

MODEL NAS (*NUTRIENTS-ALGAL-SOCIETY*): DINAMIKA *HARMFUL ALGAL BLOOMS* AKIBAT AKTIVITAS ANTROPOGENIK

Zulfa Siti Zakia¹, Mirda Prisma Wijayanto²

^{1,2} Program studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jenderal Soedirman
Jl. Dr. Soeparno no. 61, Purwokerto, Indonesia, 53122
Email: zulfa.zakia@mhs.unsoed.ac.id, mirda.foundation@gmail.com

Abstrak

HABs (*Harmful Algal Blooms*) atau ganggang mekar merupakan fenomena terjadinya peningkatan populasi alga di luar kendali (*blooming*) akibat peningkatan konsentrasi nutrisi di wilayah perairan. Peningkatan nutrisi dapat disebabkan oleh aktivitas antropogenik seperti pencemaran limbah. Dalam penelitian ini, telah dianalisis dinamika HABs akibat aktivitas antropogenik dengan metode pemodelan matematika. Model matematika yang diusulkan selanjutnya disebut sebagai model NAS (*Nutrients-Algal-Society*). Model NAS terdiri dari tiga variabel yaitu N (*Nutrients*), A (*Algal*), dan S (*Society*). Novelty dari penelitian ini meliputi penentuan titik kesetimbangan, analisis kestabilan titik kesetimbangan, serta skenario optimal pengendalian HABs. Berdasarkan analisis kestabilan, didapatkan bahwa titik kesetimbangan bebas HABs bersifat stabil artinya sistem tidak akan mengalami *blooming* alga apabila laju pertumbuhan alga lebih kecil dari tingkat kesadaran masyarakat dalam pengendalian HABs. Pengendalian HABs dapat dilakukan dengan menurunkan aktivitas antropogenik seperti mengurangi nutrisi dengan membatasi pencemaran limbah, serta melakukan pengendalian alga sesegera mungkin pada saat fase awal *blooming*. Skenario terbaik pengendalian HABs dicapai ketika laju penambahan nutrisi bernilai minimum dan tingkat kesadaran masyarakat bernilai maksimum.

Kata kunci: *Harmful Algal Blooms*, model *Nutrients-Algal-Society*, aktivitas antropogenik

[1] PENDAHULUAN

Harmful Algal Blooms (HABs) merupakan fenomena terjadinya peningkatan populasi alga di luar kendali (*blooming*). Fenomena ini dapat menimbulkan dampak yang berbahaya bagi manusia, biota perairan, serta ekosistem di sekitarnya. Menurut Damar dkk [1] dan Nasution dkk [2], HABs disebabkan oleh mekanisme eutrofikasi yaitu peningkatan aliran nutrisi berupa nitrogen, fosfor, dan unsur hara lainnya yang bersumber dari limbah rumah tangga, pertanian, serta limbah industri. Meningkatnya aliran nutrisi juga diiringi dengan peningkatan suhu rata-rata perairan akibat perubahan iklim sehingga dapat meningkatkan metabolisme alga yang meliputi aktivitas reproduksi maupun aktivitas pembelahan sel dengan lebih cepat. Hal tersebut dapat menyebabkan laju pertumbuhan alga mengalami peningkatan dengan pesat.

Sebagai negara maritim, sebagian masyarakat Indonesia memiliki mata pencaharian di sektor perikanan dan kelautan. Dengan adanya HABs, maka kondisi ekonomi masyarakat Indonesia berpotensi mengalami penurunan yang cukup signifikan. HABs dapat menyebabkan mekanisme difusi oksigen dari udara ke air menjadi terhalang. Jika kondisi ini terus dibiarkan, maka ekosistem air akan mendekati kondisi anaerob dimana kadar oksigen sangat rendah sehingga dapat menyebabkan kematian masal ikan dan biota air lainnya. Untuk mengatasi permasalahan tersebut,

diperlukan berbagai upaya guna mengontrol pertumbuhan alga. Metode untuk mengontrol pertumbuhan alga dikelompokkan menjadi mekanis, fisik atau kimiawi, dan biologis [3,4]. Metode pengendalian mekanis melibatkan filter, pompa, dan penghalang yang digunakan untuk menghilangkan alga atau menahannya di suatu area sehingga alga tidak dapat menyebar. Metode pengendalian secara fisik atau kimiawi bergantung pada penggunaan bahan kimia atau senyawa kimia untuk membunuh, menghambat, atau menghilangkan alga. Sedangkan metode pengendalian biologis dilakukan dengan penggunaan organisme atau patogen, seperti virus, bakteri, parasit, zooplankton, dan kerang, yang mampu membunuh atau melisiskan sel alga.

