

SIMULASI NUMERIK OSILASI BIOLUMINESSENSI KUNANG-KUNANG

Nirwan Syarif

Jurusan Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya

ABSTRAK

Penelitian mengenai pola osilasi yang terjadi pada proses bioluminesensi dilakukan dengan menggunakan teknik simulasi numerik. Simulasi numerik diterapkan pada suatu model matematis yang merupakan satu set persamaan differensial kecepatan reaksi spesi kimia yang terlibat dalam reaksi dan merupakan hasil elusidasi dari mekanisme reaksi yang telah diusulkan oleh peneliti lain sebelumnya. Beberapa langkah operasi matematis diterapkan terhadap persamaan diferensial hingga dihasilkan diagram fase parameter. Diagram tersebut merupakan informasi mengenai berbagai kondisi dinamis sistem termasuk pola osilasi dan kestabilan sistem. Hasil pengamatan dari simulasi numerik model matematis yang ditemukan menunjukkan bahwa terdapat empat keadaan dinamis dengan dua pola osilasi yang terjadi pada proses ini, yaitu: osilasi teredam (damped oscillations), dan osilasi berkelanjutan (sustained oscillations) atau osilasi dengan siklus batas.

Kata kunci: bioluminesensi, osilasi, simulasi numerik

PENDAHULUAN

Dalam sistem reaksi kimia, reaksi osilasi menunjukkan keadaan sistem yang jauh dari kesetimbangan (*equalibrium*). Keadaan ini adalah akibat dari reaksi autokatalitik dan terjadi pada sistem terbuka. Reaksi osilasi dapat dijumpai pada fenomena alam berkala, seperti pergantian warna bunga disetiap musim, siklus berkala atau detak jantung. Pemancaran cahaya yang terjadi pada organisme tertentu juga merupakan

terjadinya reaksi osilasi. Pemancaran cahaya sendiri merupakan hasil dari proses bioluminesensi.

Bioluminesensi merupakan rangkaian reaksi kimia dari luciferin yang dioksidasi dan dikatalisasi oleh enzim luciferase. Rangkaian reaksi ini merupakan rangkaian reaksi bioluminesensi kunang-kunang dari McElroy. Rangkaian reaksi tersebut kemudian dimodifikasi untuk mendapatkan model yang digunakan dalam mempelajari reaksi osilasi yang terjadi. Pengamatan secara numerik dilakukan dengan bantuan

komputer; dengan menuliskan persamaan differensial laju reaksi pada perangkat lunak yang digunakan dengan data keluaran berupa grafik. Grafik yang dihasilkan merupakan informasi mengenai pola osilasi yang terjadi.

TUJUAN PENELITIAN

1. Mendapatkan model matematis reaksi osilasi yang mewakili proses/reaksi bioluminesensi.
2. Mencari pola-pola osilasi yang dapat terjadi.

TINJAUAN PUSTAKA

Reaksi Osilasi

Suatu sistem dikatakan stabil bila simpangan (gangguan) pada sistem dapat ditiadakan. Sebaliknya, sistem dikatakan tidak stabil jika simpangan tersebut cukup besar dan tidak dapat ditiadakan. Keadaan tidak stabil dapat menampilkan gejala nonlinier dalam sistem. Gejala-gejala nonlinier tersebut dapat berupa reaksi osilasi, fluktuasi senyawa kimia, keadaan mantap ganda atau kekacauan. Beberapa sistem yang pernah diteliti menunjukkan gejala nonlinier juga terdapat pada sistem reaksi kimia, seperti pada reaksi oksidasi asam malonat oleh bromat berkatalis serum, atau seperti pada sistem yang melibatkan proses-proses biokimia.

Keadaan Mantap Ganda

Pada sistem kimia, keadaan ini dijumpai pada modifikasi reaksi Belousov-Zhabotinsky (BZ) berupa sistem aduk kontinyu yang berisi asam sulfat, garam bromat dan katalis serum (II). Keadaan seperti ini dipacu dengan adanya gangguan yang cukup besar.

Keadaan mantap ganda juga merupakan salah satu sifat dinamis.

Bioluminesensi

Keadaan seperti ini dalam sistem reaksi kimia dapat ditemukan pada sistem kontinyu tanpa atau dengan pengadukan. Baru-baru ditemukan reaksi osilasi yang disebabkan oleh radiasi dan menghasilkan sinyal fluoresensi.

Sistem yang banyak diteliti dan dimodifikasi adalah Oregonator dan Bruselator. Oregonator merupakan mekanisme reaksi lengkap dari reaksi BZ, sedangkan Bruselator merupakan sistem reaksi abstrak.

