

**ANALISIS SENSITIVITAS PARAMETER TERHADAP BENTUK  
OSILASI DALAM PERSAMAAN OREGONATOR DENGAN  
MEMPERTIMBANGKAN MODEL TAK BERDIMENSI  
PADA REAKSI BELOUSOV- ZHABOTINSKII**

**(Skripsi)**

Oleh

**CYNTHIA WULANDARI**



**JURUSAN MATEMATIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2019**

## ABSTRACT

### ANALYSIS SENSITIVITY OF PARAMETER TO THE FORM OF OSCILLATION IN OREGONATOR EQUATION BY CONSIDERING THE DIMENSIONLESS MODELS ON THE REACTION OF BELOUSOV-ZHABOTINSKII

By

CYNTHIA WULANDARI

One chemical reaction that produces oscillation and pattern formation in each reaction is Belousov-Zhabotinskii chemical reaction. This reaction can be described through the mechanism of the oregonator as the process of the occurrence of the whole reaction. By applying the law of mass action, this mechanism can be modeled in the form of a system of differential equations which contains 3 dimensionless variables and is known as the *oregonator* model. The nondimensionalization and re-scaling process is carried out on the model to see the oscillation process when it reaches quasi equilibrium. The process of oscillation in reaching quasi equilibrium requires a period of time. In this study, the problem was discussed determining almost the period of oscillation of the Belousov-Zhabotinskii reaction by considering the dimensionless mathematical model through re-scaling. Numerical simulations in achieving quasi equilibrium show results that are in accordance with the analytical results approach through re-scaling process.

**Keywords:** Belousov-Zhabotinskii, *oregonator*, nondimensionalization process, the *oregonator* model, quasi-equilibrium, re-scaling.

## ABSTRAK

### ANALISIS SENSITIVITAS PARAMETER TERHADAP BENTUK OSILASI DALAM PERSAMAAN OREGONATOR DENGAN MEMPERTIMBANGKAN MODEL TAK BERDIMENSI PADA REAKSI BELOUSOV-ZHABOTINSKII

Oleh

CYNTHIA WULANDARI

Salah satu reaksi kimia yang menghasilkan osilasi dan pembentukan pola dalam setiap reaksinya adalah reaksi kimia Belousov-Zhabotinskii. Reaksi ini dapat digambarkan melalui mekanisme oregonator sebagai proses terjadinya keseluruhan reaksi. Dengan menerapkan hukum aksi massa, mekanisme ini dapat dimodelkan dalam bentuk sistem persamaan differensial yang memuat 3 peubah tak berdimensi dan dikenal sebagai model *oregonator*. Proses nondimensionalisasi dan penskalaan ulang dilakukan pada model tersebut untuk melihat proses osilasi ketika mencapai kuasi ekuilibrium. Proses osilasi dalam mencapai kuasi ekuilibrium membutuhkan waktu dalam perioda tertentu. Pada penelitian ini, dibahas masalah menentukan hampiran perioda osilasi reaksi Belousov-Zhabotinskii dengan mempertimbangkan model matematika tak berdimensinya melalui penskalaan ulang. Simulasi numerik dalam mencapai kuasi ekuilibrium menunjukkan hasil yang sesuai dengan pendekatan hasil analitik melalui proses penskalaan ulang.

**Kata kunci** : Belousov-Zhabotinskii, *oregonator*, proses nondimensionalisasi, model *oregonator*, kuasi ekuilibrium, penskalaan ulang.

