentu, memberikan petunjuk dalam ekologi populasi kerana implikasinya yang mendalam terhadap perubahan populasi [7].

Selain itu, di dalam sistem ekologi yang rumit dan saling berkait, keseimbangan yang rapuh antara interaksi pemangsa-mangsa dan pengaruh yang semakin besar daripada aktiviti yang disebabkan oleh manusia, termasuk bertindak sebagai salah satu pemangsa, menyebabkan ancaman besar kepada populasi penyu laut [8]. Kajian ini menyelami jaringan rumit cabaran yang dihadapi oleh makhluk marin yang luar biasa ini, menekankan kepentingan usaha pemuliharaan. Ketika pemodenan, campur tangan manusia, dan perubahan iklim muncul sebagai musuh yang kuat, organisasi khusus seperti Unit Penyelidikan Penyu Laut mesti mengetuai inisiatif pemuliharaan, terutama untuk spesies penyu hijau dan penyu belimbing yang terdedah atau terancam di sekitar pantai Chagar Hutang. Perjalanan hidup penyu-penyu ini berlangsung selama dua dekad, memuncak pada detik penting apabila mereka kembali ke tapak sarang mereka untuk bertelur. Namun, perjalanan ini penuh dengan bahaya, kerana mereka melalui pelbagai fasa kehidupan, menghadapi ancaman daripada ketam hantu di garis pantai hingga pengejaran yang tidak henti-henti oleh jerung di kedalaman lautan [9]. Kerumitan interaksi ini memerlukan pemahaman yang jelas, mendorong penggunaan model matematik sebagai alat yang berkuasa di kalangan ahli ekologi. Model matematik, *Lotka-Volterra* yang efektif untuk pendekatan analitik merupakan satu rangka kerja matematik yang mendedahkan perubahan asas hubungan pemangsa-mangsa [10]. Dilengkapi dengan analisis kestabilan dan potret fasa, penyelidik memperoleh pandangan panorama mengenai titik keseimbangan dan corak rumit dalam interaksi ekologi ini [11]. Namun, cabaran yang wujud akibat jangka hayat penyu laut yang panjang mendorong para saintis untuk meneroka jalan alternatif, membawa mereka ke arah pemodelan matematik dan analisis siri masa. Secara analitik, penyelidik berusaha mengintai masa depan, meramalkan kesan program pemuliharaan dalam jangka masa 10 hingga 20 tahun. Pendekatan berpandangan jauh ini menjadi mercu harapan untuk mengatasi halangan yang ditimbulkan oleh jangka hayat penyu laut yang panjang. Model ini bukan sahaja menekankan kepentingan analisis kestabilan tetapi juga menjelaskan keseimbangan yang halus diperlukan untuk mengekalkan populasi penyu laut dalam menghadapi campur tangan manusia. Kajian ini mengambil pendekatan yang inovatif apabila ia memperkenalkan model populasi penyu berstruktur peringkat, yang dihubungkan secara rumit dengan perubahan pemangsaan *Lotka-Volterra*. Model ini, yang direka untuk memberikan penilaian komprehensif terhadap kelestarian populasi penyu laut di Chagar Hutang, merangkumi hubungan rumit antara penyu juvenil dan pemangsa simbiotiknya. Analisis kestabilan, tonggak dalam pemodelan ekologi, digunakan untuk mengkaji nilai keseimbangan, membimbing unjuran parameter yang dioptimumkan ke atas tempoh kematangan kumpulan populasi penyu. Model tradisional seperti *Lotka-Volterra* berfungsi sebagai asas untuk memahami bagaimana populasi berinteraksi. Pada dasarnya, model-model ini membantu kita memahami perubahan antara pemangsa dan mangsa dalam ekosistem. Model *Lotka-Volterra* adalah sangat berguna dalam menggambarkan bagaimana pemangsa dan mangsa mempengaruhi populasi masing-masing dari masa ke masa.

Walaupun spesies terancam mengalami penurunan yang pantas dan tidak dijangka pada skala global, khususnya penyu laut, penyelidikan yang menggunakan pemodelan matematik untuk

memberikan pandangan yang tepat tentang perubahan populasi dan keperluan pemuliharaan spesies ini adalah masih terhad. Model matematik sering membantu penyelidik untuk mensimulasikan corak populasi di bawah pelbagai tekanan semula jadi dan buatan manusia. Untuk menangani isu ini, kami telah membangunkan model matematik yang khusus fokus pada perubahan populasi penyu laut di Chagar Hutang. Kami menggunakan model populasi penyu berstruktur peringkat dengan perubahan pemangsa Lotka-Volterra, dan menyelesaikannya menggunakan dua kaedah berangka yang berbeza: kaedah *Runge-Kutta* Tertib ke-4 (RK4) dan Kaedah Beza Terhingga (FDM). Penggunaan kaedah *Runge-Kutta* memastikan penyelesaian berangka yang tepat dan cekap bagi persamaan pembezaan biasa [12], yang wujud secara semula jadi dalam model ini. Kaedah *Runge-Kutta* boleh menjadi bermanfaat dalam menangkap perubahan berterusan populasi penyu laut dan pemangsanya dari masa ke masa. Begitu juga, kaedah Beza Terhingga menyumbang kepada pertimbangan ruang, membolehkan kami mengambil kira variasi ruang dalam perubahan populasi, terutama dalam konteks tapak bersarang penyu laut. Keputusan berangka yang diperoleh menggunakan dua kaedah berangka yang dinyatakan adalah bukti kuasa pemodelan matematik dalam mengira kerumitan data. Penemuan kajian selanjutnya mengurai kerumitan yang wujud dalam pemuliharaan populasi penyu laut, menggabungkan kerumitan ekologi dengan ketepatan pemodelan matematik. Kaedah yang digunakan dalam menyelesaikan model menunjukkan sedikit variasi dalam keputusan yang diperoleh, yang merupakan petunjuk kestabilan keputusan yang diperoleh. Penemuan menunjukkan bahawa penggunaan model matematik dapat membimbing inisiatif pemuliharaan untuk mencegah spesies terancam daripada pupus. Penyelidik dan pemuliharaan perlu bekerja pada mekanisme untuk memperbaiki parameter dengan tepat dan mengurangkan kehilangan pelbagai genetik akibat aktiviti manusia jika mereka ingin memenuhi cadangan dunia untuk mengekalkan sekurang-kurangnya 90% daripada variasi genetik spesies.