Dalam beberapa tahun terakhir, beberapa model matematika telah diusulkan untuk mempelajari efek dari berbagai tindakan pengendalian terhadap HABs. Dalam penelitian terdahulu oleh Yussof dkk [5], dikembangkan model *Nutrient-Phytoplankton-Zooplankton* (NPZ) untuk memodelkan HABs di Pantai Barat, Sabah, Malaysia oleh *Pyrodinium bahamense* sp. Selanjutnya, Misra dkk [6] menyimpulkan bahwa alokasi anggaran lebih efektif jika digunakan untuk mengontrol aliran nutrisi yang masuk daripada menghilangkan alga, karena keberadaan nutrisi dalam konsentrasi tinggi akan segera memicu alga untuk berkembang biak. Tiwari dkk [7] menunjukkan bahwa

dengan menggunakan detritus, alga mati dapat dijadikan sebagai pupuk untuk tanaman. Selanjutnya, Misra dkk [8] melakukan analisis terhadap kestabilan model dinamik untuk mengetahui pengaruh tingkat kesadaran masyarakat terhadap pengendalian HABs.

Sebagai pengembangan, dalam penelitian ini diusulkan model matematika yang selanjutnya disebut sebagai model NAS (*Nutrients-Algal-Society*) untuk menganalisis dinamika HABs akibat aktivitas antropogenik. Aktivitas antropogenik seperti pencemaran limbah dapat meningkatkan konsentrasi nutrisi pada ekosistem perairan serta meningkatkan suhu rata – rata perairan sehingga dapat memicu peningkatan metabolisme alga untuk bereproduksi dan mengalami pembelahan sel.

Sebagai kebaruan penelitian, akan ditentukan titik kesetimbangan, analisis kestabilan, dan scenario pengendalian HABs. Secara matematis, analisis kestabilan menggambarkan perilaku dinamika nutrisi (*nutrients*), kelimpahan alga (*algal*), dan peran masyarakat (*society*) dalam pengendalian HABs yang saling berkaitan satu sama lain. Pada bagian terakhir, akan dilakukan simulasi model NAS dengan menggunakan program ODE45 pada MATLAB. Berdasarkan simulasi model, akan diuraikan karakteristik dinamika HABs yang terjadi di Indonesia mulai dari penyebab hingga skenario pengendalian HABs.

[2] PEMBENTUKAN MODEL MATEMATIKA

Model NAS terdiri dari tiga variabel yaitu variabel N (*Nutrients*) yang mendeskripsikan konsentrasi nutrisi, variabel A (*Algal*) yang mendeskripsikan kelimpahan alga, serta variabel S (*Society*) yang mendeskripsikan banyak masyarakat yang mengendalikan HABs. Parameter yang digunakan dalam penelitian ini meliputi laju pertambahan nutrisi dari aktivitas antropogenik, laju pengurangan nutrisi oleh masyarakat, laju konsumsi nutrisi, laju pertumbuhan alga secara alami akibat perubahan iklim, laju kematian alga secara alami, laju kematian alga akibat pemusnahan oleh masyarakat, dan tingkat kesadaran masyarakat dalam pengendalian HABs. Notasi untuk variabel dan parameter yang digunakan dalam penelitian ini dapat dituliskan pada tabel berikut:

Tabel 1. Daftar variabel penelitian

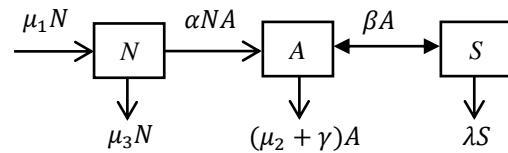
No.	Variabel	Notasi	Satuan
1.	Konsentrasi nutrisi pada waktu t	$N(t)$	$mg . l^{-1}$
2.	Kelimpahan alga pada waktu t	$A(t)$	sel
3.	Banyak masyarakat yang mengendalikan alga pada waktu t	$S(t)$	$individu$