**ANALISIS SENSITIVITAS PARAMETER TERHADAP BENTUK  
OSILASI DALAM PERSAMAAN OREGONATOR DENGAN  
MEMPERTIMBANGKAN MODEL TAK BERDIMENSI  
PADA REAKSI BELOUSOV-ZHABOTINSKII**

Oleh

**Cynthia Wulandari**

**Skripsi**

**Sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar  
SARJANA SAINS**

**pada**

**Jurusan Matematika  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2019**

Judul Skripsi : **Analisis Sensitivitas Parameter Terhadap Bentuk Osilasi Dalam Persamaan Oregonator Dengan Mempertimbangkan Model Tak Berdimensi Pada Reaksi Belousov-Zhabotinskii**

Nama Mahasiswa : **Cynthia Wulandari**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1517031050

Jurusan : Matematika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



**Dr. Aang Nuryaman, S.Si., M.Si.**  
NIP. 19740316 200501 1 001

**Amanto, S.Si., M.Si.**  
NIP. 19730314 200012 1 002

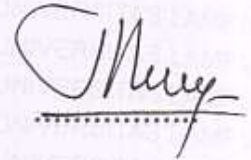
2. Ketua Jurusan Matematika

**Prof. Dra. Wamilliana, M.A., Ph.D.**  
NIP. 19631108 198902 2 001

**MENGESAHKAN**

**1. Tim Penguji**

**Ketua : Dr. Aang Nuryaman, S.Si., M.Si.**



**Sekretaris : Amanto, S.Si., M.Si.**



**Penguji  
Bukan Pembimbing : Drs. Suharsono S., M.S., M.Sc., Ph.D.** .....

**2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



**Drs. Suratman, M.Sc.**  
NIP. 19640604199003 1 002

**Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 19 Juli 2019**

## SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : **Cynthia Wulandari**  
Nomor Pokok Mahasiswa : **1517031050**  
Jurusan : **Matematika**  
Judul Skripsi : **Analisis Sensitivitas Parameter Terhadap Bentuk Osilasi Dalam Persamaan Oregonator Dengan Mempertimbangkan Model Tak Berdimensi Pada Reaksi Belousov-Zhabotinskii**

Dengan ini menyatakan bahwa penelitian ini adalah hasil pekerjaan saya sendiri dan sepanjang pengetahuan saya tidak berisi materi yang telah dipublikasikan atau ditulis orang lain atau telah dipergunakan dan diterima sebagai persyaratan penyelesaian studi pada Universitas atau Institut lain.

Bandar Lampung, 19 Juli 2019



**Cynthia Wulandari**  
NPM. 1517031050

## **RIWAYAT HIDUP**

Penulis bernama lengkap Cynthia Wulandari, Putri tunggal dari Bapak Hendry Yunaldi dan Ibu Susilah. Penulis lahir di Gisting pada tanggal 13 Juni 1997.

Penulis menempuh pendidikan dasar di SD Negeri 1 Banding Agung dari tahun 2003 s.d. 2009. Kemudian melanjutkan pendidikan Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 1 Talang Padang pada Tahun 2009 dan lulus pada tahun 2012. Setelah melanjutkan pendidikan Sekolah Menengah Pertama, penulis menempuh pendidikan Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 1 Pringsewu dan lulus pada tahun 2015.

Pada tahun 2015 penulis diterima sebagai mahasiswi di jurusan Matematika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN). Pada tahun 2018, penulis melakukan kerja praktik di BPJS Ketenagakerjaan kabupaten Pringsewu dan pada tahun yang sama sebagai salah satu bentuk pengabdian masyarakat penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata di Desa Itik Renday, Kecamatan Melinting, Kabupaten Lampung Timur, Lampung.



## PERSEMBAHAN

Alhammdulillahirobbil' alamin

Dengan mengucakan rasa syukur yang begitu besar kepada Allah SWT, yang telah memberikan kesempatan, pengalaman, ketabahan, rasa semangat dan pantang menyerah dalam menulis karya ini  
maka

Kupersembahkan karya ini kepada :

Kedua orang tuaku, Bapak Hendry Yunaldi dan Umi Susilah.

Terima kasih atas segala dukungan yang telah diberikan, baik dalam bentuk material, moral, semangat, cinta, kasih sayang dan Doa.

