

MODEL DINAMIKA PREDATOR-PREY PADA EKOSISTEM PENDIDIKAN DIGITAL

Miswanto[□]

Departemen Matematika Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Airlangga

□ miswanto@fst.unair.ac.id

Kata Kunci:
Model Predator-
Prey, Sistem
Pendidikan
Digital, Sistem
Nonlinear, Analisis
Kestabilan,
Simulasi Numerik.

Tipe Artikel:
Hasil penelitian

Abstrak

Ekosistem pendidikan digital merupakan sistem dinamis yang dipengaruhi oleh interaksi kompleks antar komponennya. Penelitian ini memperkenalkan model predator-prey dengan tiga populasi pada ekosistem pendidikan digital. Model ini menangkap pertumbuhan dan interaksi timbal balik antar populasi dalam sistem pendidikan digital secara nonlinier. Analisis model dilakukan melalui analisis kestabilan titik setimbang model dan simulasi numerik untuk mendukung kajian analitik dengan mengubah nilai parameter yang berpengaruh. Berdasarkan hasil analitik diperoleh tiga titik setimbang, yaitu kepunahan populasi yang tidak stabil, titik setimbang bebas populasi guru dan kebijakan yang stabil bersyarat, yaitu dan titik setimbang koeksistensi. Hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa dengan memperkecil nilai , maka titik setimbang koeksistensi menjadi tidak stabil. Model ini menawarkan kerangka matematis yang fleksibel untuk mengevaluasi dampak intervensi dan inovasi dalam pendidikan digital.

© 2026 SENTRATAMA

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi digital telah mendorong transformasi signifikan dalam pendidikan, terutama pada pembelajaran jarak jauh. Anderson dan Dron [1] menunjukkan bahwa evolusi pedagogi jarak jauh dapat dibagi menjadi tiga generasi, mulai dari pendekatan behavioristik hingga konektivistik, yang menekankan pentingnya jaringan pengetahuan dalam proses belajar. Pandangan ini diperkuat oleh Bates [2], yang menekankan bahwa pengintegrasian teknologi dalam pendidikan mengubah peran pendidik, desain kurikulum, dan strategi pembelajaran, sekaligus menuntut adaptasi sistem pendidikan yang lebih fleksibel.

Dalam konteks pendidikan formal di Indonesia, Fikri et al. [3] menggunakan model predator-prey untuk mensimulasikan strategi sekolah dalam meningkatkan jumlah dan kualitas lulusan yang diterima melalui seleksi nasional, menunjukkan bahwa kompetisi antar sekolah dapat dianalisis dengan pendekatan matematis. Hal ini sejalan dengan penelitian Gepak et al. [4], yang menganalisis kestabilan model predator-prey dalam dinamika sosial, menekankan bahwa interaksi antar kelompok dalam masyarakat yang beragam, termasuk kompetisi dapat menghasilkan ketidakseimbangan dalam ekosistem.

Selain itu, Ginovart [5] menyoroti pentingnya *individual-based modeling* untuk memahami sistem predator-prey dalam pembelajaran sains, sehingga mahasiswa dapat mengamati interaksi populasi secara langsung dan mempelajari konsep kompleks melalui simulasi. Hanizah [6] menambahkan kompleksitas lebih lanjut dengan memasukkan populasi prey terinfeksi dan kompetisi predator, memperlihatkan bagaimana gangguan internal dapat mempengaruhi stabilitas sistem. Menale dan Venturino [7] kemudian mengembangkan pendekatan teori kinetik untuk memodelkan ekosistem predator-prey dengan berbagai tingkat keahlian, menganalisis kestabilan dan mensimulasikan untuk melihat pengaruh nilai parameter terhadap kestabilan titik setimbang model.