Tabel 2. Daftar parameter penelitian

No.	Parameter	Notasi	Satuan
-----	-----------	--------	--------

1.	Laju pertambahan nutrisi dari aktivitas antropogenik	μ_1	$mg . l^{-1} . jam^{-1}$
2.	Laju pengurangan nutrisi oleh masyarakat	μ_3	$mg . l^{-1} . jam^{-1}$
3.	Laju konsumsi nutrisi oleh alga	α	$mg . l^{-1} . jam^{-1}$
4.	Laju kematian alga secara alami	μ_2	$sel . jam^{-1}$
5.	Laju pertumbuhan alga secara alami akibat perubahan iklim	β	$sel . jam^{-1}$
6.	Laju kematian alga akibat pemusnahan oleh masyarakat	γ	$sel . jam^{-1}$
7.	Tingkat kesadaran masyarakat dalam pengendalian HABs	λ	%

Diagram alir perubahan keadaan sistem dinamik HABs dengan menggunakan model NAS (*Nutrients-Algal-Society*) dapat ditunjukkan oleh gambar berikut:



Gambar 1. Diagram alir model NAS (*Nutrients-Algal-Society*)

Mekanisme perubahan variabel dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Perubahan konsentrasi nutrisi (N), dipengaruhi oleh:
 - a) Pertambahan konsentrasi nutrisi dengan laju μ_1 dipengaruhi oleh pencemaran limbah dari aktivitas antropogenik yang mencemari ekosistem perairan sehingga menyebabkan eutrofikasi.
 - b) Pengurangan konsentrasi nutrisi oleh masyarakat dengan laju μ_3 .
 - c) Pengurangan konsentrasi nutrisi dipengaruhi oleh konsumsi nutrisi oleh alga dengan laju α .
 Dengan demikian diperoleh laju perubahan konsentrasi nutrisi terhadap waktu sebagai berikut:

$$\frac{dN}{dt} = (\mu_1 - \mu_3)N - \alpha NA. \tag{2.1}$$

2. Perubahan kelimpahan alga (A), dipengaruhi oleh:
 - a) Pertambahan kelimpahan alga dipengaruhi oleh ketersediaan nutrisi yang dikonsumsi dengan laju α , serta pertumbuhan populasi alga secara alami akibat perubahan iklim dengan laju β . Perubahan iklim menyebabkan peningkatan suhu rata – rata perairan sehingga menyebabkan peningkatan metabolisme alga untuk melakukan reproduksi dan pembelahan sel.
 - b) Pengurangan kelimpahan alga dipengaruhi oleh kematian alami dengan laju μ_2 , serta pemusnahan alga oleh masyarakat dengan laju γ .

Dengan demikian diperoleh laju perubahan kelimpahan alga terhadap waktu sebagai berikut:

$$\frac{dA}{dt} = \alpha NA + (\beta - \mu_2 - \gamma)A. \quad (2.2)$$

3. Perubahan jumlah masyarakat yang mengendalikan alga (S), dipengaruhi oleh:

- Pertambahan jumlah masyarakat yang berpartisipasi dalam pengendalian alga dipengaruhi oleh pertumbuhan populasi alga secara alami dengan laju β .
- Pengurangan jumlah masyarakat yang berpartisipasi dalam pengendalian alga dipengaruhi oleh penurunan tingkat kesadaran masyarakat secara alami dengan laju λ .

Dengan demikian diperoleh laju perubahan jumlah masyarakat yang mengendalikan alga terhadap waktu sebagai berikut:

$$\frac{dS}{dt} = \beta A - \lambda S. \quad (2.3)$$

[3] ANALISIS KESTABILAN MODEL

3.1 Titik Kestimbangan

Untuk menentukan titik kesetimbangan, diberikan syarat

$$\frac{dN}{dt} = 0, \quad \frac{dA}{dt} = 0, \quad \frac{dS}{dt} = 0. \quad (3.1)$$

Dengan demikian, dari persamaan (2.1) – (2.3) didapatkan

$$(\mu_1 - \mu_3)N - \alpha NA = 0, \quad (3.2)$$

$$\alpha NA + (\beta - \mu_2 - \gamma)A = 0, \quad (3.3)$$

$$\beta A - \lambda S = 0. \quad (3.4)$$

Terdapat dua jenis titik kesetimbangan yaitu ketika alga tidak mengalami *blooming* (P_0) dan ketika alga mengalami *blooming* (P_1). Untuk menentukan titik kesetimbangan P_0 , disyaratkan bahwa $A = 0$, yang artinya tidak terdapat alga pada sistem. Lebih lanjut, dari persamaan (3.2) dan persamaan (3.4) kita peroleh $N = 0$ dan $S = 0$. Dengan demikian, didapatkan

