

DAMPAK MIKROPLASTIK TERHADAP DINAMIKA POPULASI MANGSA–PEMANGSA: MODIFIKASI MODEL LOTKA–VOLTERRA DAN ANALISIS KESTABILAN

P. Sianturi, *A. Kusnanto, N.K. Ardhana, B. Suharjo dan D.A.A. Syukur

Program Studi Matematika, Sekolah Sains Data, Matematika dan Informatika,
Institut Pertanian Bogor, Jl. Meranti, Kampus IPB Dramaga Bogor.

psianturi@apps.ipb.ac.id, ali_mat@apps.ipb.ac.id *corresponding author,
kutha@apps.ipb.ac.id, bsuharjo@apps.ipb.ac.id, aryarjuna@apps.ipb.ac.id

Abstrak

Interaksi mangsa–pemangsa merupakan salah satu mekanisme utama dalam menjaga keseimbangan ekosistem. Namun, keberadaan mikroplastik sebagai polutan baru berpotensi mengganggu dinamika populasi melalui proses bioakumulasi. Penelitian ini bertujuan mengembangkan model matematika mangsa–pemangsa berbasis modifikasi Lotka–Volterra dengan memasukkan pengaruh mikroplastik pada dua tingkat trofik. Analisis dilakukan melalui penentuan titik tetap, analisis kestabilan menggunakan matriks Jacobi, analisis sensitivitas parameter, serta simulasi numerik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem memiliki dua titik tetap, yaitu titik kepunahan dan titik koeksistensi yang kestabilannya bergantung nilai parameter yang dipilih. Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa parameter laju pertumbuhan intrinsik mangsa, laju pertumbuhan pemangsa akibat predasi, dan konsentrasi mikroplastik lingkungan merupakan faktor dominan. Simulasi numerik menunjukkan bahwa peningkatan mikroplastik memperlambat pertumbuhan populasi dan berpotensi menyebabkan ketidakseimbangan ekosistem. Model yang diusulkan memberikan pendekatan yang lebih komprehensif dalam memahami dampak mikroplastik terhadap stabilitas ekosistem perairan.

Kata kunci: Lotka–Volterra, mikroplastik, dinamika populasi, kestabilan, sensitivitas.

1 Pendahuluan

Pencemaran mikroplastik telah menjadi isu lingkungan yang mendapat perhatian luas karena keberadaannya yang semakin meningkat di berbagai ekosistem perairan. Mikroplastik berasal dari degradasi sampah plastik yang mengalami fragmentasi akibat paparan radiasi ultraviolet, oksidasi, dan proses abrasi fisik oleh air maupun tanah [1]. Beberapa penelitian yang dilakukan di perairan Indonesia mengungkapkan bahwa mikroplastik telah terdeteksi pada sedimen serta berbagai organisme laut, menunjukkan adanya risiko transfer partikel tersebut ke dalam jaringan trofik perairan dan potensi gangguan terhadap fungsi ekologis organisme akuatik [2].

Secara umum, mikroplastik merupakan partikel plastik berukuran kurang dari 5 mm yang memiliki tingkat persistensi tinggi sehingga dapat bertahan dalam lingkungan untuk jangka waktu yang sangat panjang [3]. Dampak yang ditimbulkan meliputi gangguan fisik

2020 Mathematics Subject Classification: 34A34, 34D20, 34D23.

Diajukan:26/05/2026, diterima: 27/06/2026. DOI: <https://doi.org/10.29244/milang.22.1.85-96>

MILANG Journal of Mathematics and Its Applications, Vol.22, No.1, pp.85-96

ISSN: 2963-5233

akibat tertelannya partikel oleh organisme laut, seperti cedera jaringan dan penyumbatan saluran pencernaan, serta dampak kimiawi melalui transfer senyawa toksik yang teradsorpsi pada permukaan mikroplastik. Akumulasi partikel ini dalam rantai makanan dapat mengganggu keberlangsungan populasi organisme laut dan meningkatkan risiko paparan bagi manusia melalui konsumsi hasil perikanan [4].

Dinamika populasi dalam ekosistem perairan dipengaruhi oleh interaksi kompleks antara komponen biotik dan abiotik. Salah satu interaksi fundamental adalah hubungan mangsa–pemangsa yang secara klasik dimodelkan menggunakan model Lotka–Volterra. Model ini mampu menggambarkan fluktuasi populasi yang bersifat periodik akibat interaksi biologis antarspesies.

Seiring perkembangan penelitian, berbagai modifikasi model Lotka–Volterra telah dilakukan dengan memasukkan faktor lingkungan, seperti kompetisi, kerja sama, maupun toksisitas. Pada penelitian [5] dikembangkan model mangsa–pemangsa dengan memasukkan bioakumulasi zat toksik. Sementara itu, [6] mengkaji pengaruh pencemaran terhadap populasi spesies tunggal. Namun demikian, penelitian sebelumnya masih memiliki keterbatasan, khususnya dalam mengintegrasikan bioakumulasi mikroplastik secara simultan pada dua tingkat trofik serta mengaitkannya dengan perubahan respons biologis organisme. Selain itu, kajian sensitivitas parameter yang menghubungkan faktor lingkungan dengan kestabilan sistem masih terbatas.