Beberapa penelitian menunjukkan pengaruh enzim dalam reaksi osilasi sistem-sistem biologis. Sistem biologis yang menunjukkan osilasi dalam orde yang cukup singkat adalah bioluminesensi kunang-kunang. Fenomena ini dapat kita amati dalam bentuk kilatan-kilatan cahaya kunang-kunang pada malam hari. Cahaya yang dipancarkan

merupakan hasil reaksi yang terjadi dalam tubuh kunang-kunang. Rangkaian reaksi tersebut dengan bioluminesensi yang terjadi dalam badan yang dikenal dengan fotopor. Bioluminesensi juga ditemukan pada organisme lain baik didarat maupun dilaut.

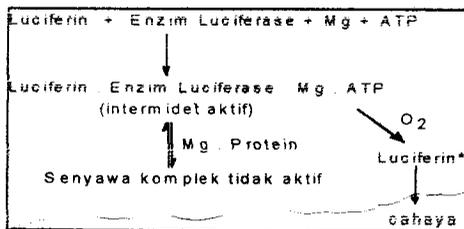
METODA PENELITIAN

Perangkat Penelitian

Simulasi numerik dilakukan dengan bantuan komputer. Komputer yang digunakan adalah komputer dengan prosessor Intel Pentium MMX 166 Mhz, RAM 64 Mb dijalankan dibawah sistem operasi Windows 98. Perangkat-perangkat lunak yang dipakai adalah pengolah data Difequ, Pengolah grafik MS-Excel 97, Pengolah kata MS Word 97.

Model Reaksi

Model reaksi yang diuji dalam penelitian ini adalah hasil ekstraksi dari mekanisme reaksi yang terjadi pada sistem bioluminesensi kunang-kunang, yaitu:



Gambar1. Mekanisme reaksi bioluminesensi

Selanjutnya dilakukan penentuan peranan masing-masing spesi kimia

(komponen) dalam model baik yang bertindak sebagai parameter, variabel bebas, variabel tak bebas.

Pengambilan Data Numerik

Percobaan dijalankan dengan menggunakan program bantu Difequ. Data awal adalah persamaan differensial kecepatan reaksi yang diekstraksi dari model. Difequ menyelesaikan persamaan differensial dengan menggunakan metoda Euler menghasilkan data-data keluar (*output*) berupa angka-angka dalam jumlah besar yang langsung diterjemahkan menjadi suatu grafik. Grafik yang dihasilkan adalah hasil pengamatan dari percobaan. Masukan data (*input*) yang dituliskan pada lembar kerja adalah konstanta kecepatan reaksi, konsentrasi awal, waktu awal dan waktu akhir.

HASIL DAN PEMBAHASAN

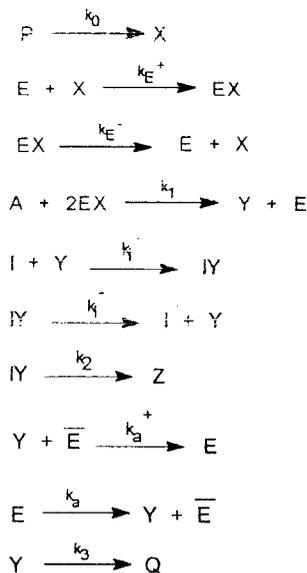
Model dibuat berdasarkan pada mekanisme reaksi yang diusulkan oleh McElroy. Beberapa senyawa yang terlibat dalam proses bioluminesensi adalah: luciferin, enzim luciferase, ATP, magnesium, oksigen dan inhibitor. Jalannya reaksi adalah sebagai berikut:

- Luciferin dan ATP masuk ke dalam fotopor dengan kecepatan tetap. Di dalam sistem, bersama dengan enzim luciferase

- membentuk fotoprotein.
- Dua molekul fotoprotein bereaksi dengan oksigen tekanan rendah menyebabkan eksitasi luciferin.
- Molekul luciferin tereksitasi kembali pada keadaan dasar disertai pemancaran cahaya.
- Senyawa kompleks nonaktif diubah menjadi senyawa kompleks inhibisi.

Luciferin tereksitasi mengaktifkan kembali luciferase

Dengan menggunakan notasi, mekanisme reaksi di atas diuraikan menjadi.



P : Luciferin, ATP di luar sistem
 X : P yang telah berada di dalam sistem
 EX : fotoprotein
 Y : luciferin tereksitasi
 A : oksigen
 I : penghambat
 E : enzim tidak aktif
 Q : cahaya yang dipancarkan

Dengan menggunakan pendekatan keadaan mantap, maka persamaan differensial laju reaksi spesi X dan Y adalah

$$\frac{d[X]}{dt} = k_0 P - k_{ac} [X][Y] \quad (1)$$

$$\frac{d[Y]}{dt} = k_{ac} [X][Y] - \frac{V_2[Y]}{K_{2M} + [Y]} - k_3[Y] \quad (2)$$

Pendekatan yang dilakukan adalah pada keadaan mantap sistem; [E], [EX], [E] dan [I] lebih kecil dari [X], [Y].