2. Formulasi Model

Model *Lotka-Volterra* yang digunakan, juga dikenali sebagai model pemangsa-mangsa, merupakan koleksi persamaan pembezaan yang menunjukkan populasi mangsa dan pemangsa yang berinteraksi dalam ekosistem. Dalam kebanyakan kes, ia adalah satu set dua persamaan, dengan satu menggambarkan perubahan mangsa manakala yang lain menunjukkan perubahan pemangsa. Model ini boleh diubahsuai untuk menampung bentuk mangsa yang berbeza pada peringkat perkembangan yang berbeza kerana mangsa muda lebih mudah dimakan berbanding mangsa matang yang telah membangunkan beberapa kemahiran kelangsungan hidup untuk mengelakkan pemangsa semasa serangan atau pertemuan, jadi di dalam kajian ini, kami membahagikan persamaan mangsa kepada dua supaya kami mempunyai tiga persamaan. Kami kemudiannya merumuskan masalah supaya kami boleh menggunakan kaedah berangka untuk menyelesaikan sistem persamaan pembezaan. Kaedah *Runge-Kutta* Tertib ke-4 (RK4) dan kaedah Beza Terhingga kedua-duanya adalah teknik berangka yang digunakan secara meluas untuk menyelesaikan persamaan pembezaan biasa tetapi ia mempunyai kelebihan yang berbeza. RK4 menonjol kerana ketepatannya yang ketara, mencapai keseimbangan yang baik antara ketepatan dan kerumitan pengiraan. RK4 yang fleksibel membolehkannya mengendalikan pelbagai persamaan pembezaan biasa, termasuk sistem, menjadikannya sangat mahir dalam menyelesaikan masalah dengan saiz langkah yang boleh diubah secara dinamik. Sebaliknya, kaedah Beza Terhingga menonjol dalam kesederhanaan dan kemudahan pelaksanaan. Sifatnya yang berasaskan grid membuatnya lebih mudah diaplikasikan pada masalah dengan geometri dan batasan yang tidak terlalu rumit, memberikan penyelesaian yang praktikal untuk senario persamaan pembezaan biasa tertentu. Keluwesan grid kaedah ini membolehkan kami dapat mengawal ketepatan penyelesaian dengan menyesuaikan saiz grid dan

mencari kompromi yang sesuai antara ketepatan dan kecekapan pengiraan. Selain itu, sifat sejajar yang wujud dalam kaedah Beza Terhingga, menjadikannya pilihan yang baik untuk persekitaran pengkomputeran berprestasi tinggi.

Modifikasi model klasik *Lotka-Volterra* telah dilakukan dengan membahagikan petak mangsa kepada dua bahagian, bahagian pertama x ialah telur penyu laut, y ialah bahagian kedua dan ialah anak penyu laut, dan z ialah pemangsa marin, seperti jerung, barakuda, dan ketam gergasi.

Oleh itu, kami merumuskan versi yang diubah suai daripada model persamaan pembezaan biasa pemangsa-mangsa berstruktur peringkat *Lotka-Volterra* seperti yang ditunjukkan dalam persamaan (1-3):

$$\frac{dx}{dt} = \alpha x \left(1 - \frac{x}{K}\right) - \beta x - \omega x. \quad (1)$$

$$\frac{dy}{dt} = \mu \omega x - \sigma y - \rho y z. \quad (2)$$

$$\frac{dz}{dt} = \delta \rho y z - \eta z. \quad (3)$$

Parameter yang digunakan dalam pembentukan persamaan pembezaan biasa memainkan peranan penting dalam mengenali perubahan utama dalam populasi penyu laut dari masa ke masa. Parameter statistik model pembentukan persamaan pembezaan dan nilai berangka mereka ditunjukkan dalam Jadual 1. Penyelesaian berangka model diselesaikan menggunakan parameter ini. Penerangan tentang parameter yang digunakan diberikan seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 1.

Jadual 1

Penerangan tentang parameter

Parameter	Definisi
α	Kadar telur yang dihasilkan di sarang oleh penyu laut dewasa
K	Kapasiti bawaan untuk telur menetas setiap tahun
β	Kadar telur yang gagal menetas (kematian semula jadi)
ω	Kadar telur yang menetas
σ	Kadar kelangsungan hidup (peluang anak penyu muda bertahan daripada pemangsaan)
ρ	Kadar pemangsaan anak penyu laut yang baru menetas
μ	Kadar penukaran untuk anak penyu laut yang baru menetas
η	Kadar kematian semula jadi pemangsa
δ	Kadar penukaran mangsa kepada pemangsa melalui pemangsaan

2.1 Kaedah Runge-Kutta

Kaedah *Runge-Kutta* Tertib ke-4 adalah salah satu teknik berangka yang paling banyak digunakan untuk menyelesaikan persamaan pembezaan biasa dalam bidang kejuruteraan dan sains, terutamanya di mana penyelesaian bentuk tertutup untuk persamaan pembezaan biasa kelihatan mustahil atau sukar untuk diperolehi. Ia sering diutamakan berbanding kaedah lain kerana darjah penghampiran, ketepatan, fleksibiliti, dan kestabilannya, yang memihak kepada penghampiran berangka yang lebih tepat. Ia lebih cekap daripada rumusan alternatif dengan urutan yang lebih rendah, kejayaannya bergantung pada kemas kini berulang terhadap penyelesaian persamaan pembezaan biasa pada langkah masa diskret digabungkan dengan terbitan untuk mendapatkan penyelesaian yang diperbaiki. RK4 agak mudah untuk dilaksanakan kerana ia tidak memerlukan kecerunan semasa pelaksanaannya kerana ia hanya menilai fungsi, menjadikannya serba boleh dan sesuai untuk sistem persamaan pembezaan biasa bukan linear. Walau bagaimanapun, ia boleh menjadi pengkomputeran yang intensif kerana ia memerlukan pelbagai penilaian fungsi dalam setiap langkah, yang mesti dipilih dengan teliti untuk mencapai penyelesaian yang boleh dilaksanakan dan

pada dasarnya tidak sesuai untuk pembahagian ruang. Pelbagai bentuk kaedah Runge-Kutta telah dicadangkan, tetapi kaedah Runge-Kutta Tertib ke-4 adalah yang paling popular dan telah digunakan dalam banyak literatur [13,14]. Kaedah RK4 mengemas kini penyelesaian dengan menilai fungsi terbitan empat kali pada pelbagai tempat sepanjang setiap langkah masa digabungkan dengan purata berwajaran daripada penilaian ini. Oleh itu, ia menawarkan pendekatan berangka yang kukuh dan boleh dipercayai untuk mensimulasikan sistem dinamik dan mengkaji tingkah lakunya dalam tempoh masa tertentu. Rumusan am bagi kaedah *Runge-Kutta* boleh dinyatakan seperti yang ditunjukkan dalam persamaan (4) [15].

$$p_{i+1} = p_i + hf(x_i, p_i, h). \quad (4)$$

Kaedah *Runge-Kutta* Tertib ke-4 boleh diwakili seperti yang ditunjukkan dalam persamaan (5) di bawah.

$$p_{i+1} = p_i + \frac{h}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4), \quad (5)$$

dimana,

$$\begin{aligned} k_1 &= f(x_i, y_i) \\ k_2 &= f\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{hk_1}{2}\right) \\ k_3 &= f\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{hk_2}{2}\right) \\ k_4 &= f(x_i + h, y_i + hk_3) \end{aligned}$$

Ketersediaan nilai awal bagi fungsi ($t = 0$) yang tidak diketahui pada titik-titik tertentu digunakan untuk melaksanakan urutan operasi sehingga yang akan membawa kepada penyelesaian yang mungkin, iaitu syarat yang diperlukan untuk dapat menggunakan skema ini. Nilai-nilai tersebut mempunyai kesan yang besar terhadap struktur penyelesaian yang dasar. Dengan menentukan saiz langkah (h) dan menggunakan $x(0) = x, y(0) = y$ dan $z(0) = z$. Kami merumuskan persamaan untuk bilangan telur penyu laut, x yang berjaya menetas seperti yang ditunjukkan dalam persamaan (6).

$$f_x(t_i, x_i) = ax\left(1 - \frac{x}{K}\right) - \beta x - \omega x. \quad (6)$$

Persamaan (6) kemudian ditulis sebagai skema berulang dalam persamaan (7).