$$P_0 = \{N^0, A^0, S^0\} = \{0, 0, 0\} \quad (3.5)$$

Selanjutnya, untuk titik kesetimbangan (P_1). Disyaratkan bahwa $A > 0$, yang artinya terdapat sejumlah kelimpahan alga. Dari persamaan (3.3) didapatkan,

$$N := N^* = \frac{\mu_2 + \gamma - \beta}{\alpha}. \quad (3.6)$$

Kemudian, substitusi N^* dari persamaan (3.6) ke dalam persamaan (3.2), didapat

$$A := A^* = \frac{(\mu_1 - \mu_3)}{\alpha}. \quad (3.7)$$

Substitusi A^* dari persamaan (3.7) ke dalam persamaan (3.4) didapatkan

$$S := S^* = \frac{\beta(\mu_1 - \mu_3)}{\alpha\lambda}. \quad (3.8)$$

Dengan demikian, didapatkan titik kesetimbangan P_1 .

$$P_1 = \left\{ \frac{\mu_2 + \gamma - \beta}{\alpha}, \frac{(\mu_1 - \mu_3)}{\alpha}, \frac{\beta(\mu_1 - \mu_3)}{\alpha\lambda} \right\}. \quad (3.9)$$

3.2 Analisis Kestabilan

Setelah didapatkan titik kesetimbangan, langkah selanjutnya adalah melakukan analisis kestabilan dari titik kesetimbangan tersebut. Terlebih dahulu akan ditentukan kriteria kestabilan titik kesetimbangan berdasarkan nilai eigen dari persamaan karakteristik yang diperoleh melalui linearisasi matriks Jacobian. Didefinisikan fungsi

$$f(N, A, S) = (\mu_1 - \mu_3)N - \alpha NA, \quad (3.10)$$

$$g(N, A, S) = \alpha NA + (\beta - \mu_2 - \gamma)A, \quad (3.11)$$

$$h(N, A, S) = \beta A - \lambda S. \quad (3.12)$$

Kemudian, dapat dihitung turunan parsial dari (3.10) – (3.12) sebagai berikut

$$\frac{\partial f(N,A,S)}{\partial N} = \mu_1 - \mu_3 - \alpha A, \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial f(N,A,S)}{\partial A} = -\alpha N, \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial f(N,A,S)}{\partial S} = 0, \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial g(N,A,S)}{\partial N} = \alpha A, \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial g(N,A,S)}{\partial A} = \alpha N + \beta - \mu_2 - \gamma, \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial g(N,A,S)}{\partial S} = 0, \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial h(N,A,S)}{\partial N} = 0, \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial h(N,A,S)}{\partial A} = \beta, \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial h(N,A,S)}{\partial S} = -\lambda. \quad (3.21)$$

Dari persamaan (3.13) – (3.21) dapat ditentukan matriks Jacobian sebagai berikut

$$J(N, A, S) = \begin{bmatrix} \mu_1 - \mu_3 - \alpha A & -\alpha N & 0 \\ \alpha A & \alpha N + \beta - \mu_2 - \gamma & 0 \\ 0 & \beta & -\lambda \end{bmatrix}. \quad (3.22)$$

Pertama, akan dianalisis kestabilan titik kesetimbangan P_0 . Untuk itu, substitusi persamaan (3.5) kedalam matriks Jacobian (3.22) sehingga didapatkan

$$J_0(N, A, S) = \begin{bmatrix} \mu_1 - \mu_3 & 0 & 0 \\ 0 & \beta - \mu_2 - \gamma & 0 \\ 0 & \beta & -\lambda \end{bmatrix}. \quad (3.23)$$

Selanjutnya adalah menentukan nilai karakteristik dari matriks Jacobian (3.23) dengan metode linearisasi. Didefinisikan,

$$M_1 = \begin{bmatrix} \varepsilon - \mu_1 + \mu_3 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon - \beta + \mu_2 + \gamma & 0 \\ 0 & -\beta & \varepsilon + \lambda \end{bmatrix}. \quad (3.24)$$