Kebaruan penelitian ini terletak pada: integrasi model Lotka–Volterra dengan model bioakumulasi mikroplastik pada dua tingkat trofik, modifikasi dinamika toksik dengan memasukkan respons biologis organisme, kombinasi analisis kestabilan dan sensitivitas parameter, serta adanya interpretasi ekologis berbasis simulasi numerik. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi dalam memahami dampak mikroplastik terhadap stabilitas ekosistem perairan.

2 Model dan Teori Pendukung

2.1 Formulasi Model

Model yang digunakan merupakan sistem persamaan diferensial nonlinear:

$$\begin{aligned}\frac{dX_1}{dt} &= X_1[(r_{10} - d_1) - r_{11}C_1 - (a_1 - d_3)X_2], \\ \frac{dX_2}{dt} &= X_2[-r_{20} - r_{21}C_2 + (a_2 - d_2)X_1], \\ \frac{dC_1}{dt} &= s_1C_E - (g_1 + k + r_{11})C_1, \\ \frac{dC_2}{dt} &= s_2C_E + kC_1 - (g_2 + r_{21})C_2.\end{aligned}$$

Penjelasan peubah yang digunakan adalah: X_1 merupakan banyaknya individu mangsa, X_2 merupakan banyaknya individu pemangsa, C_1 kandungan mikroplastik pada mangsa serta C_2 kandungan mikroplastik pada pemangsa. Parameter yang digunakan dalam penelitian ini seperti yang dicantumkan dalam Tabel 1 berikut.

Tabel 1 Keterangan parameter yang digunakan

Parameter	Keterangan
r_{10}	Laju pertumbuhan intrinsik mangsa
r_{11}	Respon mangsa terhadap mikroplastik
r_{20}	Laju kematian alami pemangsa
r_{21}	Respon pemangsa terhadap mikroplastik
a_1	Laju kematian mangsa akibat pemangsaan
a_2	Laju pertumbuhan pemangsa akibat pemangsaan
d_1	Penurunan laju pertumbuhan mangsa akibat mikroplastik
d_2	Penurunan laju pertumbuhan pemangsa akibat mikroplastik
d_3	Penurunan kematian mangsa akibat penurunan aktivitas pemangsaan
C_E	Jumlah mikroplastik pada lingkungan
k	Laju perpindahan mikroplastik saat pemangsaan
s_1	Tingkat penyerapan mikroplastik pada mangsa
s_2	Tingkat penyerapan mikroplastik pada pemangsa
g_1	Laju pembuangan mikroplastik pada mangsa
g_2	Laju pembuangan mikroplastik pada pemangsa

2.2 Analisis Matematis

Diberikan sistem persamaan diferensial otonom

$$\dot{x} = f(x), x \in \mathbb{R}^n.$$

Suatu titik x^* disebut titik tetap (*equilibrium point*) atau titik kritis apabila memenuhi kondisi $f(x^*) = 0$. Dalam kajian sistem dinamik tak linear, analisis kestabilan di sekitar titik tetap umumnya dilakukan melalui proses linearisasi. Menurut [7], linearisasi sistem di sekitar titik tetap menghasilkan sistem persamaan diferensial linear berbentuk

$$\dot{x} = Ax, x \in \mathbb{R}^n,$$

dengan A merupakan matriks Jacobi berordo $n \times n$ yang diperoleh dari fungsi $f(x)$ dan dievaluasi pada titik tetap yang ditinjau.

Konsep nilai eigen dan vektor eigen memegang peranan penting dalam analisis kestabilan sistem hasil linearisasi tersebut. Berdasarkan [8], suatu vektor tak nol $x \in \mathbb{R}^n$ disebut sebagai vektor eigen dari matriks A apabila terdapat suatu skalar λ yang memenuhi hubungan

$$Ax = \lambda x.$$

Dalam hal ini, skalar λ dinamakan nilai eigen, sedangkan x merupakan vektor eigen yang berasosiasi dengan nilai eigen tersebut. Nilai-nilai eigen matriks A diperoleh dengan menyelesaikan persamaan

$$\det(A - \lambda I) = 0,$$

yang dikenal sebagai persamaan karakteristik matriks A .

Analisis kestabilan titik tetap selanjutnya dilakukan berdasarkan spektrum nilai eigen matriks Jacobi yang diperoleh dari persamaan karakteristik. Menurut [7], sifat kestabilan suatu titik tetap ditentukan oleh nilai-nilai eigen λ_i , $i = 1, 2, \dots, n$. Secara umum, titik tetap dikategorikan stabil apabila seluruh nilai eigen real bernilai negatif dan seluruh nilai eigen kompleks memiliki bagian real yang tidak positif. Sebaliknya, titik tetap dinyatakan tidak stabil apabila terdapat paling sedikit satu nilai eigen real yang positif atau satu nilai eigen kompleks dengan bagian real positif. Selain itu, suatu titik

tetap diklasifikasikan sebagai titik sadel (*saddle point*) apabila terdapat pasangan nilai eigen real yang memiliki tanda berlawanan, sehingga hasil kalinya bernilai negatif. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa titik sadel selalu bersifat tidak stabil karena terdapat arah lintasan yang menjauhi titik kesetimbangan.