$$x_{i+1} = x_i + \frac{h}{6}(k_1^x + 2k_2^x + 2k_3^x + k_4^x). \quad (7)$$

dimana,

$$\begin{aligned} k_1^x &= f(t_i, x_i) \\ k_2^x &= f\left(t_i + \frac{h}{2}, x_i + \frac{1}{2}k_1^x h\right) \\ k_3^x &= f\left(t_i + \frac{h}{2}, x_i + \frac{1}{2}k_2^x h\right) \\ k_4^x &= f(t_i + h, x_i + hk_3^x) \end{aligned}$$

Untuk proses menetas (y) dalam persamaan (8), ia ditukar kepada skema berulang seperti yang ditunjukkan dalam persamaan (9).

$$f_y(t_i, y_i) = \mu\omega x - \sigma y - \rho yz. \quad (8)$$

$$y_{i+1} = y_i + \frac{h}{6}(k_1^y + 2k_2^y + 2k_3^y + k_4^y). \quad (9)$$

dimana,

$$k_1^y = g(t_i, y_i)$$

$$k_2^y = g\left(t_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{1}{2}k_1^y h\right)$$

$$k_3^y = g\left(t_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{1}{2}k_2^y h\right)$$

$$k_4^y = g(t_i + h, y_i + hk_3^y)$$

Dan akhirnya, untuk pemangsa (z) yang ditunjukkan dalam persamaan (10), ia boleh ditukar kepada skema berulang dalam persamaan (11).

$$f_z(t_i, z_i) = \delta\rho yz - \eta z. \quad (10)$$

$$z_{i+1} = z_i + \frac{h}{6}(k_1^z + 2k_2^z + 2k_3^z + k_4^z). \quad (11)$$

dimana,

$$k_1^z = j(t_i, z_i)$$

$$k_2^z = j\left(t_i + \frac{h}{2}, z_i + \frac{1}{2}k_1^z h\right)$$

$$k_3^z = j\left(t_i + \frac{h}{2}, z_i + \frac{1}{2}k_2^z h\right)$$

$$k_4^z = j(t_i + h, z_i + hk_3^z)$$

Persamaan (7, 9 dan 11) diselesaikan secara berulang untuk bilangan tahun yang diperlukan dan penyelesaian berangkanya direkodkan serta dianalisis berdasarkan ciri-ciri output yang dihasilkan.

2.2 Kaedah Beza Terhingga

Kaedah lain untuk menyelesaikan masalah nilai awal dan nilai sempadan dalam persamaan pembezaan biasa ialah kaedah Beza Terhingga. Persamaan pembezaan biasa boleh diselesaikan secara berangka menggunakan kaedah Beza Terhingga yang mengasingkan domain kepada grid titik dan menggunakan formula beza terhingga untuk menghampiri kecerunan [16]. Kaedah Beza Terhingga mudah untuk digunakan dan pengkomputeran semasa pelaksanaan adalah kurang intensif, selain sesuai untuk masalah nilai sempadan dan persamaan pembezaan separa. Kaedah ini lebih mudah untuk disediakan untuk masalah dengan pemisahan ruang dan grid. Walaupun ketepatannya mungkin tidak setanding dengan kaedah peringkat tinggi seperti *Runge-Kutta* Tertib ke-4 apabila digunakan untuk menyelesaikan masalah yang sangat tidak linear atau sistem yang tegar, ia berfungsi dengan baik dengan saiz langkah yang lebih kecil. Namun, ketepatan dan kestabilannya juga boleh terjejas apabila skema eksplisit digunakan. Kaedah Beza Terhingga untuk

persamaan pembezaan biasa terutamanya memberi tumpuan kepada pengasingan domain masa, berbanding kaedah Beza Terhingga untuk persamaan pembezaan separa, yang memerlukan pengasingan domain ruang dan masa. Secara umumnya, prosedur menggunakan persamaan pembezaan separa untuk menyelesaikan persamaan pembezaan biasa melibatkan penggantian terbitan fungsi dengan penghampiran beza terhingga, iaitu ungkapan-ungkapan yang menghampiri kecerunan fungsi berkenaan dengan nilai-nilai fungsi pada titik-titik berdekatan dalam masa [17]. Kaedah ini boleh digunakan untuk menyelesaikan kedua-dua masalah nilai awal dan masalah nilai sempadan. Dapat diingat bahawa persamaan pembezaan biasa kita dalam persamaan (1-3) terdiri daripada $\frac{dx}{dt}$, $\frac{dy}{dt}$ dan $\frac{dz}{dt}$ pada masa, $t = 0$. Kemudian kami mengubah persamaan pembezaan biasa kami menggunakan Kaedah Beza Terhingga seperti yang ditunjukkan dalam persamaan (13, 15 dan 17).

Bagi bilangan telur penyu laut yang berjaya dieram, $\frac{dx}{dt}$,

$$\frac{x_{i+1}-x_i}{h} = ax \left(1 - \frac{x}{K}\right) - \beta x - \omega x. \quad (12)$$

$$x_{i+1} = x_i + h \left(ax \left(1 - \frac{x}{K}\right) - \beta x - \omega x \right). \quad (13)$$

Bagi bilangan anak penyu yang menetas, $\frac{dy}{dt}$,

$$\frac{y_{i+1}-y_i}{h} = \mu \omega x - \sigma y - \rho y z. \quad (14)$$

$$y_{i+1} = y_i + h(\mu \omega x - \sigma y - \rho y z). \quad (15)$$

Dan akhirnya untuk bilangan pemangsa laut, $\frac{dz}{dt}$,

$$\frac{z_{i+1}-z_i}{h} = \delta \rho y z - \eta z. \quad (16)$$

$$z_{i+1} = z_i + h(\delta \rho y z - \eta z). \quad (17)$$

Penyelesaian yang sepadan untuk persamaan (1,2,3) juga boleh diperoleh menggunakan hubungan yang diturunkan daripada persamaan (13,15 dan 17). Beberapa kajian telah melaporkan kejayaan Kaedah Beza Terhingga dalam menyelesaikan persamaan pembezaan biasa dalam pelbagai domain sains dan kejuruteraan di mana penyelesaian analitik sukar atau mustahil untuk diperolehi. Kaedah Beza Terhingga untuk persamaan pembezaan biasa menyediakan kaedah yang boleh diadaptasi dan berkesan untuk menghampiri penyelesaian kepada persamaan pembezaan biasa [18].

3. Metodologi

Mencari penyelesaian kepada persamaan *Lotka-Volterra* dengan parameter dan nilai awal yang diketahui menggunakan kaedah berangka, khususnya kaedah *Runge-Kutta* dan kaedah Beza Terhingga, melibatkan alternatif persamaan mengikut masa dan kemudian mengira penyelesaian secara berulang pada setiap interval waktu yang telah ditentukan. Bagi kaedah *Runge-Kutta*, teknik berangka untuk menyelesaikan persamaan pembezaan bermula dengan menghampiri penyelesaian pada setiap langkah masa menggunakan purata berwajaran terbitan pada beberapa titik pertengahan dalam selang masa yang ditentukan. Prosedur yang terlibat adalah seperti berikut:

- i. Pengasingan adalah pembahagian selang masa kepada subselang kecil yang merupakan langkah-langkah masa yang sama jarak (Δt).
- ii. Penetapan keadaan awal bagi setiap kumpulan pada dasarnya adalah populasi awal pemangsa (z) dan spesies mangsa (x, y).
- iii. Pada setiap langkah masa (t), terbitan populasi pemangsa (z) dan mangsa (x, y) dikira menggunakan persamaan *Lotka-Volterra* yang diubah suai. Kemudian, formula *Runge-Kutta* digunakan untuk mengemas kini populasi pemangsa dan mangsa pada langkah seterusnya.
- iv. Langkah diulang sehingga bilangan langkah masa yang dikehendaki atau sehingga kriteria pemberhentian dipenuhi.
- v. Keputusan direkodkan untuk analisis, visualisasi, dan interpretasi.