Pendekatan model predator-prey dapat diperluas ke sistem berlapis, seperti yang ditunjukkan Putri dan Savitri [8] melalui model prey-predator-super predator dengan fungsi respon Holling tipe I dan II, yang memberikan gambaran tentang interaksi hirarkis dalam sebuah ekosistem. Kemudian Rogers [9], mengkaji teknologi dalam ekosistem pendidikan dipengaruhi oleh karakteristik inovasi, struktur sosial, dan jaringan komunikasi.

Selain itu, Teräs [10] menekankan bahwa diskusi tentang pendidikan dan teknologi harus mempertimbangkan isu global dan tantangan implementasi digital, termasuk kesenjangan akses dan kesiapan institusi pendidikan. UNESCO [11] menegaskan perlunya kebijakan pendidikan pasca-COVID yang inklusif, adaptif, dan berfokus pada pemerataan akses, sementara Voskoglou [12] menunjukkan bahwa teori konektivitas semakin relevan dibandingkan teori pembelajaran tradisional karena menekankan peran jaringan, kolaborasi, dan akses informasi dalam proses belajar di era digital.

Berdasarkan kajian artikel di atas, penelitian ini membahas tentang pendekatan model predator prey untuk menganalisis dinamika interaksi antara inovasi teknologi (*predator*) dan metode pembelajaran konvensional (*prey*) dalam ekosistem pendidikan digital. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi ketidakseimbangan, prediksi pola adaptasi, serta strategi untuk mencapai stabilitas dan keberlanjutan sistem pendidikan modern.

MODEL MATEMATIKA

Penelitian ini mengkaji pendekatan model matematika pada dunia Pendidikan. Adapun model yang dikaji adalah model dinamika predator-prey pada ekosistem pendidikan digital. Populasi pada model penelitian ini dibagi menjadi tiga populasi, yaitu populasi siswa (S), populasi guru (G), dan populasi kebijakan (K). Pertumbuhan siswa secara logistik. Adapun interaksi antar populasi menggunakan fungsi respon Holling tipe I. Nilai awal ketiga populasi: S_0, G_0, K_0 , sedangkan parameter model diasumsikan:

$$r, K_p, K_T, \beta, \theta, \delta, \gamma, \lambda, \alpha, \omega, \sigma > 0$$

Penelitian ini mengkaji kestabilan titik setimbang model dengan memperhatikan pengaruh parameter model terhadap kestabilan titik setimbang model. Adapun modelnya diformulasikan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dt} &= rP \left(1 - \frac{P}{K_p} \right) - \beta PT - \theta PH \\ \frac{dT}{dt} &= \delta PT \left(1 - \frac{T}{K_T} \right) - \gamma T - \lambda TH \\ \frac{dH}{dt} &= \alpha PT + \omega TH - \sigma H \end{aligned}$$

Tabel berikut menjelaskan tentang variabel dan parameter model, sebagai berikut:

Tabel 1. Variabel model

Simbol	Nama Variabel	Makna dalam Ekosistem Pendidikan Digital
$P(t)$	Siswa	Jumlah peserta didik tiap satuan waktu.
$T(t)$	Guru	Jumlah guru tiap satuan waktu.
$H(t)$	Kebijakan	Jumlah kebijakan tiap satuan waktu dalam proses pendidikan

Tabel2. Parameter model

Simbol	Makna dalam Model
r	Laju pertumbuhan peserta didik
K_p	Kapasitas maksimal peserta didik
β	Pengaruh guru terhadap peserta
θ	Pengaruh kebijakan terhadap peserta
δ	Penguatan guru oleh peserta
K_T	Kapasitas maksimal guru
γ	Laju penurunan kapasitas guru

λ	Pengaruh kebijakan terhadap guru
α	Kontribusi interaksi P–T terhadap kebijakan
ω	Kontribusi interaksi T–H terhadap kebijakan
σ	Laju penurunan kebijakan

PEMBAHASAN

ANALISIS MODEL

Pada bagian ini dibahas tentang keterbatasan solusi, eksistensi titik setimbang dan analisis kestabilan lokal. Berikut ini dijelaskan tentang keterbatasan solusi dari model.