2.3 Analisis Sensitivitas

Menurut [9], dinamika populasi pada model Lotka–Volterra dapat dinyatakan melalui sistem persamaan diferensial berikut:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= x(r - ax - by) - q_1 E_1 x, \\ \frac{dy}{dt} &= y(-e - cy + dx) - q_2 E_2 y.\end{aligned}$$

Sistem tersebut selanjutnya dapat direpresentasikan dalam bentuk vektor sebagai

$$\frac{dZ}{dt} = F(Z, P),$$

dengan $Z = [x(t), y(t)]^T$ menyatakan vektor variabel keadaan dan $P = [r, a, b, e, c, d, E_1, E_2]$ merupakan vektor parameter model.

Untuk mengkaji pengaruh perubahan parameter terhadap perilaku sistem, digunakan analisis sensitivitas. Matriks sensitivitas terhadap parameter P_j didefinisikan sebagai

$$S_j = \begin{bmatrix} S_{1,j} \\ S_{2,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial P_j} \\ \frac{\partial y}{\partial P_j} \end{bmatrix},$$

dengan $j = 1, 2, \dots, 8$. Matriks ini menggambarkan tingkat perubahan variabel keadaan akibat perubahan pada masing-masing parameter model.

Laju perubahan sensitivitas terhadap waktu diperoleh dengan mendiferensialkan komponen sensitivitas terhadap waktu dan menerapkan aturan rantai, sehingga diperoleh

$$\frac{dS_{i,j}}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial Z_i}{\partial P_j} \right) = \frac{\partial F_i}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial P_j} + \frac{\partial F_i}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial P_j} + \frac{\partial F_i}{\partial P_j},$$

untuk $i = 1, 2$. Persamaan tersebut menunjukkan bahwa perubahan sensitivitas dipengaruhi oleh interaksi antara variabel keadaan dan parameter yang dianalisis. Dalam bentuk matriks, sistem sensitivitas dapat dituliskan sebagai

$$\frac{dS}{dt} = JS + f,$$

dengan J menyatakan matriks Jacobi dari sistem sedangkan f merupakan matriks yang elemen-elemennya diperoleh dari turunan parsial ruas kanan model terhadap parameter yang bersesuaian.

Nilai indeks sensitivitas digunakan untuk menginterpretasikan pengaruh masing-masing parameter terhadap variabel populasi. Indeks sensitivitas yang bernilai positif menunjukkan bahwa peningkatan parameter terkait, dengan asumsi parameter lain tetap, akan menyebabkan peningkatan nilai variabel populasi yang diamati. Sebaliknya, indeks sensitivitas bernilai negatif mengindikasikan bahwa kenaikan parameter tersebut akan menurunkan nilai populasi pada variabel yang bersangkutan apabila parameter lainnya dipertahankan konstan.

3 Hasil Pembahasan

3.1 Titik Tetap dan Kestabilan

Dengan melakukan pencarian titik tetap diperoleh dua titik tetap sebagai berikut:

$$E_1(X_1, X_2, C_1, C_2) = \left(0, 0, \frac{C_E s_1}{g_1 + k + r_{11}}, \frac{C_E(k s_1 + (g_1 + k + r_{11})s_2)}{(g_1 + k + r_{11})(g_2 + r_{21})}\right), \quad \text{dan} \quad E_2(X_1, X_2, C_1, C_2) = (\widehat{X}_1, \widehat{X}_2, \widehat{C}_1, \widehat{C}_2), \text{ dengan}$$

$$\widehat{X}_1 = \frac{g_2(k+r_{11})r_{20} + g_1 r_{20}(g_2+r_{21}) + C_E g_1 r_{21} s_2 + r_{21}(k r_{20} + r_{11} r_{20} + C_E k s_1 + C_E(k+r_{11})s_2)}{(a_2 - d_2)(g_1 + k + r_{11})(g_2 + r_{21})},$$

$$\widehat{X}_2 = -\frac{(d_1 - r_{10})(g_1 + k + r_{11}) + C_E r_{11} s_1}{(a_1 - d_3)(g_1 + k + r_{11})},$$

$$\widehat{C}_1 = \frac{C_E s}{g_1 + k + r_{11}}, \text{ dan}$$

$$\widehat{C}_2 = \frac{C_E(k s_1 + (g_1 + k + r_{11})s_2)}{(g_1 + k + r_{11})(g_2 + r_{21})}.$$

Teorema 1. Titik tetap $E_1(X_1, X_2, C_1, C_2) = (0, 0, \widehat{C}_1, \widehat{C}_2)$ bersifat stabil jika $r_{10} < d_1 + \frac{C_E r_{11} s_1}{g_1 + k + r_{11}}$.