Dalam kes kaedah Beza Terhingga, yang merupakan satu lagi kaedah berangka popular untuk menyelesaikan persamaan pembezaan biasa dengan menghampiri cerun menggunakan formula Beza Terhingga, langkah-langkah untuk menyelesaikan persamaan *Lotka-Volterra* menggunakan kaedah Beza Terhingga adalah seperti berikut:

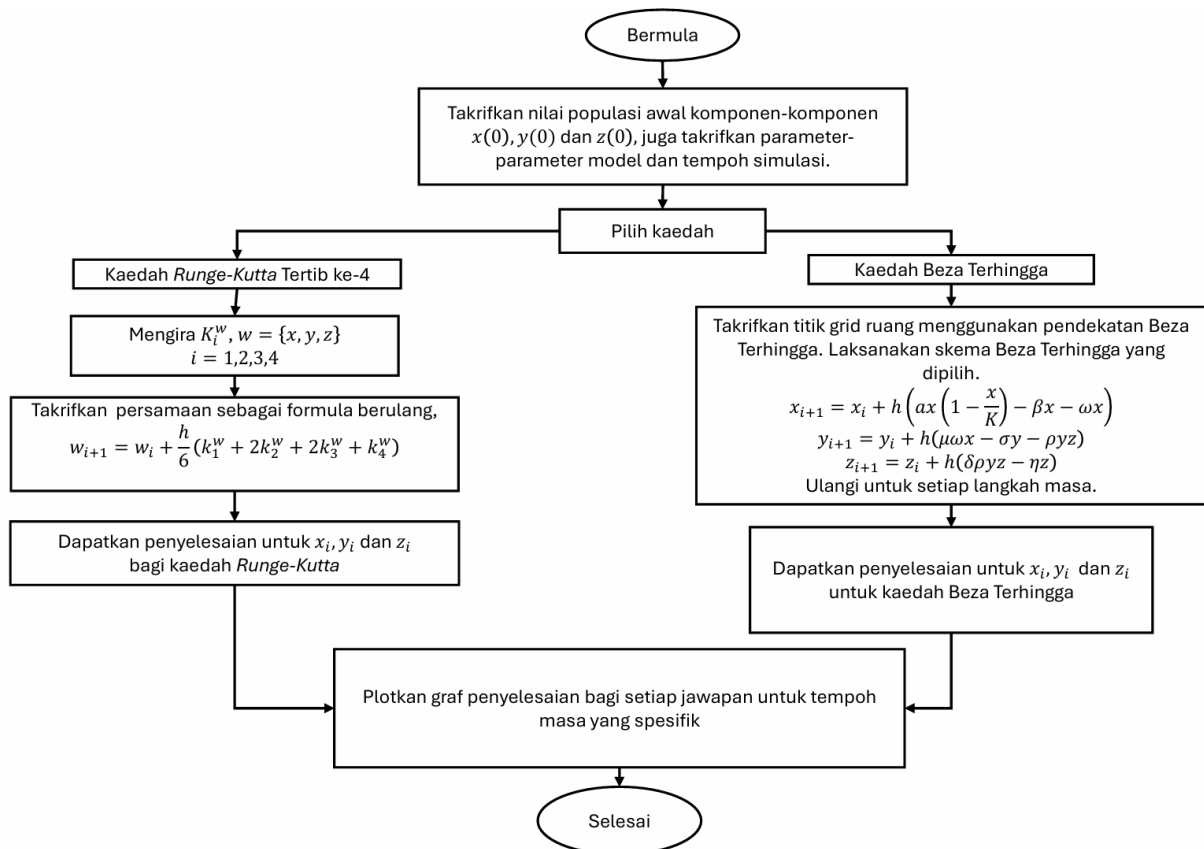
- i. Pembahagian selang masa kepada langkah-langkah masa kecil yang sama jarak (Δt) dan pengasingan domain ruang.
- ii. Spesifikasi populasi awal pemangsa (z) dan spesies mangsa (x, y).
- iii. Penggunaan formula Beza Terhingga untuk menghampiri kecerunan populasi pemangsa (z) dan mangsa (x, y) berkenaan dengan masa. Formula Beza ke Hadapan digunakan untuk menghampiri terbitan pertama mengikut masa.
- iv. Pada setiap langkah masa (t), terbitan populasi pemangsa (z) dan mangsa (x, y) dikira menggunakan formula Beza Terhingga. Kemudian, populasi pemangsa (z) dan mangsa (x, y) dikemas kini kepada langkah masa seterusnya menggunakan persamaan *Lotka-Volterra* yang dipisahkan.
- v. Kami mengulangi proses berulang untuk bilangan langkah masa yang dikehendaki atau sehingga penumpuan tercapai.
- vi. Analisis, visualisasi, dan interpretasi hasil.

3.1 Carta Alir untuk Metodologi

Carta alir di dalam Rajah 1 menggambarkan prosedur-prosedur untuk menyelesaikan sistem tiga persamaan *Lotka-Volterra* menggunakan kedua-dua kaedah *Runge-Kutta* dan Beza Terhingga.

3.2 Deskripsi Data dan Parameter-parameter

Parameter yang digunakan dalam penyelidikan ini, seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 2, diperoleh daripada literatur sedia ada, yang dibentangkan sebagai data pemerhatian dan eksperimen, manakala yang lain diandaikan. Parameter-parameter ini mungkin berbeza dari satu lokasi ke lokasi yang lain berdasarkan keadaan persekitaran, faktor iklim, dan pengaruh lain. Walau bagaimanapun, nilai-nilai yang diandaikan dalam penyelidikan ini adalah disebabkan oleh data eksperimen yang terhad. Oleh itu, nilai-nilai yang diandaikan tersebut mungkin menghalang, meluaskan julat kepelbagaian, dan mengurangkan keberkesanan model daripada mencerminkan senario sebenar; lebih-lebih lagi, menggunakan nilai sebenar utama pada masa hadapan akan membawa kepada model yang lebih halus dengan ketepatan, kesesuaian, dan kebolegunaan yang lebih tinggi untuk usaha pemuliharaan dunia sebenar.