1. KETERBATASAN SOLUSI

Model di atas merupakan model matematika, yaitu sistem persamaan diferensial nonlinier yang merupakan model predator prey untuk menggambarkan dinamika pendidikan pada interaksi tiga populasi, yaitu siswa, guru dan kebijakan. Pada sebuah model yang sering menjadi tujuan adalah kestabilan. Oleh karena itu, keterbatasan model diperlukan untuk memastikan solusinya realistis dan stabil. Berikut pembahasan keterbatasan Solusi.

Teorema 1 Keterbatasan solusi

Semua solusi model (2) dengan nilai awal $P(0), T(0), H(0) \in R_+^3$ adalah terbatas. Lebih lanjut solusi tersebut akan konvergen ke suatu daerah terbatas:

$$\Omega = \left\{ (P, T, H) \in R_+^3 \mid 0 < N < \frac{C}{\rho} \right\}$$

Untuk $t \rightarrow \infty$ dengan $N = P + T + H$.

Bukti: Misalkan $P(t), T(t), H(t)$ adalah solusi model (2) dengan semua parameter model bernilai positif, maka berdasarkan persamaan pertama model (2) diperoleh:

$$\frac{dP}{dt} = rP \left(1 - \frac{P}{K_p} \right) - \beta PT - \theta PH \leq rP \left(1 - \frac{P}{K_p} \right).$$

Hal ini berarti:

$$\sup \sup P(t) = K_p.$$

Sekarang, perhatikan:

$$\frac{dT}{dt} = \delta PT \left(1 - \frac{T}{K_T}\right) - \gamma T - \lambda TH \leq \delta PT \left(1 - \frac{T}{K_T}\right)$$

Hal ini berarti untuk $P(0) = P_0$, maka

$$\sup \sup T(t) = K_T.$$

Misalkan $N = P + T + H$, maka diperoleh:

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dt} &= \frac{dP}{dt} + \frac{dT}{dt} + \frac{dH}{dt} \\ &= rP \left(1 - \frac{P}{K_p}\right) - \beta PT - \theta PH + \delta PT \left(1 - \frac{T}{K_T}\right) - \gamma T - \lambda TH + \alpha PT + \omega TH - \sigma H \\ &\leq rP \left(2 - \frac{P}{K_p}\right) + \delta PT \left(1 - \frac{T}{K_T}\right) + \alpha PT - (\lambda - \omega)TH - rP - \gamma T - \sigma H \\ &\leq K_p + K_p K_T + \alpha K_p K_T - rP - \gamma T - \sigma H, \end{aligned}$$

misalkan $\rho = (r, \gamma, \sigma)$ dan $C = K_p + (1 + \alpha)K_p K_T$, maka diperoleh:

$$\frac{dN}{dt} \leq C - \rho N.$$

Hal ini berarti

$$0 < N(t) \leq \frac{C}{\rho} + K e^{-\rho t}$$

Hal ini berakibat untuk $t \rightarrow \infty$, diperoleh:

$$0 < N(t)$$

$$\leq \frac{C}{\rho}$$

2. EKSISTENSI DAN KESTABILAN TITIK SETIMBANG

Pada bagian ini, eksistensi titik setimbang pada model (2) dianalisis. Berdasarkan hasil analisis diperoleh tiga titik setimbang, yaitu kepunahan populasi ($E_0(0,0,0)$), titik setimbang bebas populasi guru dan kebijakan ($E_1(K_p, 0, 0)$). Titik setimbang ini diperoleh berdasarkan solusi dari:

$$\begin{aligned} rP \left(1 - \frac{P}{K_p}\right) - \beta PT - \theta PH &= 0 \quad \delta PT \left(1 - \frac{T}{K_T}\right) - \gamma T - \lambda TH \\ &= 0 \quad \alpha PT + \omega TH - \sigma H &= 0 \end{aligned}$$