Bukti:

Matriks Jacobi dari titik tetap $E_1(X_1, X_2, C_1, C_2) = (0, 0, \widehat{C}_1, \widehat{C}_2)$ adalah:

$$J = \begin{pmatrix} -d_1 + r_{10} - \left(\frac{C_E r_{11} s_1}{p_1}\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r_{20} - \left(\frac{C_E(k s_1 + p_1 s_2) r_{21}}{p_1 p_2}\right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -p_1 \\ 0 & 0 & 0 & k - p_2 \end{pmatrix}$$

dengan

$$p_1 = g_1 + k + r_{11},$$

$$p_2 = g_2 + r_{21}.$$

Selanjutnya nilai eigen dicari dengan menyelesaikan $\det(J - \lambda I) = 0$. Diperoleh empat nilai eigen yakni $\lambda_1 = -p_1$, $\lambda_2 = -p_2$, $\lambda_3 = -\frac{C_E r_{11} s_1}{p_1} - d_1 + r_{10}$, $\lambda_4 = -r_{20} - \left(\frac{C_E(k s_1 + p_1 s_2) r_{21}}{p_1 p_2}\right)$. Karena nilai parameter yang dipilih selalu positif, sehingga nilai eigen λ_1, λ_2 , dan λ_4 akan selalu bernilai negatif. Sehingga nilai eigen pada λ_3 akan bernilai negatif jika $r_{10} < d_1 + \frac{C_E r_{11} s_1}{p_1}$ dan berakibat titik tetap E_1 bersifat stabil.

Teorema 2. Titik tetap $E_2(X_1, X_2, C_1, C_2) = (\widehat{X}_1, \widehat{X}_2, \widehat{C}_1, \widehat{C}_2)$ bersifat stabil jika $d_1 < r_{10}$, selainnya bersifat sadel.

Bukti :

Substitusi titik tetap $E_2(X_1, X_2, C_1, C_2) = (\widehat{X}_1, \widehat{X}_2, \widehat{C}_1, \widehat{C}_2)$ ke dalam matriks Jacobi pada persamaan (10) sehingga diperoleh:

$$J = \begin{pmatrix} 0 & (-a_1 + d_3)p_3 & -r_{11}p_3 & 0 \\ -(a_2 - d_2)p_4 & 0 & 0 & r_{21}p_4 \\ 0 & 0 & -p_1 & 0 \\ 0 & 0 & k & -p_2 \end{pmatrix},$$

dengan

$$p_3 = \frac{(g_2(k+r_{11})r_{20}+g_1r_{20}(g_2+r_{21})+C_Eg_1r_{21}s_2+r_{11}r_{21}(r_{20}+C_Es_2)+kr_{21}(r_{20}+C_E(s_1+s_2)))}{(a_2-d_2)(g_1+k+r_{11})(g_2+r_{21})},$$

$$p_4 = \frac{((d_1-r_{10})(g_1+k+r_{11})+C_Er_{11}s_1)}{(a_1-d_3)(g_1+k+r_{11})}.$$

Selanjutnya nilai eigen dicari dengan menyelesaikan $\det(J - \lambda I) = 0$. Diperoleh empat nilai eigen yakni $\lambda_1 = -p_1$, $\lambda_2 = -p_2$, $\lambda_3 = -\sqrt{(a_2 - d_2)(a_1 - d_3)p_3p_4}$, dan $\lambda_4 = \sqrt{(a_2 - d_2)(a_1 - d_3)p_3p_4}$. Karena nilai parameter yang dipilih selalu positif, sehingga nilai eigen λ_1 dan λ_2 akan selalu bernilai negatif. Sementara itu, λ_3 dan λ_4 merupakan pasangan nilai eigen dengan arah yang berlawanan. Perhatikan bahwa jika p_3 dan p_4 disubstitusikan ke dalam λ_1 dan λ_2 dengan semua parameter bernilai positif maka jika dipilih $d_1 < r_{10}$, nilai λ_1 dan λ_2 akan berbentuk bilangan imajiner konjugat. Hal ini berakibat titik tetap akan stabil.

3.2 Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas dilakukan untuk mengetahui parameter yang paling berpengaruh terhadap populasi. Tanpa mengurangi keumuman jumlah populasi yang diteliti, nilai awal populasi dan nilai parameter yang digunakan seperti dalam Tabel 2 dan Tabel 3 berikut.

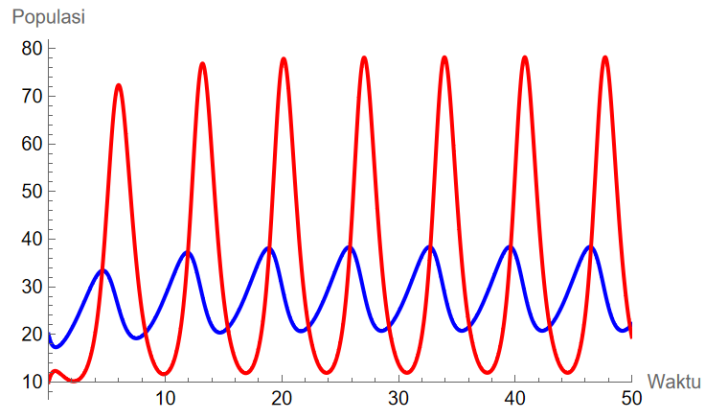
Tabel 2 Nilai populasi awal

Variabel	Nilai	Satuan
X_1	20	individu
X_2	10	individu
C_1	10	$\mu\text{g} / \text{individu}$
C_2	10	$\mu\text{g} / \text{individu}$