Untuk menentukan nilai-nilai karakteristik ε dari matriks (3.24), disyaratkan $\det(M_1) = 0$. Dengan demikian, didapatkan persamaan karakteristik

$$[\varepsilon - \mu_1 + \mu_3][\varepsilon + \lambda][\varepsilon - \beta + \mu_2 + \gamma] = 0 \quad (3.25)$$

yang menghasilkan nilai – nilai karakteristik ε_1 , ε_2 dan ε_3 . Lebih lanjut, nilai – nilai karakteristik tersebut akan stabil dimana berlaku $\varepsilon_1 < 0$, $\varepsilon_2 < 0$, dan $\varepsilon_3 < 0$ apabila memenuhi syarat yaitu:

$$\mu_1 < \mu_3, \lambda > 0, R_0 < 1, \quad (3.26)$$

dimana

$$R_0 = \beta - \mu_2 - \gamma, \quad (3.27)$$

didefinisikan sebagai bilangan reproduksi yang mendeskripsikan tingkat *blooming* alga. Titik kesetimbangan P_0 bersifat stabil menandakan bahwa tidak terjadi *blooming* alga.

Berikutnya, akan dianalisis kestabilan titik kesetimbangan P_1 . Untuk itu, substitusi persamaan (3.9) kedalam matriks Jacobian (3.22) sehingga didapatkan,

$$J_1(N, A, S) = \begin{bmatrix} 0 & -(\mu_2 + \gamma - \beta) & 0 \\ \mu_1 - \mu_3 & 0 & 0 \\ 0 & \beta & -\lambda \end{bmatrix}. \quad (3.28)$$

Selanjutnya, didefinisikan

$$M_2 = \begin{bmatrix} \varepsilon & \mu_2 + \gamma - \beta & 0 \\ \mu_3 - \mu_1 & \varepsilon & 0 \\ 0 & -\beta & \varepsilon + \lambda \end{bmatrix}. \quad (3.29)$$

Untuk menentukan nilai-nilai karakteristik ε dari matriks (3.29), disyaratkan $\det(M_2) = 0$, yang menghasilkan

$$[\varepsilon + \lambda][\varepsilon^2 + (\mu_1 - \mu_3)(\mu_2 + \gamma - \beta)] = 0. \quad (3.30)$$

Dapat dilihat bahwa persamaan (4.79) memiliki 3 solusi untuk ε yaitu:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= -\lambda \\ \varepsilon_2 &= +\sqrt{(\mu_1 - \mu_3)(\beta - \mu_2 - \gamma)} \\ \varepsilon_3 &= -\sqrt{(\mu_1 - \mu_3)(\beta - \mu_2 - \gamma)} \end{aligned}$$

Nilai – nilai karakteristik tersebut akan stabil dimana berlaku $\varepsilon_1 < 0$, $\varepsilon_2 < 0$, dan $\varepsilon_3 < 0$ yang menjamin bahwa $R_0 > 1$. Kondisi ini menandakan bahwa alga akan mengalami *blooming*.

[4] SIMULASI NUMERIK MODEL

Pada Bab berikut akan diberikan simulasi numerik model dengan menggunakan ODE45 pada MATLAB. Untuk membuat simulasi model, terlebih dahulu akan

ditentukan nilai – nilai parameter penelitian sebagai berikut:

1. Parameter nutrisi

Ledakan populasi alga atau fitoplankton diakibatkan oleh peningkatan nutrisi yang masuk ke wilayah perairan. Pertambahan konsentrasi nutrisi dipengaruhi oleh peningkatan pencemaran limbah yang bersumber dari aktivitas antropogenik. Dalam penelitian terdahulu oleh Damar dkk [1], Nasution dkk [2], Mursalin dkk [9], Gurning dkk [10], dan Hidayati [11] dijelaskan bahwa beberapa limbah yang menyebabkan fenomena HABs di Indonesia diantaranya adalah ammonia, nitrat, ortofosfat. Lebih lanjut, merujuk pada penelitian Yussof dkk [5], rata – rata laju penambahan nutrisi nitrat dan fosfat ketika terjadi HABs adalah $\mu_1 = 0,3 \text{ mg.l}^{-1}.\text{jam}^{-1}$.