Rajah 1. Langkah-langkah untuk menyelesaikan system tiga persamaan *Lotka-Volterra*

Jadual 2

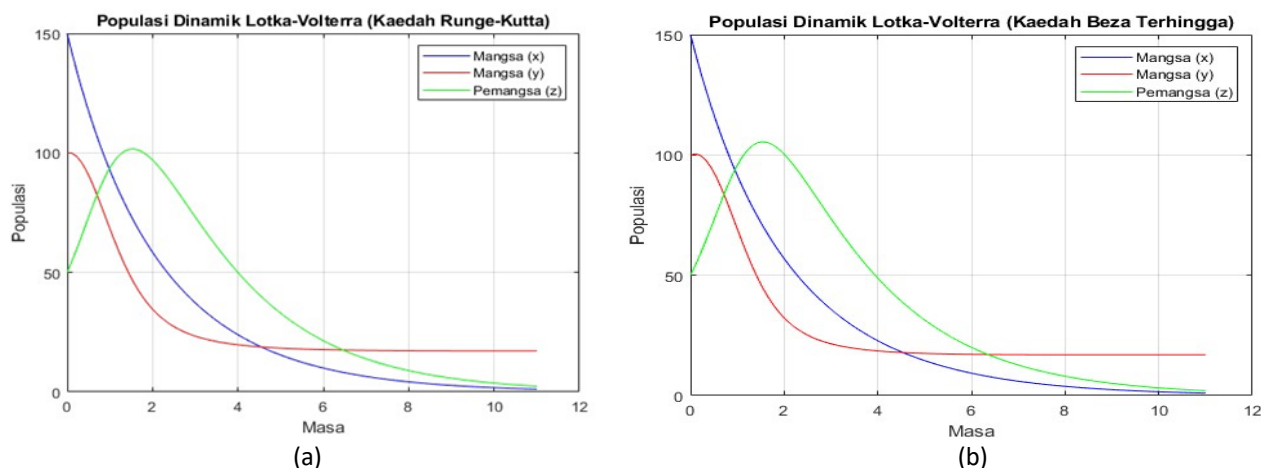
Nilai awal dan parameter-parameter

Parameter	Definisi	Nilai	Sumber
r	Kadar telur yang ditelurkan dalam sarang oleh penyu laut dewasa	0.3, 1.3, 4.0	[19]
K	Kapasiti bawaan untuk telur menetas setiap tahun	700	[19]
α	Kadar telur yang gagal menetas (kematian semula jadi)	0.2	[20]
w	Kadar telur yang menetas	0.53	[21]
c	Kadar kelangsungan hidup (kemungkinan anak-anak muda terselamat daripada pemangsaan)	0.001	[22]
b	Kadar pemangsaan anak penyu laut yang baru menetas	0.015	[23]
g	Kadar penukaran untuk anak penyu laut yang baru menetas	1	[23]
s	Kadar kematian semula jadi pemangsa	0.7	Diandaikan
f	Kadar penukaran mangsa kepada pemangsa melalui pemangsaan	1	Diandaikan
x	Bilangan telur penyu laut yang berjaya dikeluarkan	150	Diandaikan
y	Bilangan anak penyu yang menetas	100	Diandaikan
z	Bilangan pemangsa laut	50	Diandaikan

4. Dapatan dan Perbincangan

Perubahan populasi penyu laut di Pantai Chagar Hutang, Malaysia, telah dimodelkan menggunakan dua kaedah berangka yang terkenal, iaitu, kaedah *Runge-Kutta* Tertib ke-4 dan kaedah Beza Terhingga. Hasil yang diperoleh untuk kedua-dua kaedah adalah sangat penting dan memerlukan analisis dan interpretasi yang berkaitan dengan perubahan populasi asas mangsa. Salah satu cara mudah untuk memahami variasi adalah dengan menilai persamaan yang mengawal melalui

variasi parameter. Kadar telur yang diletakkan dalam sarang oleh penyu laut dewasa telah dipertimbangkan terlebih dahulu. Pilihan parameter ini adalah serupa dengan penyelidikan terdahulu [19]. Menggunakan penyelesaian yang diperoleh daripada persamaan (7,9 dan 11), graf penyelesaian yang diplotkan terhadap masa adalah seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2.

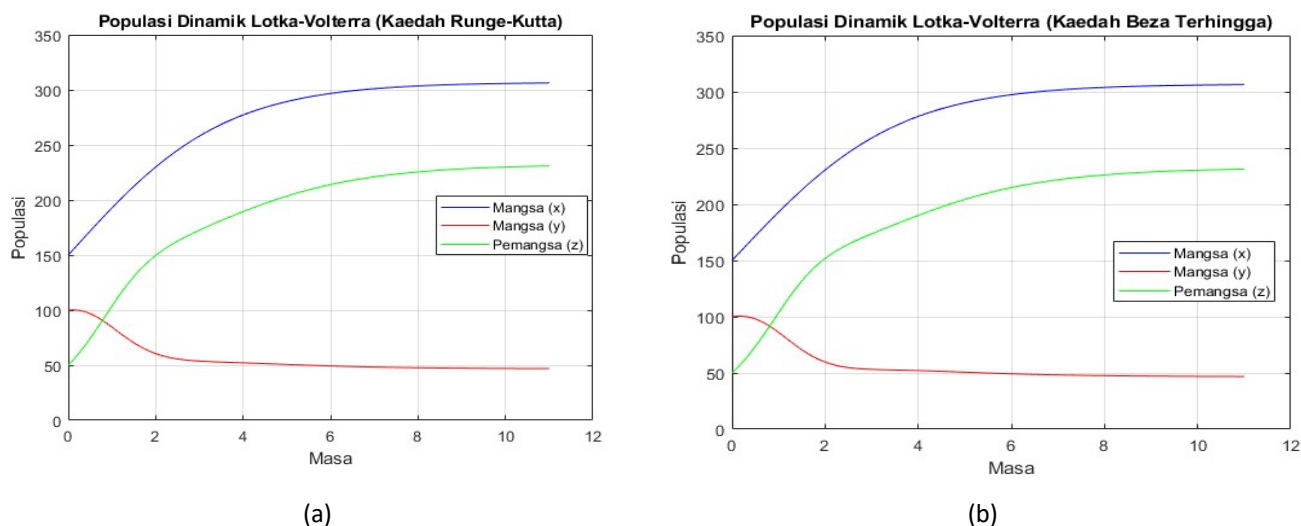


Rajah 2. Graf penyelesaian yang diperoleh menggunakan dua kaedah berangka yang mana parameter $r = 0.3$. Rajah 2(a) menunjukkan graf penyelesaian menggunakan kaedah *Runge-Kutta* Tertib Ke-4. Rajah 2(b) menunjukkan graf penyelesaian yang diperoleh menggunakan kaedah Beza Terhingga

Daripada Rajah 2, dapat diperhatikan bahawa graf $x(t)$, $y(t)$ dan $z(t)$ menunjukkan trend menurun. Ini menunjukkan bahawa populasi penyu laut dan pemangsa marin berkurangan dari masa ke masa. Bagi nilai awal, bilangan telur adalah 150, bilangan anak penyu yang menetas ditetapkan pada 100, dan bilangan pemangsa adalah 50. Telur penyu merupakan sebahagian penting daripada rantai makanan. Rajah 2(a) dan 2(b) menunjukkan bahawa kedua-dua kaedah berangka berjaya menangkap trend asas dalam perubahan populasi yang dimodelkan, menunjukkan tahap persamaan yang tinggi. Memandangkan hal ini berlaku, adalah munasabah untuk menumpukan analisis pada satu kaedah, walaupun terdapat perbezaan dalam kerangka dan tahap kesukaran. Seperti yang dapat diperhatikan daripada Rajah 2, $x(t)$ dan $y(t)$ menurun disebabkan oleh kadar telur yang diletakkan dalam sarang oleh penyu laut dewasa yang rendah. Embrio penyu laut menyerap nutrien daripada telur, berkembang dan berubah menjadi anak penyu. Kadar kelangsungan hidup anak penyu laut adalah sangat rendah, dan makhluk kecil yang mudah terdedah ini menghadapi banyak cabaran sejak saat mereka keluar dari tempurung melalui pemangsa. Pemangsa adalah ancaman yang signifikan, dengan anak penyu menjadi sasaran pemangsa seperti ketam, ikan, burung, jerung dan sotong besar lain sebaik sahaja mereka bergerak ke laut. Perjuangan mereka untuk terus hidup semakin sengit apabila mereka melalui medan pantai, menghadapi halangan seperti serpihan, tumbuh-tumbuhan, dan perubahan landskap yang menghalang kemajuan mereka. Cahaya buatan daripada pembinaan pantai menambah satu lagi lapisan bahaya, menghantar anak penyu tersesat dan mendedahkan mereka kepada risiko yang lebih besar. Bilangan pemangsa marin $z(t)$ meningkat pada mulanya, tetapi dari masa ke masa, ia berkurangan disebabkan oleh makanan yang tidak mencukupi. Dengan bilangan mangsa yang lebih sedikit, setiap mangsa individu menghadapi tekanan pemangsa yang lebih tinggi, menggalakkan penurunan populasi mangsa yang lebih cepat dan boleh menggalakkan kepupusan, terutama bagi spesies yang diketahui mempunyai kadar pembiakan yang rendah. Oleh itu, apabila bilangan mangsa berkurangan, pemangsa bergelut untuk mencari makanan yang mencukupi, membawa kepada kekurangan zat makanan, pengurangan kadar pembiakan, perubahan tingkah laku, kesihatan ekosistem dan kehilangan biodiversiti, dan akhirnya penurunan