Persamaan (1) dan (2) masih mengandung 5 parameter, untuk itu perlu direduksi menjadi 2 parameter.

$$\frac{dX}{dt} = p - XY = f_1(X, Y) \quad (3)$$

$$\frac{dY}{dt} = XY - \frac{aY}{(1+Y)} - Y = f_2(X, Y) \quad (4)$$

Besarannya didefinisikan dibawah ini:

$$\begin{aligned}
 T &= K_{ac} K_{2M} k_3 / k_1; & Y &= \frac{[Y]}{K_{2M} k_3}; & X &= \frac{[X]}{K_{2M} k_3}; \\
 p &= \frac{k_0 [P]}{K_{2M} K_{ac} k_3}; & a &= \frac{V_2}{K_{2M} K_{ac} k_3}
 \end{aligned} \quad (5)$$

X adalah fotoprotein dan Y adalah luciferin tereksitasi.

Analisis Kestabilan

Analisis kestabilan adalah cara yang digunakan untuk menganalisis kestabilan dari persamaan differensial. Maka pada keadaan mantap konsentrasi X dan Y adalah:

$$Y_0 = 0, Y_0 = p - a - 1 \quad X_0 = p / (p - a - 1) \quad (12)$$

Y_0 memiliki 2 keadaan mantap.

Linierisasi persamaan (3) dan (4)

menghasilkan matriks 2x2:

$$\begin{bmatrix} -Y_0 & X_0 \\ Y_0 & X_0 - \frac{a}{(1+Y_0)^2} - 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Matriks diatas membentuk persamaan karakteristik:

$$\lambda^2 - \left(\frac{X_0 Y_0 - 2Y_0 - Y_0}{1+Y_0} \right) \lambda + \frac{X_0 Y_0 + Y_0^2}{1+Y_0} \quad (7)$$

dengan akar-akar persamaan kuadratnya, yaitu:

$$\lambda_{1,2} = (A - B) \pm \sqrt{(A + B)^2 - 4A} \quad (8)$$

Sifat-sifat dinamik (termasuk osilasi) dapat ditunjukkan dari nilai eigen persamaan (7).

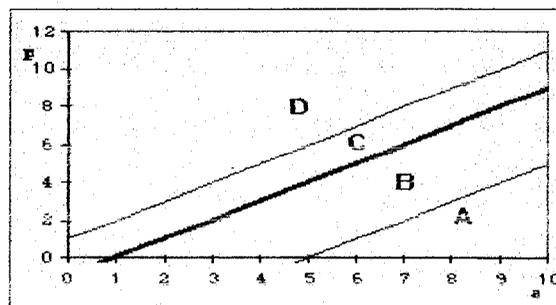
Osilasi akan terjadi bila nilai eigen yang dihasilkan memiliki bagian imajiner. Bagian imajiner ini akan dipenuhi jika $(A - B)^2 < 4A$. Osilasi yang terjadi dapat berupa osilasi berkelanjutan atau osilasi teredam, tergantung pada nilai $(A - B)$; $A > B$ osilasi berkelanjutan, $A < B$ osilasi teredam. Maka syarat batas bagi terjadinya osilasi adalah:

$$(p-a-1)(p-a+1)(p-a+5)=0 \quad (9)$$

Sedangkan syarat batas yang menyatakan jenis osilasi yang terjadi adalah:

$$(p-a-1)(p-a+1) = 0. \quad (10)$$

Osilasi teredam terjadi bila nilai persamaan di atas kecil dari nol, sebaliknya bila besar dari nol akan menghasilkan osilasi berkelanjutan. Maka diagram fase parameter yang dihasilkan.

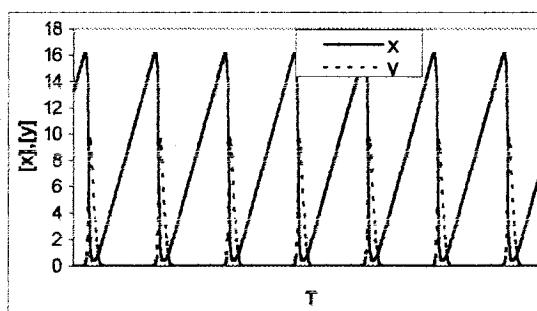


Gambar 2. Diagram fase a-p.

Diagram fase menunjukkan terdapat 4 keadaan dinamis sistem yang diwakili oleh ABCD.