2. Parameter alga (fitoplankton)

Menurut Mursalin dkk [9], jenis fitoplankton yang banyak menyebabkan fenomena HABs di perairan laut Indonesia adalah fitoplankton genus *Trichodesmium sp* dan termasuk ke dalam filum *Cyanophyta*. Secara morfologi, *Trichodesmium sp* memiliki tubuh berupa filamen yaitu lembaran seperti benang, lurus, bersel banyak, tanpa percabangan dan tanpa selubung. Dalam satu filamen dapat terdiri dari 15 – 60 sel yang berbentuk persegi empat. *Trichodesmium sp* termasuk ke dalam golongan NTP (*Non-Toxic Phytoplankton*) atau fitoplankton yang tidak beracun. Menurut Yossef dkk [5], fitoplankton berjenis NTP memiliki laju kematian alga alami $\mu_2 = 0,006 \text{ sel.jam}^{-1}$, laju konsumsi nutrisi $\alpha = 0,0342 \text{ mg.l}^{-1}.\text{jam}^{-1}$, dan laju pertumbuhan alami $\beta = 0,2 \text{ sel.jam}^{-1}$.

3. Parameter masyarakat

Masyarakat berperan penting dalam mengontrol pertumbuhan alga dengan cara mengurangi penyebaran nutrisi serta pemusnahan alga baik secara mekanis, fisik atau kimiawi, maupun biologis. Dalam penelitian ini, diasumsikan laju pengurangan nutrisi oleh masyarakat adalah sebesar $\mu_3 = 0,1 \text{ sel.jam}^{-1}$, laju kematian alga akibat pemusnahan oleh masyarakat adalah sebesar $\gamma = 0,8 \text{ sel.jam}^{-1}$, dan tingkat kesadaran masyarakat dalam pengendalian HABs diasumsikan bernilai konstan sebesar $\lambda = 33,33\%$ atau 0,33.

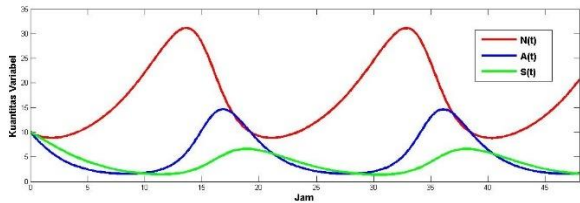
Dengan demikian, nilai - nilai parameter yang akan digunakan dalam simulasi model NAS dapat dirangkum sebagai berikut:

Tabel 3. Nilai parameter simulasi model NAS

No.	Parameter	Nilai	Sumber
1.	μ_1	$0,3 \text{ mg.l}^{-1}.\text{jam}^{-1}$	Yossef [5]
2.	μ_3	$0,1 \text{ sel.jam}^{-1}$	Asumsi penelitian

3.	α	$0,0342 \text{ mg.l}^{-1}.\text{jam}^{-1}$	Yossef [5]
4.	μ_2	$0,006 \text{ sel.jam}^{-1}$	Yossef [5]
5.	β	$0,2 \text{ sel.jam}^{-1}$	Yossef [5]
6.	γ	$0,8 \text{ sel.jam}^{-1}$	Asumsi penelitian
7.	λ	0,33	Asumsi penelitian

Selanjutnya diberikan kondisi awal $N_0 = 10 \text{ mg.l}^{-1}$, $A_0 = 10 \times 10^6 \text{ sel.l}^{-1}$, dan $S_0 = 10$ orang. Grafik simulasi model NAS selama 48 jam ditunjukkan oleh Gambar 2 sebagai berikut.



Gambar 2. Grafik simulasi model NAS (Nutrients-Algal-Society)

Pada Gambar 2 terlihat bahwa fungsi $N(t)$, $A(t)$, dan $S(t)$ mengalami perubahan nilai yang meningkat dan menurun secara periodik. Dalam rentang waktu 48 jam, masing – masing fungsi menghasilkan dua puncak gelombang diawali dari fungsi $N(t)$, kemudian fungsi $A(t)$, dan terakhir fungsi $S(t)$. Kondisi ini menjelaskan bahwa peningkatan nutrisi menyebabkan terjadinya peningkatan kelimpahan alga. Peningkatan jumlah kelimpahan alga, menyebabkan tingkat kesadaran masyarakat dalam upaya pengendalian HABs juga semakin meningkat.