Tabel 3 Nilai parameter awal

Parameter	Nilai	Satuan	Sumber
r_{10}	0,5	(waktu ⁻¹)	[10]
r_{11}	0,1	($\mu\text{g}/\text{individu}$) ⁻¹ (waktu ⁻¹)	[5]
r_{20}	0,02	(waktu ⁻¹)	[11]
r_{21}	0,1	($\mu\text{g}/\text{individu}$) ⁻¹ (waktu ⁻¹)	[5]
a_1	0,01	(individu) ⁻¹ (waktu ⁻¹)	[5]
a_2	0,1	(individu) ⁻¹ (waktu ⁻¹)	[5]
d_1	0,001	(waktu ⁻¹)	[5]
d_2	0,001	(individu) ⁻¹ (waktu ⁻¹)	[5]
d_3	0,001	(individu) ⁻¹ (waktu ⁻¹)	[5]
C_E	20	$\mu\text{g} / L$	[12]
k	2,0	(waktu ⁻¹)	[5]
s_1	0,2	$L(\text{individu}^{-1})(\text{waktu}^{-1})$	[5]
s_2	0,1	$L(\text{individu}^{-1})(\text{waktu}^{-1})$	[5]
g_1	0,1	(waktu ⁻¹)	[5]
g_2	0,1	(waktu ⁻¹)	[5]

Dari data-data di atas, titik tetap E_1 memiliki nilai eigen $\lambda_1 = -2,8; \lambda_2 = -2,2; \lambda_3 = 0,3$ dan $\lambda_4 = -0,2$ sehingga bersifat sadel. Nilai eigen titik tetap E_2 adalah $\lambda_1 = -2,2; \lambda_2 = -4,4 \times 10^{-16} + 0,95i; \lambda_3 = -4,4 \times 10^{-16} - 0,95i$ dan $\lambda_4 = -0,2,2$ sehingga titik E_2 spiral stabil. Hal ini juga sesuai dengan Teorema 1 dan Teorema 2 bahwa dengan memilih $d_1 < r_{10}$ maka titik tetap E_2 akan stabil. Gambar bidang fasenya dapat dilihat dalam Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Bidang Solusi dari populasi manga X (biru) dan populasi pemangsa X_2 (merah).

Simulasi numerik yang dilakukan dalam penelitian ini menggunakan *Software Wolfram Mathematica*. Setelah dilakukan simulasi, didapatkan hasil indeks sensitivitas seperti dalam Tabel 4 berikut.

Tabel 4 Nilai indeks sensitivitas

Parameter	Indeks Sensitivitas			
	X_1	X_2	C_1	C_2
r_{10}	-1,1202	0,2101	0	0
r_{11}	0,0982	-0,0290	-0,0330	-0,0123
r_{20}	0,0440	-0,0106	0	0
r_{21}	0,3824	-0,1327	0	-0,0425
a_1	-0,9208	-1,1540	0	0
a_2	-9,3831	0,8289	0	0
d_1	0,0022	-0,0004	0	0
d_2	0,0938	-0,0083	0	0
d_3	0,0921	0,1154	0	0
C_E	0,5245	-0,1680	1	1
k	0,1339	-0,0313	-0,6598	0,2792
s_1	0,2895	-0,0972	1	0,5256
s_2	0,2175	-0,0708	0	0,4744
g_1	-0,0032	0,0018	-0,0330	-0,0123
g_2	-0,0113	0,0045	0	-0,0425

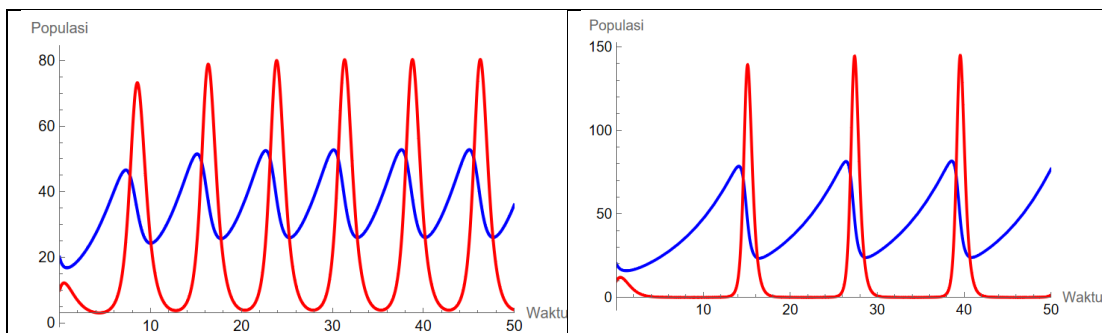
Nilai mutlak dari indeks sensitivitas tertinggi sangat berpengaruh terhadap banyaknya individu X_1 dan X_2 . Oleh karena itu dipilih parameter s_1, s_2 dan C_E dengan nilai

mutlak indeks sensitivitas terbesar terhadap perubahan C_1 dan C_2 . Parameter s_1 menunjukkan tingkat penyerapan mikroplastik pada mangsa, s_2 menunjukkan tingkat penyerapan mikroplastik pada pemangsa, dan C_E menunjukkan jumlah mikroplastik. Parameter ini dipilih untuk melihat pengaruh mikroplastik pada dinamika populasi mangsa dan pemangsa.