Percobaan Numerik

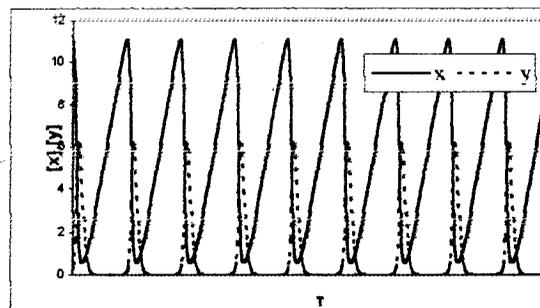
Wilayah yang pertama diamati adalah A. Diambil titik pada koordinat $a=8$ dan $p=2$.



Gambar 3. Hasil pengamatan wilayah A.

Gambar di atas menunjukkan adanya osilasi berkelanjutan pada wilayah A.

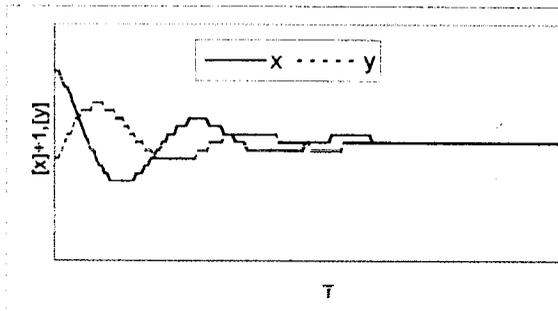
Percobaan pada wilayah B menghasilkan:



Gambar 4. Hasil pengamatan wilayah B.

Pada wilayah B (titik $p=5.6$; $a=2.8$) teramati osilasi berkelanjutan.

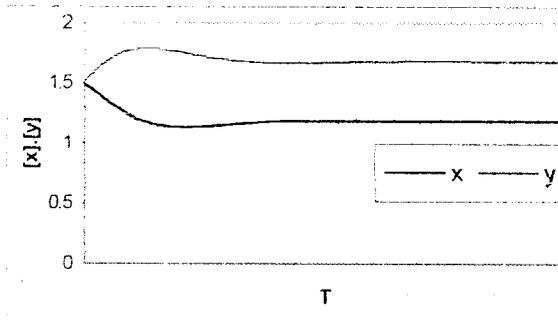
Percobaan ke-3 adalah pada wilayah C, menghasilkan:



Gambar 5. Hasil pengamatan wilayah C.

Pada wilayah C, teramati osilasi teredam dengan amplitudo lebih kecil.

Percobaan ke -4 adalah pada daerah D.



Gambar 6. Hasil pengamatan wilayah D.

Gambar di atas menunjukkan bahwa pada wilayah D, sistem tidak berosilasi.

percobaan memberikan informasi bahwa pada sistem ini terdapat 4 daerah dinamis dengan parameter yang digunakan $a-p$. Empat wilayah tersebut terbagi atas 1 wilayah osilasi berkelanjutan, 2 wilayah osilasi teredam, 1 daerah keadaan mantap stabil (*stable steady state*). Osilasi

berkelanjutan terjadi pada konsentrasi oksigen parsial tinggi dan pasokan luciferin, ATP ke dalam sistem (fotopor) cukup rendah. Keadaan osilasi berkelanjutan inilah yang dibutuhkan oleh kunang-kunang agar dapat melangsungkan kelap-kelip cahaya-nya secara terus menerus. Sebaliknya pada siang hari, dimana kelap-kelip cahaya kunang-kunang tidak terlihat, terjadi pemutusan pasokan oksigen tekanan parsial ke dalam fotopor. Luciferin, ATP yang masuk ke dalam fotopor disimpan dalam bentuk kompleks tidak aktif oleh Mg.Protein. Pada malam hari, simpanan tersebut dapat dikembalikan lagi menjadi fotoprotein. Proses yang sama juga dapat terjadi pada cacing tanah tertentu atau ubur-ubur.

KESIMPULAN

- Penelitian ini mendapatkan suatu model matematis baru (persamaan 3 dan 4).
- Penelitian ini menunjukkan bahwa fotoprotein dan luciferin tereksitasi memainkan peran penting dalam peristiwa osilasi pada bioluminesensi kunang-kunang.
- Ditemukan empat wilayah keadaan dinamis, yang dibagi atas: satu wilayah osilasi teredam, dua wilayah osilasi berkelanjutan dan satu tidak berosilasi.

DAFTAR PUSTAKA

- K.L. Quenney, "Chemical Oscillations in Enzyme Kinetics", *The Chemical Educator*, **1** (1996).
- S.A. Rice, *Physical and Chemical Kinetics*, (John Willey, New York, 1980), 1222-1227.
- G. Nicolis, "Chemical Oscillations", *Chem. Rev.* **73**, 365 (1973).
- P.H. Richer, "Chemical Instabilities", *Adv.Chem.Phys.* **27**, 217 (1973).
- B. Chance, *Biological and Biochemical Oscillators* (Academic Press, New York, 1973).
- F.H. Johnsons, *The Luminescence of the Biological System*, (Am. Ass. For the Adv. of Science, Washington DC., 1955)180-331