Titik kesetimbangan koeksistensi ($E_2(P^*, T^*, H^*)$) merupakan solusi dari sistem persamaan di atas dengan kondisi $P^* \neq 0, T^* \neq 0$ dan $H^* \neq 0$. Pada dasarnya, titik tersebut adalah titik

potong yang berada pada **oktan positif** dari sistem persamaan tersebut. Berdasarkan sistem persamaan yang diberikan, dapat dilihat bahwa titik kesetimbangan koeksistensi bergantung pada nilai parameter. Oleh karena itu, sistem persamaan tersebut harus diselesaikan untuk memperoleh titik kesetimbangan koeksistensi. Namun, karena solusi analitik tidak dapat ditunjukkan, diperlukan perhitungan numerik untuk menentukan titik kesetimbangan koeksistensi.

Selanjutnya dianalisis kestabilan titik setimbang yang diperoleh. Pada bagian ini, disajikan kestabilan lokal dari masing-masing 3 titik kesetimbangan model. Selain itu, juga disajikan bagaimana beberapa nilai parameter model yang mempengaruhi perubahan kestabilan titik setimbang model (2). Pertama-tama dilakukan linierisasi model dengan matrik Jacobian di sekitar titik setimbang yang diperoleh. Linierisasi model dengan matrik Jacobian diperoleh sebagai berikut:

$$J = (J_1 - \beta P - \theta P J_2 J_3 - \lambda T \alpha T \omega H + \alpha P \omega T - \sigma)$$

dengan

$$J_1 = -\frac{HK1\theta + K1T\beta - K1r + 2Pr}{K1}$$

$$J_2 = \frac{\delta T(K2 - T)}{K2}$$

$$J_3 = \frac{\delta P(K2 - 2T)}{K2} - \gamma - \lambda H$$

Kestabilan titik setimbang:

- $E_0(0,0,0)$

Matrik Jacobian pada $E_0(0,0,0)$, diberikan sebagai berikut:

$$J_{E_0} = (r \ 0 \ 0 \ 0 - \gamma \ 0 \ 0 \ 0 - \sigma)$$

Nilai eigen dari matrik tersebut adalah: r , $-\gamma$ dan $-\sigma$. Hal ini berarti titik setimbang E_0 tidak stabil.

- $E_1(K_p, 0, 0)$

Matrik Jacobian pada $E_1(K_p, 0, 0)$, diberikan sebagai berikut:

$$J_{E_1} = (-r - \beta K_p - \theta K_p \ 0 \ \delta K_p - \gamma \ 0 \ 0 \ \delta K_p - \sigma)$$

Nilai eigen dari matrik tersebut adalah: $-r$, $-\sigma$ dan $\delta K_p - \gamma$. Hal ini berarti titik setimbang E_1 stabil asimtotis bersyarat, yaitu $\delta K_p < \gamma$.

- $E_2(P^*, T^*, H^*)$

Matrik Jacobian pada $E_2(P^*, T^*, H^*)$, diberikan sebagai berikut:

$$J_{E_2} = \begin{pmatrix} -\frac{H^*K_1\theta + K_1T^*\beta - K_1r + 2P^*r}{K_1} - \beta P^* - \theta P^* \frac{T^*(K_2 - T^*)}{K_2} \frac{P^*(K_2 - 2T^*)}{K_2} \\ -\gamma - \lambda H^* - \lambda T^* \frac{T^*}{H^*} + \alpha P^* \frac{T^*}{H^*} - \sigma \end{pmatrix}$$