Maaf karena untuk saat ini, putrimu baru bisa memberikan sebuah karya. Semoga ditahun-tahun yang akan datang, putrimu ini bisa menghasilkan karya-karya terbaiknya.

Semoga ALLAH hadiahkan surga untuk Bapak dan Umi, karena sudah menjaga dan merawatku sampai saat ini.

Keluargaku, yang telah memberikan doa dan semangat kepada penulis.

Dosen pembimbing, penguji, dan Seluruh Dosen Matematika, FMIPA, Universitas Lampung. yang sangat berjasa memberikan arahan, semangat, pelajaran dan ilmu yang sangat berharga kepada penulis.  
Hanya Allah yang mampu membalas setiap kebaikan yang telah diberikan.

Sahabat-sahabat Jannahku. Terima kasih atas setiap kebaikan, keceriaan, kebersamaan, semangat, dan doa yang telah diberikan.

Almamater Universitas Lampung.

## **KATA INSPIRASI**

"Dan setiap orang memperoleh tingkatan sesuai dengan apa yang telah mereka kerjakan, dan agar Allah mencukupkan balasan perbuatan mereka, dan mereka tidak dirugikan."

(Q.S. Al-Ahqaf : 19)

Kalau pengetahuan anda mau ditambah oleh Allah, mudah dalam belajar, kuat dalam ingatan. Tingkatkan ketakwaanmu kepada Allah maka Allah akan ajarkan anda pengetahuan (ilmu)

(Ustad Adi Hidayat)

Doa disaat tahajud adalah umpama panah yang tepat mengenai sasaran  
(Imam Syafi'i)

Manusia hanya bisa berencana dan merancang sebegus yang ia bisa. Namun, Allah adalah sebaik-baik perencana dan setiap rencana-Nya telah tersusun indah dalam suatu suratan takdir.

(Cynthia Wulandari)

## SANWACANA

Alhamdulillahirobbil'alamin, puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “ Analisis Sensitivitas Parameter Terhadap bentuk Osilasi Dalam Persamaan Oregonator Dengan Mempertimbangkan Model Tak Berdimensi Pada Reaksi Belousov-Zhabotinskii”.

Penulis menyadari bahwa dalam penyelesaian skripsi ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Aang Nuryaman, S.Si., M.Si., selaku Dosen pembimbing 1 yang telah meluangkan waktu untuk membimbing, memberikan masukan, memotivasi, serta kritik dan saran yang membangun kepada penulis dalam penyusunan skripsi sehingga skripsi bisa menjadi lebih baik lagi.
2. Bapak Amanto, S.Si.,M.Si., selaku dosen pembimbing II terima kasih atas bimbingan dan saran yang membangun kepada penulis dalam penyusunan skripsi ini.
3. Bapak Suharsono S., M.S., M.Sc., Ph.D., selaku Dosen Pembahas yang telah memberikan kritik dan saran yang positif dalam penyusunan skripsi ini.

4. Bapak Drs. Tiryono Ruby, M.Sc., Ph.D., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah memberikan arahan, bimbingan, serta motivasi dan semangat bagi penulis selama masa studi.
5. Ibu Prof. Dra. Wamilliana, MA., Ph.D., selaku Ketua Jurusan Matematika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Lampung.
6. Bapak Drs. Suratman, M.Sc. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Lampung.
7. Seluruh Dosen dan staff Jurusan Matematika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA), Universitas Lampung.
8. Kedua orang tua penulis, yang selalu memberikan semangat, motivasi, dukungan melalui doa maupun bentuk material kepada penulis agar dapat memberikan hasil yang terbaik.
9. Sahabat kuliahku, Yunisa Sari Pandela, Friend Until jannah yaitu Atika, Indah, Risna, Azizah, Azzahra yang selalu memberikan motivasi dan dukungan doa untuk segera menyelesaikan skripsi ini. Calon S.Si yang memberikan banyak pembelajaran selama proses perkuliahan.
10. Bang Rahmat Riyanto, kak Divka, yunda Fais, kakak tingkat angkatan 2013, dan 2014 dan teman-teman seperjuangan angkatan 2015 yang mungkin tidak bisa disebutkan satu persatu yang telah memberikan banyak pembelajaran selama proses perkuliahan.
11. Syifa, Rizka, adik tingkat angkatan 2016, 2017 dan 2018 yang telah berikan banyak pembelajaran selama proses perkuliahan.