populasi pemangsa atau kemungkinan kepupusan juga. Apabila populasi mangsa melebihi populasi pemangsa dalam suatu ekosistem, beberapa perubahan ekologi akan berlaku yang boleh mempengaruhi peningkatan populasi pemangsa. Dalam senario sedemikian, kelimpahan sumber penyu laut menyediakan makanan yang mencukupi untuk pemangsa marin, pada mulanya membawa kepada hasil positif bagi populasi tersebut. Apabila populasi pemangsa marin bertindak balas secara positif terhadap kelimpahan penyu laut, terdapat potensi untuk peningkatan selanjutnya dalam jumlah keseluruhan pemangsa dalam ekosistem.

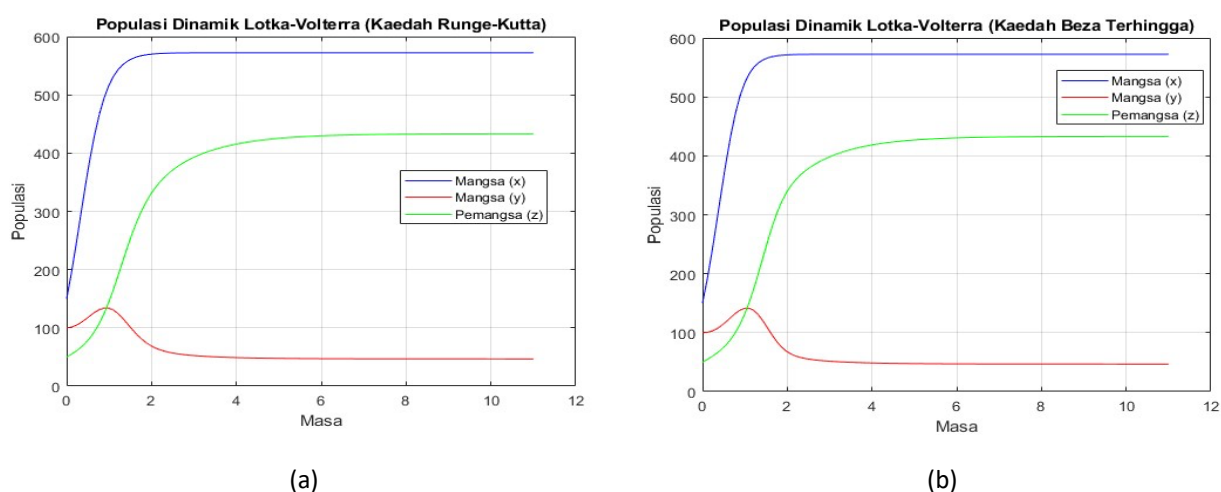
Daripada Rajah 3, dapat diperhatikan bahawa populasi anak penyu $x(t)$ meningkat walaupun terdapat peningkatan populasi pemangsa $z(t)$, manakala populasi penyu dewasa $y(t)$ kekal hampir sama. Hal ini boleh berlaku jika terdapat faktor yang meningkatkan kadar kelangsungan hidup atau apabila persekitaran menyokong lebih banyak anak penyu secara bebas daripada kesan pemangsa. Sifat semula jadi $y(t)$ seperti yang dapat diperhatikan dalam Rajah 3(a) dan 3(b) menunjukkan bahawa populasi penyu laut menurun pada kadar yang sangat perlahan kerana mereka telah membangunkan kemahiran ketahanan hidup dan kemahiran mengelak pemangsaan selama bertahun-tahun, dengan itu, mereka hanya boleh terdedah kepada tekanan pemangsaan yang minimum. Trend peningkatan telur penyu menunjukkan musim bersarang yang berjaya, yang boleh memberi kesan kepada usaha pemuliharaan, keadaan bersarang yang sesuai, dan langkah-langkah perlindungan pantai bersarang. Secara serentak, trend penurunan minimum dalam populasi penyu laut menunjukkan kemunculan anak penyu yang berjaya, menunjukkan bahawa langkah-langkah pemuliharaan menghasilkan keputusan yang bermanfaat. Walau bagaimanapun, dengan peningkatan bilangan anak penyu, pemangsa mungkin menjadi "tepu", menggambarkan bahawa pemangsa memakan sebanyak anak penyu yang mereka perlukan, memberikan peluang hidup yang lebih tinggi untuk anak penyu mencapai peringkat dewasa disebabkan oleh bilangan yang terlalu banyak. Akibatnya, graf tersebut memberikan perspektif menyeluruh tentang hubungan yang saling berkaitan antara telur penyu laut, penyu laut, dan pemangsa marin, mengarahkan dasar-dasar pemuliharaan dan menekankan keperluan untuk ekosistem marin yang seimbang dan sihat.



Rajah 3. Graf penyelesaian yang diperoleh menggunakan dua kaedah berangka yang mana parameter $r = 1.3$. Rajah 3(a) menunjukkan graf penyelesaian menggunakan kaedah *Runge-Kutta* Tertib Ke-4. Rajah 3(b) menunjukkan graf penyelesaian yang diperoleh menggunakan kaedah Beza Terhingga

Dengan mengambil $r = 4$ dapat kita lihat bahawa graf $x(t)$ dan $z(t)$ meningkat, yang menjadi tetap selepas 3 tahun berdasarkan Rajah 4(a) dan 4(b). Bagi kaedah Beza Terhingga, $x(t)$ menjadi stabil selepas 42 ulangan manakala *Runge-Kutta* Tertib ke-4 menjadi stabil pada 50. Penumpuan awal kaedah Beza Terhingga menghasilkan penyelesaian yang kelihatan mencapai keadaan tetap dengan