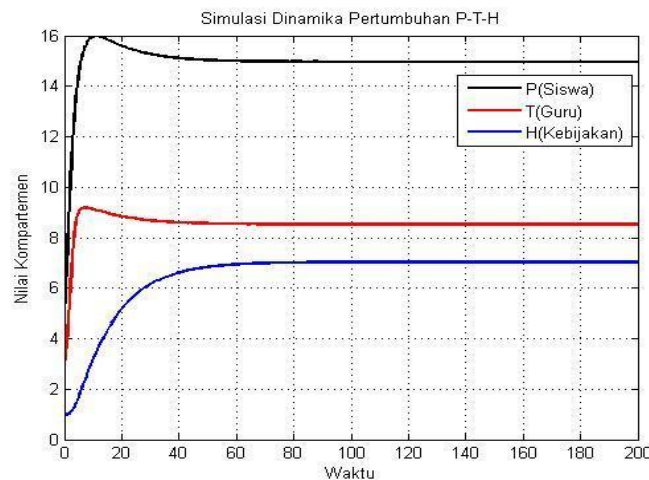
Nilai eigen dari matrik tersebut sulit untuk diperoleh oleh karena itu analisis kestabilannya menggunakan bidang phase.

4. SIMULASI NUMERIK

Pada bagian ini dibahas simulasi numerik berdasarkan hasil analitik. Simulasi numerik yang dilakukan menggunakan program MATLAB untuk memvalidasi hasil analitik. Nilai parameter model yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$r = 0.6; K_p = 25; \beta = 0.02; \theta = 0.01; \delta = 0.1; K_T = 10; \gamma = 0.08; \lambda = 0.02; \alpha = 0.003; \\ \omega = 0.003; \sigma = 0.08.$$

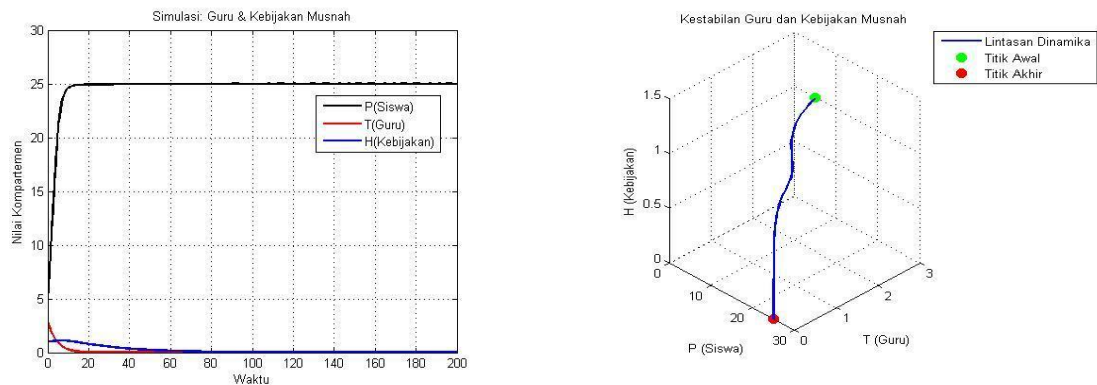
dengan nilai awal $P(0) = 5, T(0) = 3, H(0) = 1$. Berikut simulasi numerik pertumbuhan ketiga populasi.



Gambar 1. Pertumbuhan Populasi

Selanjutnya ditunjukkan simulasi numerik kestabilan titik setimbang E_1 , dengan nilai parameternya adalah:

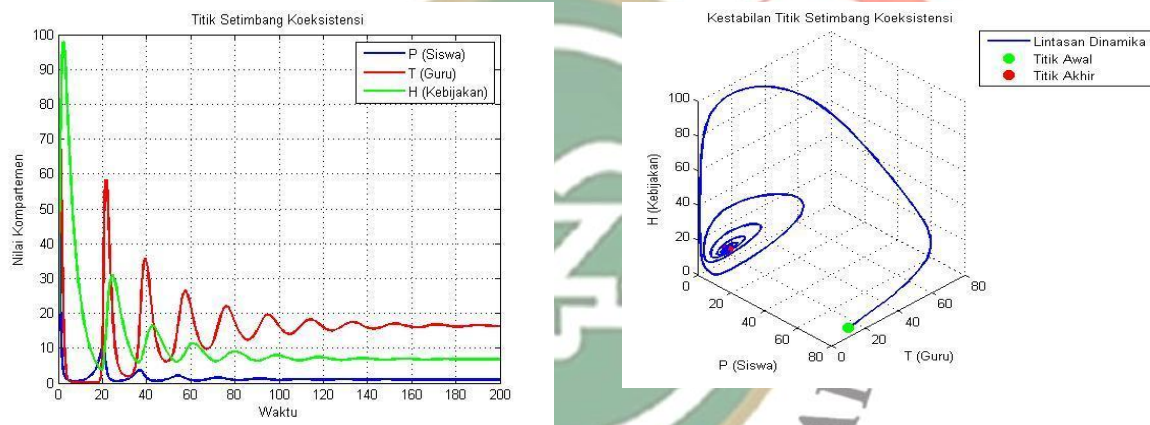
$$r = 0.6; K_p = 25; \beta = 0.02; \theta = 0.01; \delta = 0.001; K_T = 10; \gamma = 0.2; \lambda = 0.05; \alpha = 0.003; \\ \omega = 0.003; \sigma = 0.08.$$



Gambar 2. Kestabilan Titik Setimbang Kemusnahan Guru dan Kebijakan

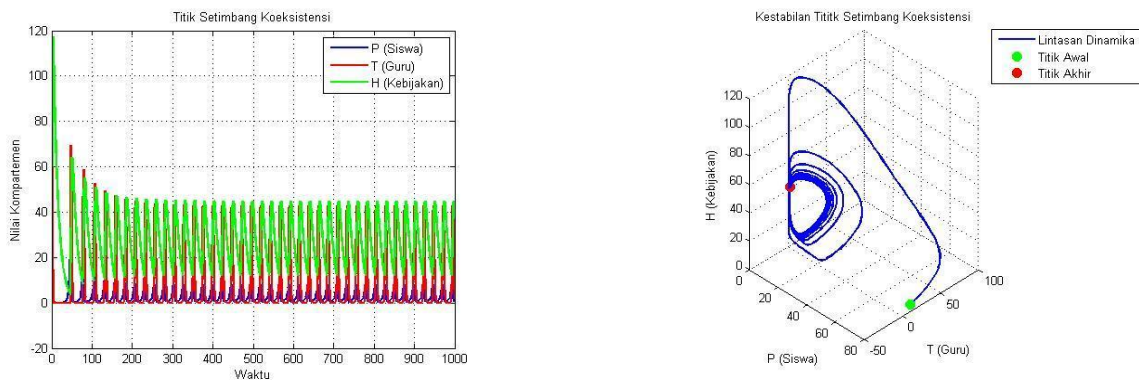
Berikut adalah simulasi titik setimbang koeksistensi, nilai parameter yang digunakan adalah:

$$r = 0.4; K_p = 100; \beta = 0.02; \theta = 0.01; \delta = 0.3; K_T = 80; \gamma = 0.1; \lambda = 0.02; \alpha = 0.015; \\ \omega = 0.01; \sigma = 0.2.$$



Gambar 3. Kestabilan Titik Setimbang Koeksistensi

Selanjutnya akan diubah nilai sigma (σ) menjadi lebih kecil, yaitu dari 0.2 menjadi 0.09 dan waktunya juga diperbesar menjadi $t = 1000$. Adapun simulasinya adalah sebagai berikut:



Gambar 4. Ketidak Stabilan Titik Setimbang Koeksistensi

Berdasarkan analisis kestabilan pada gambar 3 dan 4, terlihat bahwa dengan memperkecil nilai σ terjadi perubahan kestabilan, dari titik setimbang yang stabil menjadi tidak stabil.