3.3 Simulasi Numerik dan Interpretasi Ekologis

Mengubah Nilai Parameter Tingkat Penyerapan Mikroplastik Pada Mangsa (s_1)

Perubahan pertama yang dilihat pengaruhnya adalah perubahan nilai parameter tingkat penyerapan mikroplastik pada mangsa (s_1). Dilakukan perubahan nilai tingkat penyerapan mikroplastik pada mangsa dengan nilai parameter lainnya tetap.

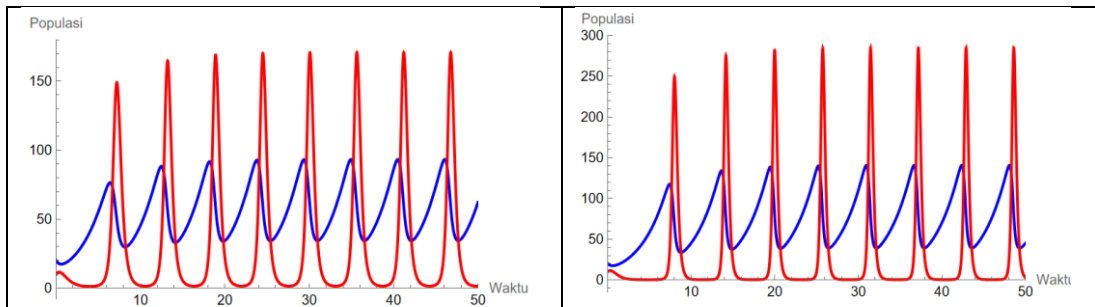


Gambar 2 Bidang fase dan bidang solusi dengan $s_1 = 0,3$ dan $s_1 = 0,4$

Dari Gambar 2 terlihat bahwa dengan meningkatkan nilai s_1 populasi mangsa dan pemangsa tetap berosilasi tetapi dengan amplitudo yang semakin membesar dan frekuensinya semakin menurun. Terlihat juga bahwa penurunan lebih cepat pada populasi pemangsa. Hal ini menunjukkan adanya efek tidak langsung mikroplastik terhadap pemangsa melalui aktivitas mangsa pemangsa, di mana pemangsa memperoleh asupan energi yang lebih rendah akibat menurunnya kualitas mangsa. Peningkatan penyerapan mikroplastik oleh mangsa tidak mengubah kestabilan dasar sistem, tetapi memperlemah dinamika osilasi populasi, menurunkan kekuatan interaksi mangsa–pemangsa, serta berpotensi memengaruhi struktur dan keberlanjutan ekosistem dalam jangka panjang.

Mengubah Nilai Parameter Tingkat Penyerapan Mikroplastik Pada Pemangsa (s_2)

Perubahan kedua yang dilihat pengaruhnya adalah perubahan nilai parameter tingkat penyerapan mikroplastik pada pemangsa (s_2). Dilakukan perubahan nilai tingkat penyerapan mikroplastik pada pemangsa dengan nilai parameter lainnya tetap.

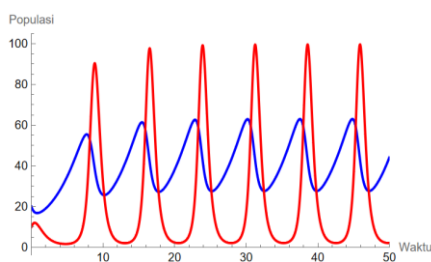


Gambar 3 Bidang fase dan bidang solusi dengan $s_2 = 0,4$ dan $s_2 = 0,6$

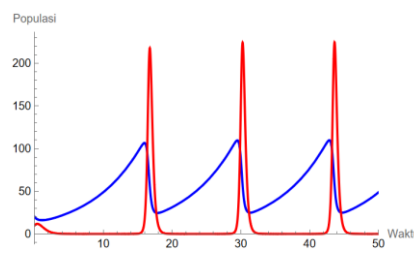
Berdasarkan Gambar 3, perubahan nilai parameter s_2 yang merepresentasikan tingkat penyerapan mikroplastik oleh pemangsa memengaruhi dinamika sistem. Secara ekologis, kondisi ini menunjukkan bahwa rendahnya penyerapan mikroplastik pada pemangsa mengurangi gangguan fisiologis yang dialami pemangsa, sehingga tekanan interaksi terhadap mangsa menjadi lebih kecil. Populasi mangsa dan pemangsa tetap beresilasi tetapi dengan amplitudo dan frekuensi yang semakin membesar. Hal ini mengindikasikan bahwa perubahan penyerapan mikroplastik pada pemangsa secara langsung memengaruhi dinamika pertumbuhan dan respons populasi pemangsa terhadap ketersediaan mangsa. Dengan demikian, perubahan tingkat penyerapan mikroplastik oleh pemangsa tidak mengubah kestabilan dasar sistem, tetapi memodulasi dinamika osilasi populasi serta akumulasi mikroplastik pada pemangsa, yang pada akhirnya dapat memengaruhi keseimbangan interaksi mangsa dan pemangsa dalam ekosistem.