Perubahan nutrisi secara periodik berkaitan dengan peristiwa *upwelling*. *Upwelling* adalah peristiwa naiknya massa air laut dari lapisan bawah ke permukaan atas laut karena pengaruh fisik perairan. Menurut Makmur [12], proses *upwelling* di laut lepas terjadi karena adanya pola arus permukaan yang menyebar (*divergence*), sehingga massa air dari lapisan bawah permukaan akan mengalir ke atas mengisi kekosongan yang terjadi karena menyebarnya arus. Ketika terjadi *upwelling*, nutrisi seperti nitrat dan fosfat yang awalnya berada pada lapisan bawah permukaan laut akan naik ke atas. Pada selang waktu tertentu, nutrisi tersebut akan berkumpul di satu titik pada permukaan laut yang disebut titik puncak. Ketika konsentrasi nutrisi mencapai puncak, pada kondisi inilah terjadi *blooming* karena alga mendapatkan pasokan nutrisi berlebih. Setelah terjadi *blooming*, beberapa saat kemudian terjadi *downwelling* atau penurunan muka air laut yang menyebabkan konsentrasi nutrisi di permukaan laut berkurang akibat turun kembali ke lapisan bawah permukaan. Penurunan nutrisi juga diiringi dengan penurunan kelimpahan alga. Mekanisme ini terjadi berulang – ulang secara periodik.

Satu hal menarik yang didapatkan dari penelitian ini yaitu masyarakat baru mulai melakukan pengendalian HABs setelah terjadi *blooming* alga, bukan pada saat fase awal *blooming*. Berdasarkan

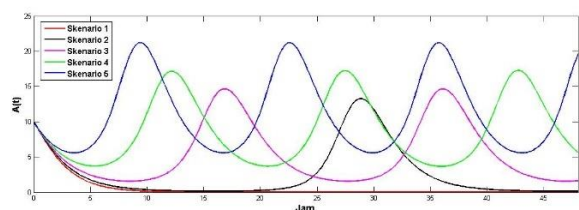
Gambar 2, dapat dilihat bahwa pada jam ke-13 saat fase awal *blooming*, grafik kelimpahan alga $A(t)$ mulai mengalami kenaikan, akan tetapi grafik jumlah masyarakat yang berpartisipasi dalam pengendalian HABs $S(t)$ masih relatif konstan. Grafik $S(t)$ baru mulai mengalami kenaikan pada saat alga telah mengalami *blooming*. Kondisi ini menunjukkan bahwa tingkat kesadaran dan inisiatif masyarakat untuk melakukan upaya preventif pengendalian HABs masih cukup rendah. Hasil yang didapatkan dalam penelitian ini mendukung hasil dari penelitian terdahulu oleh Hidayati [11] terkait pemahaman masyarakat pesisir Lampung terhadap fenomena HABs. Dalam penelitian tersebut dijelaskan bahwa saat terjadi HABs, hanya 54 persen masyarakat mengetahui terjadinya kematian ikan karena peristiwa tersebut. Padahal kematian ikan tersebut terjadi kurang lebih selama 3 hari berturut – turut. Rendahnya tingkat kesadaran dalam pengendalian HABs menyebabkan dampak yang ditimbulkan akan semakin meluas. Jika hal ini terus dibiarkan, HABs akan menimbulkan kematian masal ikan dan biota laut lainnya yang secara tidak langsung dapat memberikan dampak pada penurunan ekonomi masyarakat di wilayah pesisir.

Sebagai upaya preventif, berikut akan diuraikan skenario optimal dalam pengendalian HABs. Pengendalian HABs dapat dilakukan dengan menurunkan aktivitas antropogenik seperti mengurangi nutrisi dengan membatasi pencemaran limbah, serta melakukan pengendalian alga sesegera mungkin pada saat fase awal *blooming*. Sebagai parameter kontrol, dipilih laju pertumbuhan alami alga $0,2 \text{ sel.jam}^{-1}$, laju kematian alga alami $0,006 \text{ sel.jam}^{-1}$, laju konsumsi nutrisi $0,0342 \text{ mg.l}^{-1}.\text{jam}^{-1}$, laju pengurangan nutrisi oleh masyarakat sebesar $\mu_3 = 0,1 \text{ sel.jam}^{-1}$, dan laju kematian alga akibat pemusnahan oleh masyarakat sebesar $\gamma = 0,8 \text{ sel.jam}^{-1}$. Sebagai parameter bebas, diberikan berbagai nilai laju penambahan nutrisi dari aktivitas antropogenik (μ_1) dan tingkat kesadaran masyarakat dalam pengendalian HABs (λ) seperti pada Tabel 4 sebagai berikut:

Tabel 4. Nilai parameter skenario pengendalian HABs

Skenario	μ_1	λ
1.	0,1	0,5
2.	0,2	0,4
3.	0,3	0,3
4.	0,4	0,2
5.	0,5	0,1

Hasil simulasi skenario pengendalian HABs dapat dilihat pada Gambar 3 sebagai berikut.