5. KESIMPULAN

Perkembangan teknologi dalam dunia pendidikan telah menciptakan perubahan mendasar dalam ekosistem pembelajaran. Melalui pendekatan model predator-prey, artikel ini menggambarkan bagaimana interaksi antara siswa-guru dan kebijakan dapat menjaga kestabilan pendidikan.

Berdasarkan analisis kestabilan, titik setimbang bebas populasi guru bersifat stabil asimtotis apabila memenuhi kondisi . Kondisi ini menunjukkan bahwa meskipun terdapat interaksi antara siswa dan guru, tingkat pertumbuhan guru yang dipicu oleh keberadaan siswa tidak cukup kuat untuk menutupi laju penurunan guru. Dengan demikian, jika syarat tersebut berlaku, populasi guru akan menurun menuju nol sehingga proses pendidikan tidak dapat berlangsung dengan baik.

Sedangkan berdasarkan simulasi numerik diperoleh, yaitu titik setimbang koeksistensi, simulasi dengan parameter awal menunjukkan keadaan stabil (Gambar 3), di mana ketiga populasi dapat bertahan bersama dalam jangka panjang sesuai prediksi analitik. Namun, ketika parameter diperkecil dari 0.2 menjadi 0.09, titik setimbang koeksistensi berubah menjadi tidak stabil (Gambar 4). Hal ini menegaskan bahwa nilai σ memiliki peran penting dalam kestabilan sistem, yaitu semakin kecil nilai titik setimbang koeksistensi model cenderung tidak stabil. Hal ini berarti bahwa tanpa kebijakan, proses pendidikan tetap dapat berjalan **hanya jika** kemampuan pertumbuhan guru akibat interaksi dengan siswa lebih besar daripada laju penurunannya.

DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, T., dan Dron, J. (2011), Three generations of distance education pedagogy, *The International Review of Research in Open and Distributed Learning*, 12(3), 80–97.
- Bates, T. (2019), *Teaching in a digital age*, Vancouver, Tony Bates Associates Ltd., Second Edition.
- Fikri, M.F., Arifin, H.M., Perkasa, R.F., Yaqin, M.A. (2022), Simulasi Strategi Sekolah Dengan Model Predator-Prey Pada Jumlah dan Kualitas Lulusan yang Diterima SNMPTN, *Journal of Computer Science and Applied Informatics*, 4(1), 34–41.
- Gepak, L.R.B., Miswanto, dan Alfiniyah, C. (2022), Analisis kestabilan model matematika predator-prey pada dinamika social, *Contemporary Mathematics and Applications*, vol. 4(1),

pp. 28-41.

Ginovart, M. (2014), Discovering the Power of Individual-Based Modelling in Teaching and Learning: The Study of a Predator–Prey System, *Journal of Science Education and Technology*, vol. 23, pp. 496–513.

Hanizah, A. (2021), Analisis dinamik model predator–prey dengan adanya prey terinfeksi dan kompetisi pada predator, *Jurnal Ilmiah Matematika*, 9(1), 180–188.

Menale, M., and Venturino, E. (2024), A kinetic theory approach to modeling prey–predator ecosystems with expertise Level: analysis, simiations and stability considerations, *Computational and Applied Mathematics*, 43:216.

Putri, A.P., dan Savitri, D. (2021), Analisis kestabilan pada model prey-predator-super predator dengan fungsi respon Holling tipe I dan II, *Jurnal Ilmiah Matematika*, 9(3), 514-523.

Rogers, E. M. (2003), *Diffusion of Innovations*, New York, Free Press, A Division of Simon & Schuster, Inc., 3th ed.

Teräs, M. (2022), Education and technology: Key issues and debates, *International Review of Education*, vol. 68, pages 635–636.

UNESCO. (2020), *Education in a Post-COVID World: Nine Ideas for Public Action*.

Voskoglou, M. Gr. (2022), Connectivism vs Traditional Theories of Learning, *American Journal of Educational Research*, vol. 10, No. 4, pp. 257-261.