lebih cepat dalam mensimulasikan perubahan populasi telur penyu laut. Sebaliknya, kaedah *Runge-Kutta* Tertib ke-4, sebagai teknik berangka peringkat tinggi yang mempertimbangkan beberapa langkah pertengahan, mungkin memerlukan lebih banyak pengulangan sebelum mencapai penyelesaian yang stabil. Walau bagaimanapun, kajian ini menunjukkan bahawa apabila $r = 1.3 - 4.0$, kita telah berjaya meningkatkan kadar pembiakan dan penetasan telur. Ini membawa kepada pengeluaran sejumlah besar telur (x), yang boleh tumbuh dengan lebih cepat sambil memudahkan pengeluaran anak penyu berlebihan yang tidak dapat dihapuskan oleh pemangsa dengan cepat. Sifat populasi penyu laut $y(t)$ berada pada tahap puncaknya pada tahun pertama, tetapi selepas itu, ia perlahan-lahan menurun. Paradoks bilangan telur yang banyak tetapi bilangan yang berkurangan menunjukkan bahawa, walaupun pembiakan yang cemerlang, penyu laut menghadapi cabaran yang besar pada pelbagai peringkat kitaran hidupnya, termasuk tempoh panjang 13-15 tahun sebelum mencapai kematangan yang boleh menimbulkan bahaya serius dan mengancam kelangsungan hidup spesies terancam ini. Kebimbangan yang berpotensi termasuk peningkatan pemangsaan terhadap telur dan anak penyu yang mudah terdedah, kemerosotan habitat, kemalangan berkaitan penangkapan ikan, kesan perubahan iklim terhadap tempat bersarang, dan bahaya pencemaran. Apabila populasi penyu laut berkurangan, pemangsa marin yang bergantung kepada mereka untuk makanan menghadapi implikasi yang mendalam. Pengurangan ini mengganggu keseimbangan halus ekosistem marin, yang boleh memulakan tindak balas berantai yang mempengaruhi kuantiti dan kelakuan pemangsa peringkat tinggi. Kesan-kesannya mungkin termasuk corak migrasi yang berubah, peningkatan persaingan untuk sumber makanan yang terhad, dan penurunan populasi di kalangan pemangsa marin. Dalam jaringan ketergantungan yang rumit ini, nasib penyu laut merupakan petunjuk penting bagi kesihatan keseluruhan ekosistem marin.



Rajah 4. Graf penyelesaian yang diperoleh menggunakan dua kaedah berangka yang mana parameter $r = 4$. Rajah 4(a) menunjukkan graf penyelesaian menggunakan kaedah *Runge-Kutta* Tertib Ke-4. Rajah 4(b) menunjukkan graf penyelesaian yang diperoleh menggunakan kaedah Beza Terhingga

Usaha pemuliharaan adalah penting untuk menangani ancaman pelbagai aspek dan mengurangkan kesan berantai yang berpotensi terhadap pemangsa marin dan persekitaran marin yang lebih luas. Hubungan simbiosis ini dicirikan oleh keseimbangan yang halus, kerana populasi mangsa dan pemangsa saling bergantung dan saling mempengaruhi satu sama lain. Kajian ini menunjukkan bahawa apabila terdapat banyak telur (atau anak penyu), pemangsa mungkin tidak dapat memakan semuanya selepas mereka menjadi tepu. Akibatnya, kajian ini menunjukkan bahawa meningkatkan keadaan yang menyokong kadar pembiakan atau penetasan yang tinggi boleh

meningkatkan populasi penyu laut berbanding tekanan pemangsaan dengan meningkatkan tapak bersarang, memperbaiki keadaan habitat, dan mengatasi faktor kematian lain yang boleh menghalang kadar pertumbuhan yang lebih tinggi. Penyu laut adalah penting dan pemuliharaan mereka di seluruh dunia, termasuk Malaysia, mempunyai manfaat ekologi, sosio-ekonomi, dan kepentingan pelbagai budaya. Mereka membentuk sebahagian penting daripada rangkaian makanan marin, berfungsi sebagai penunjuk dalam menilai kesihatan lautan dan membantu dalam mengekalkan populasi rumpai laut, yang bertindak sebagai tapak pembiakan untuk pelbagai organisma marin, dan memupuk biodiversiti, dan meningkatkan daya tahan ekologi. Selain itu, turun naik dalam populasi penyu laut boleh mendedahkan perkara alam sekitar yang serius, menawarkan pandangan tentang kesihatan marin, termasuk tahap pencemaran dan kesan perubahan iklim. Pemuliharaan penyu laut di Malaysia berpotensi untuk meningkatkan ekonomi tempatan, menyediakan pekerjaan dalam industri perhotelan, pemandu pelancong, dan pemuliharaan, ia boleh membawa masuk sejumlah besar wang daripada ekonomi pelancongan, terutama di Pulau Redang dan Chagar Hutang.

Walaupun bagaimanapun, terdapat beberapa halangan alam sekitar, undang-undang, dan ekonomi untuk perlindungan penyu laut. Populasi penyu terjejas secara tidak sengaja oleh taktik penangkapan ikan, terutama tangkapan sampingan daripada kaedah konvensional, dan mungkin sukar untuk mengamalkan kaedah penangkapan ikan yang lebih mampan di kawasan di mana penangkapan ikan menyara kehidupan setempat. Selain itu, tapak bersarang terjejas oleh urbanisasi pantai untuk industri dan pelancongan, memerlukan pembahagian zon kawasan dan undang-undang yang sesuai untuk memelihara tempat-tempat penting. Pembiayaan untuk pemuliharaan sering kali terhad, yang menekankan keperluan kerjasama antarabangsa serta strategi pembiayaan mampan seperti ekonomi pelancongan dan levi pemuliharaan. Perbezaan undang-undang negeri demi negeri dalam undang-undang penuaian telur menghasilkan perlindungan yang tidak sekata; satu strategi tunggal boleh meningkatkan hasil pemuliharaan.

5. Rumusan

Kajian menyeluruh mengenai perubahan populasi penyu laut di Pantai Chagar Hutang, Malaysia, menekankan keperluan segera untuk memelihara spesies marin ini dalam konteks ekosistem yang kompleks dan saling berkaitan. Pengenalan model populasi penyu berstruktur peringkat digabungkan dengan dinamika pemangsaan *Lotka-Volterra* mencerminkan usaha untuk menyesuaikan model tersebut dengan cabaran dan keadaan khusus kawasan kajian. Pemodelan matematik perubahan populasi penyu laut di Pantai Chagar Hutang telah menghasilkan pandangan berharga mengenai hubungan yang rumit antara penyu laut, telur mereka, dan pemangsa marin. Penyelesaian berangka yang diperoleh melalui kaedah Beza Terhingga dan kaedah *Runge-Kutta* Tertib ke-4, telah menyerlahkan ketepatan kaedah Beza Terhingga, khususnya dalam menilai kestabilan kadar telur yang diletakkan dalam sarang oleh penyu laut dewasa. Menjelajah senario dengan kadar telur yang diletakkan dalam sarang oleh penyu laut dewasa yang berbeza telah mendedahkan kerentanan anak penyu laut terhadap pemangsaan dan cabaran persekitaran, menekankan peranan penting musim bersarang yang berjaya dalam pertumbuhan populasi. Kami telah meneroka senario yang berbeza dengan kadar telur yang diletakkan dalam sarang oleh penyu laut dewasa yang berbeza (rendah, sederhana, dan tinggi). Apabila kadarnya rendah, kedua-dua populasi penyu laut dan pemangsa marin berkurangan dari masa ke masa, menekankan kerentanan anak penyu laut terhadap pemangsaan dan cabaran persekitaran. Sebaliknya, apabila kadarnya tinggi, populasi penyu laut dan pemangsa meningkat, menyerlahkan kesan musim bersarang yang berjaya terhadap usaha pemuliharaan. Walaupun kajian ini menekankan kepentingan usaha pemuliharaan, adalah penting

untuk diperhatikan bahawa program pemuliharaan yang mampan adalah penting. Inisiatif ini perlu memberi tumpuan kepada menangani ancaman yang dikenal pasti, termasuk perlindungan habitat, mengurangkan risiko pemangsaan, dan mengurangkan kesan yang disebabkan oleh manusia. Amalan yang mampan perlu memastikan kelangsungan hidup penyu laut jangka panjang sambil mengekalkan keseimbangan halus ekosistem marin. Walau bagaimanapun, penting untuk mengakui keterbatasan model matematik tersebut. Model tersebut menyederhanakan interaksi ekologi yang kompleks dan mungkin tidak sepenuhnya menangkap semua faktor yang mempengaruhi populasi penyu laut. Iterasi masa depan model tersebut boleh mendapat manfaat daripada memasukkan pemboleh ubah ekologi tambahan, mempertimbangkan hubungan pemangsa-mangsa yang lebih rumit, dan menyempurnakan andaian untuk meningkatkan ketepatan.