Mengubah Nilai Parameter Jumlah Mikroplastik Pada Lingkungan

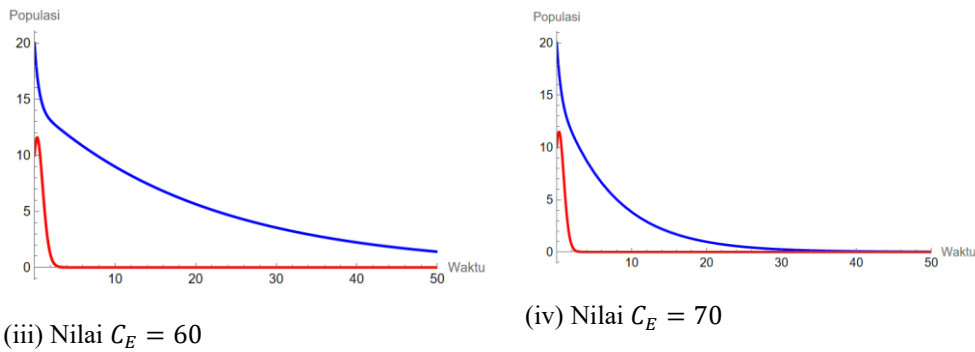
Perubahan selanjutnya dilihat pengaruh dari perubahan jumlah mikroplastik pada lingkungan (C_E). Dilakukan perubahan nilai C_E , selain itu nilai parameter lainnya tetap. Perhatikan bidang solusi dengan perubahan nilai C_E pada Gambar 4 berikut.



(i) Nilai $C_E = 30$



(ii) Nilai $C_E = 40$



Gambar 4 Perbandingan bidang solusi populasi mangsa (biru) dan populasi pemangsa (merah) terhadap perubahan nilai parameter C_E .

Berdasarkan Teorema 1, titik tetap E_1 akan stabil jika $r_{10} < d_1 + \frac{C_E r_{11} s_1}{g_1 + k + r_{11}}$. Berarti E_1 akan stabil jika $C_E > \frac{(r_{10} - d_1)(g_1 + k + r_{11})}{r_{11} s_1}$. Berdasarkan nilai parameter yang dipilih, E_1 akan stabil jika $C_E > 54$. Dari Gambar 4 di atas, terlihat dalam kasus (i) dan (ii), nilai $C_E < 54$ sehingga titik tetap E_1 tidak stabil sehingga kestabilannya berada pada titik E_2 . Dalam kasus (iii) dan (iv) pada Gambar 4, terlihat bahwa nilai $C_E > 54$ sehingga titik tetap E_1 menjadi stabil.

Perubahan nilai parameter C_E memberikan pengaruh yang besar terhadap dinamika sistem mangsa dan pemangsa. Pada nilai C_E kecil, solusi sistem menunjukkan pola spiral masuk menuju titik tetap E_2 , yang menandakan bahwa sistem berada pada kondisi stabil dan terjadi koeksistensi populasi. Hal ini juga tercermin pada grafik solusi terhadap waktu, di mana populasi mangsa dan pemangsa mengalami fluktuasi pada awal simulasi sebelum menuju pola yang lebih teratur. Ketika nilai C_E dinaikkan sehingga $C_E > 54$, sistem masih menunjukkan koeksistensi, namun osilasi populasi menjadi lebih kuat dan memerlukan waktu yang lebih lama untuk meredam. Pada nilai $C_E = 40$, lintasan sistem tetap mengarah ke titik tetap E_2 , sehingga koeksistensi sistem masih terjaga, meskipun fluktuasi populasi bertahan lebih lama dibandingkan nilai C_E yang lebih kecil. Selain itu, peningkatan nilai C_E diikuti oleh bertambahnya nilai keseimbangan jumlah mikroplastik C_1 dan C_2 , yang menunjukkan bahwa semakin besar jumlah mikroplastik di lingkungan, semakin tinggi akumulasi mikroplastik dalam sistem. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan C_E memperlambat proses menuju kestabilan dan memperkuat osilasi populasi, namun belum menyebabkan perubahan kestabilan sistem pada rentang nilai parameter yang diamati.

Setelah nilai $C_E > 54$, kestabilan sistem berubah dari E_2 menjadi E_1 . Hal ini mengakibatkan populasi mangsa dan pemangsa akan semakin menurun dan menjadi punah dalam waktu tertentu. Dengan demikian, ketika jumlah mikroplastik di lingkungan melampaui nilai tersebut, tidak lagi terjadi koeksistensi populasi, sehingga keseimbangan antara populasi mangsa dan pemangsa tidak dapat dipertahankan. Secara ekologis, kondisi ini mengindikasikan bahwa peningkatan mikroplastik yang terlalu tinggi berpotensi mengganggu interaksi mangsa pemangsa dalam ekosistem.

Berdasarkan hasil simulasi perubahan nilai parameter C_E yang merepresentasikan jumlah mikroplastik di lingkungan memengaruhi dinamika sistem mangsa pemangsa. Pada $C_E < 54$, lintasan bidang fase menunjukkan pola spiral yang menuju titik tetap E_2 ,

yang menandakan bahwa sistem berada pada kondisi koeksistensi. Populasi mangsa dan pemangsa mengalami osilasi pada awal waktu simulasi sebelum akhirnya meredam dan mencapai keseimbangan. Ketika nilai C_E meningkat tetapi lebih kecil 54, osilasi populasi menjadi lebih besar dan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai keseimbangan menjadi lebih lama, meskipun lintasan sistem masih mengarah menuju titik tetap E_2 . Pada saat $C_E > 54$, dinamika sistem menjadi lebih sensitif terhadap perubahan parameter dan kedua populasi akan menuju kepunahan. Secara ekologis, kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan jumlah mikroplastik di lingkungan hingga batas tertentu masih dapat ditoleransi oleh sistem, tetapi ketika konsentrasinya melebihi ambang tersebut, keseimbangan interaksi mangsa pemangsa terganggu dan berpotensi menyebabkan penurunan populasi pemangsa dalam ekosistem.