Gambar 3. Grafik simulasi scenario pengendalian HABs

Skenario terburuk pengendalian HABs adalah skenario 5 dengan jumlah kelimpahan alga paling tinggi. Pada skenario 5, laju pertumbuhan nutrisi bernilai maksimum dan tingkat kesadaran masyarakat bernilai minimum. Sedangkan skenario terbaik pengendalian HABs adalah skenario 1. Pada skenario ini, alga tidak mengalami *blooming* melainkan menurun menuju nol secara asimtotik. Skenario 1 dicapai ketika laju pertumbuhan nutrisi bernilai minimum dan tingkat kesadaran masyarakat bernilai maksimum. Secara umum, dapat disimpulkan bahwa faktor utama yang menyebabkan terjadinya HABs adalah aktivitas antropogenik yaitu pencemaran limbah yang menyebabkan peningkatan nutrisi serta rendahnya kesadaran masyarakat untuk mengendalikan HABs.

[5] KESIMPULAN

Berdasarkan data hasil penelitian, dapat diberikan kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan analisis kestabilan, didapatkan kriteria kestabilan yaitu titik kesetimbangan $P_0 = \{N^0, A^0, S^0\} = \{0, 0, 0\}$ bersifat stabil apabila $R_0 = \beta - \mu_2 - \gamma < 1$. Nilai R_0 didefinisikan sebagai bilangan reproduksi yang mendeskripsikan tingkat *blooming* alga. Titik kesetimbangan bersifat stabil artinya sistem tidak akan mengalami *blooming* alga pada saat tertentu.
2. Pengendalian HABs dapat dilakukan dengan menurunkan aktivitas antropogenik seperti mengurangi nutrisi dengan membatasi pencemaran limbah, serta melakukan pengendalian alga sesegera mungkin pada saat fase awal *blooming*. Skenario terbaik pengendalian HABs dicapai ketika laju pertumbuhan nutrisi bernilai minimum dan tingkat kesadaran masyarakat bernilai maksimum.

[6] SUMBER PUSTAKA

- [1] Damar A., dkk. (2021). "Algae bloom phenomenon in Jakarta Bay as symptoms of severe eutrophication: monitoring results of 2014-2016." *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 744, 012009.
- [2] Nasution A.K., dkk. (2021). "The presence and abundance of harmful dinoflagellate algae related to water quality in Jakarta Bay, Indonesia." *Biodiversitas* 22:2909-2917.
- [3] Ferrier M.D., dkk., (2005). "The effects of barley straw (*Hordeum vulgare*) on the growth of freshwater algae." *Bioresour. Technol.* 96, 1788-1795.
- [4] Bitton G., dkk., (1975). "Removal of algae from Florida lakes by magnetic filtration." *Applied microbiology*, vol. 30,6: 905-8.
- [5] Yussof F.N., dkk., (2022). "Mathematical Modelling of Harmful Algal Blooms on West Coast of Sabah." *Maths.* 10, 2836.
- [6] Misra A.K., dkk., (2020). "Dynamics of algae blooming: effects of budget allocation and time delay." *Nonlinear Dyn.* 100:1779-1807.
- [7] Tiwari P.K., dkk., (2017). "The role of algae in agriculture: a mathematical study." *J. Biol. Phys.* 43 (2), 297-314.
- [8] Misra A.K., dkk., (2015). "Modeling the impact of awareness on the mitigation of algal bloom in a lake." *J. Biol. Phys.* 42, 147-165.
- [9] Mursalin, dkk., (2021). "Blooming fitoplankton di perairan Kepulauan Seribu." *JPLB* 5 (1), 652-667.
- [10] Gurning L.F.P., dkk., (2020). "Kelimpahan Fitoplankton Penyebab Harmful Algal Bloom di Perairan Desa Bedono, Demak." *Journal of Marine Research* 9 (3), 251-260.
- [11] Hidayati I., (2020). "Pemahaman Masyarakat Pesisir Lampung akan Bahaya Harmful Algae Bloom pada Sumber Pangan Laut." *Journal Pendidikan Ilmu Geografi*, 5 (2), 122 - 131.
- [12] Makmur M., (2008). "Pengaruh Upwelling Terhadap Ledakan Alga (*Blooming Algae*) di Lingkungan Perairan Laut." *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pengolahan Limbah VI.* ISSN 1410-6086.