Penghargaan

Penyelidikan ini dibiayai oleh Universiti Sains Malaysia.

Rujukan

- [1] Mishra, Yogesh. "Biodiversity conservation: strategies for future." *Indian Journal of Life Sciences* 5, no. 2 (2016): 101-105.
- [2] Bentos, Adriel Barboza, Anderson de Souza Gallo, Nathalia de França Guimarães, Maicon Douglas Bispo de Souza, Rubismar Stolf, and Maria Teresa Mendes Ribeiro Borges. "Rapid assessment of habitat diversity along the Araras Stream, Brazil." *Floresta e Ambiente* 25, no. 1 (2018): e20160024. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.002416>
- [3] Fontes, Jassiel VH, Paulo RR de Almeida, Irving D. Hernández, Harlysson WS Maia, Edgar Mendoza, Rodolfo Silva, Elvis JO Santander, Rayrima TSF Marques, Nádia Letícia do N. Soares, and Ricardo Almeida Sanches. "Marine Accidents in the Brazilian Amazon: Potential Risks to the Aquatic Environment." *Sustainability* 15, no. 14 (2023): 11030. <https://doi.org/10.3390/su151411030>
- [4] Mu, Xiyan, Lilai Yuan, Shunlong Meng, Ying Huang, Jiazhang Chen, and Yingren Li. "Significant decline of water pollution associated with inland fishery across China." *Eco-Environment & Health* 2, no. 2 (2023): 79-87. <https://doi.org/10.1016/j.eehl.2023.05.002>
- [5] Nazri, Mohd Khairul Hanif Mohd, and Norzahir Sapawe. "A short review on photocatalytic reaction in diesel degradation." *Materials Today: Proceedings* 31 (2020): A33-A37. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.965>
- [6] Fussmann, Gregor F., Guntram Weithoff, and Takehito Yoshida. "A direct, experimental test of resource vs. consumer dependence." *Ecology* 86, no. 11 (2005): 2924-2930. <https://doi.org/10.1890/04-1107>
- [7] Chakraborty, S., S. Pal, and N. Bairagi. "Predator-prey interaction with harvesting: mathematical study with biological ramifications." *Applied Mathematical Modelling* 36, no. 9 (2012): 4044-4059. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.11.029>
- [8] Darimont, Chris T., Caroline H. Fox, Heather M. Bryan, and Thomas E. Reimchen. "The unique ecology of human predators." *Science* 349, no. 6250 (2015): 858-860. DOI: [10.1126/science.aac4249](https://doi.org/10.1126/science.aac4249)
- [9] Thomson, Scott, Steve Irwin, and Terri Irwin. "Harriet, the Galapagos tortoise: disclosing one and a half centuries of history." *Intermontanus* 4, no. 5 (1995): 33-35.
- [10] Poley, Lyle, Joseph W. Baron, and Tobias Galla. "Generalized Lotka-Volterra model with hierarchical interactions." *Physical Review E* 107, no. 2 (2023): 024313. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.107.024313>
- [11] Clenet, Maxime, François Massol, and Jamal Najim. "Equilibrium and surviving species in a large Lotka-Volterra system of differential equations." *Journal of Mathematical Biology* 87, no. 1 (2023): 13. doi: 10.48550/ARXIV.2205.00735.
- [12] Sathasivam, Saratha, Salaudeen Abdulwaheed Adebayo, Muraly Velavan, Tan Ho Yee, and Teoh Pei Yi. "Transmission of hepatitis B dynamics in Malaysia using modified SIS hybrid model with Euler and Runge-Kutta method." In *AIP Conference Proceedings*, vol. 3016, no. 1. AIP Publishing, 2024. <https://doi.org/10.1063/5.0192493>
- [13] Hossen, Murad, Zain Ahmed, Rashadul Kabir, and Zakir Hossan. "A comparative investigation on numerical solution of initial value problem by using modified Euler method and Runge Kutta method." *IOSR Journal of Mathematics (IOSR-JM) e-ISSN* (2019): 2278-5728. DOI: 10.9790/5728-1504034045
- [14] Side, Syafruddin, and Ahmad Zaki. "Numerical Solution of the Mathematical Model of DHF Spread using the Runge-Kutta Fourth Order Method." *ARRUS Journal of Mathematics and Applied Science* 2, no. 2 (2022): 92-100. <https://doi.org/10.35877/mathscience745>

- [15] Ashgi, Rizky, Mochammad Andhika Aji Pratama, and Sri Purwani. "Comparison of numerical simulation of epidemiological model between Euler method with 4th order Runge Kutta method." *International Journal of Global Operations Research* 2, no. 1 (2021): 37-44. doi: 10.47194/ijgor.v2i1.67
- [16] Jiménez, Salvador. "Derivation of the discrete conservation laws for a family of finite difference schemes." *Applied Mathematics and Computation* 64, no. 1 (1994): 13-45. [https://doi.org/10.1016/0096-3003\(94\)90137-6](https://doi.org/10.1016/0096-3003(94)90137-6)
- [17] Çavuşoğlu, Semih, and Oktay Sh Mukhtarov. "A new finite difference algorithm for boundary value problems involving transmission conditions." *e-Journal of Analysis and Applied Mathematics* 2022, no. 1: 1-13. doi: 10.2478/ejaam-2022-0001
- [18] Babuba, Sunday, P. Tumba, A. I. Bakari, and Ibrahim Aliyu Bye-Pass. "Analysis of a New Numerical Approach to Solutions of Heat Conduction Equations Arising from Heat Diffusion." <https://dx.doi.org/10.4314/dujopas.v8i1b.6>
- [19] Bjørndal, Karen A., Alan B. Bolten, and Milani Y. Chaloupka. "Green turtle somatic growth model: evidence for density dependence." *Ecological applications* 10, no. 1 (2000): 269-282. doi: 10.1890/1051-0761(2000)010[0269:GTSGME]
- [20] Wyneken, J., T. J. Burke, M. Salmon, and D. K. Pedersen. "Egg failure in natural and relocated sea turtle nests." *Journal of herpetology* (1988): 88-96. <https://doi.org/10.2307/1564360>
- [21] Abella, Elena, Rosa María García-Cerdá, and Adolfo Marco. "Estimating the fertilization rate of sea turtle nests: comparison of two techniques." *Basic and Applied Herpetology* 31 (2017): 33-44. <https://doi.org/10.11160/bah.57>
- [22] IAC Secretariat, "An Introduction to sea turtles of the world.," 2000.
- [23] Gyuris, E. "The rate of predation by fishes on hatchlings of the green turtle (*Chelonia mydas*). " *Coral Reefs* 13 (1994): 137-144. doi: [10.1007/bf00301189](https://doi.org/10.1007/bf00301189)