4 Simpulan

Model yang dikembangkan berhasil mengintegrasikan interaksi biologis dan pengaruh mikroplastik dalam satu sistem dinamis. Sistem memiliki dua titik tetap dengan karakteristik kestabilan berbeda. Parameter lingkungan, khususnya mikroplastik, terbukti memiliki pengaruh signifikan terhadap dinamika populasi. Peningkatan mikroplastik memperlambat pertumbuhan populasi dan berpotensi menyebabkan ketidakseimbangan ekosistem.

Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa parameter yang paling berpengaruh adalah tingkat penyerapan mikroplastik pada mangsa, pemangsa, serta konsentrasi mikroplastik di lingkungan. Perubahan parameter tersebut tidak mengubah keberadaan titik tetap maupun sifat kestabilan dasarnya dalam rentang yang diamati, namun memengaruhi dinamika populasi. Peningkatan mikroplastik cenderung menurunkan kualitas interaksi mangsa pemangsa, meningkatkan populasi mangsa, dan menurunkan populasi pemangsa.

Selain itu, hasil simulasi menunjukkan adanya nilai ambang batas konsentrasi mikroplastik, di mana sistem mulai kehilangan kestabilan ketika C_E melebihi $54 \mu\text{g}/\text{L}$. Pada kondisi ini, titik tetap koeksistensi menjadi tidak stabil sehingga keseimbangan populasi mangsa dan pemangsa akan menuju kepunahan.

Daftar Pustaka

- [1] Aulia A, Azizah R, Sulistyorini L, Rizaldi MA, “Literature review: dampak mikroplastik terhadap lingkungan pesisir, biota laut dan potensi risiko kesehatan”, *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, vol. 22, no. 3, pp. 328-341, 2023. <https://doi.org/10.14710/jkli.22.3.328-341>
- [2] Aryanti CA, Fatmawati, Amir F, Haeruddin, Simbolon MY, “Literature review: Identifikasi mikroplastik terhadap lingkungan laut dan biota laut”, *J-Tropimar*, vol. 7, no. 1, pp. 16-26, 2025. <https://doi.org/10.30649/jrkt.v7i1.111>
- [3] Supit A, Tompodung L, Kumaat S, “Mikroplastik sebagai kontaminan anyar dan efek toksiknya terhadap kesehatan”, *Jurnal Kesehatan*, vol. 13, no. 1, pp. 199-208, 2022. <https://doi.org/10.26630/jk.v13i1.2511>
- [4] Kastilon, Saputra DN, Ritonga AI, Reflis, Utama SP, “Dampak mikroplastik terhadap ekosistem pesisir: sebuah telaah pustaka”, *INSOLOGI: Jurnal Sains dan Teknologi*, vol. 3, no. 3, pp. 352-358, 2024. <https://doi.org/10.55123/insologi.v3i3.3628>

- [5] Huang Q, Lin Y, Zhong Q, Ma F, Zhang Y, “The impact of microplastic particles on population dynamics of predator and prey: implication of the lotka-Volterra model”, *Scientific Reports*, vol. 10, no.1, pp. 4500, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61414-3>
- [6] He J, Wang K. The survival analysis for a single-species population model in a polluted environment. *Applied Mathematical Modelling*. 31(10):2227-2238, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2006.08.017>
- [7] Strogatz SH, *Nonlinear Dynamics and Chaos, with Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering*, Florida (US): CRC Press, 2018.
- [8] Anton H dan Rorres C, *Elementary Linear Algebra 11th Edition: Applications Version*, New York (US): Wiley, 2013.
- [9] Savatorova V, “Exploring parameter sensitivity analysis in mathematical modeling with ordinary differential equations”, *CODEE Journal*, vol. 16, no. 4, pp. 1-26, 2023. <https://doi.org/10.5642/codee.CZKZ5996>
- [10] Zhang H, Zhang G, Lan Y, Xiao J, Wang Y, Song G, Wei H. 2022. A Modeling Study on Population Dynamics of Jellyfish *Aurelia aurita* in the Bohai and Yellow Seas. *Frontiers in Marine Science*. 9: 842394. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.842394>
- [11] Jones TT, Bostrom BL, Hastings MD, Houtan KSV, Pauly D, Jones DR, “Resource requirements of the pacific leatherback turtle population”, *PLoS ONE*, vol. 7, no. 100, pp. 1-10, 2012. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0045447>
- [12] Ghanadi M, Joshi I, Nirupama D, Jaeger JE, Burke M, Bebelman C, Symons B, Padhye LP. 2024. Quantification and characterization of microplastics in coastal environments: Insights from laser direct infrared imaging. *Science of The Total Environment*. vol. 912 :168835. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168835>