Semoga seluruh kebaikan, dukungan, bantuan, dan motivasi yang telah dicurahkan maupun diberikan mendapatkan balasan pahala yang setimpal dari Allah SWT. Penulis juga berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat untuk pengembangan bidang ilmu selanjutnya.

Akhir kata, penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna untuk itu penulis mengarapkan kritik dan saran yang bersifat membangun.

2019

Bandar Lampung, 19 Juli

Penulis

**Cynthia Wulandari**

## DAFTAR ISI

Halaman

### DAFTAR GAMBAR

#### I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	2
1.3 Manfaat Penelitian.....	3

#### II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Persamaan Differensial Biasa .....	4
2.2 Sistem Persamaan Differensial .....	5
2.3 Kondisi Tunak (Steady State) .....	5
2.4 Pemodelan Matematika.....	5
2.5 Proses Nondimensionalisasi .....	6
2.6 Notasi <i>Big-O</i> .....	7
2.7 Reaksi Belousov-Zhabotinskii .....	7
2.8 Mekanisme Reaksi Belousov-Zhabotinskii.....	8
2.9 Proses Reaksi Belousov-Zhabotinskii.....	9
2.10 Mekanisme Field, Koros, Noyes (FKN) .....	10
2.11 <i>Oregonator</i> .....	11
2.12 Mekanisme Reaksi <i>Oregonator</i> .....	11
2.13 Reaksi Osilasi.....	12
2.14 Pengertian Laju Reaksi .....	13
2.15 Hukum Aksi Massa.....	14

#### III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian .....	16
3.2 Langkah-Langkah Penelitian .....	16

#### **IV. HASIL DAN PEMBAHASAN**

4.1	Model Oregonator Dalam Reaksi Belousov-Zhabotinskii.....	18
4.2	Proses Nondimensionalisasi.....	20
4.3	Proses Osilasi .....	48
4.4	Formula Periode Osilasi.....	50
4.5	Simulasi Numerik .....	53

#### **V. KESIMPULAN**

#### **DAFTAR PUSTAKA**

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
4.1 Hubungan $x$ sebagai fungsi $y$ pada proses 1.....	31
4.2 Hubungan $Z$ sebagai fungsi $y$ pada proses 1 .....	31
4.3 Perilaku $Z$ sebagai fungsi $X(Z)$ pada proses 1 menuju proses 2 .....	38
4.4 Hubungan antara fungsi $X(Z)$ dan nilai $f < \frac{1}{2}$ terhadap kuasi ekuilibrium .....	39
4.5 Hubungan antara fungsi $X(Z)$ dan nilai $f > \frac{1}{2}$ terhadap kuasi ekuilibrium .....	40
4.6 Hubungan antara fungsi $X(Z)$ terhadap nilai $f$ pada kuasi ekuilibrium .....	48
4.7 Osilasi Reaksi Belousov-Zhabotinskii .....	50
4.8 Simulasi numerik terhadap bentuk osilasi untuk parameter $f = 0,25$ sampai $f = 1$ pada model <i>oregonator</i> .....	57
4.9 Simulasi numerik terhadap bentuk osilasi untuk parameter $f < 0,5$ pada model nondimensionalisasi .....	61
4.10 Simulas numerik terhadap bentuk osilasi untuk parameter $f > 0,5$ pada model nondimensionalisasi .....	63
4.11 Simulasi numerik untuk nilai parameter $f < 0,25$ pada penskalaan ulang model <i>oregonator</i> dalam proses nondimensionalisasi .....	66
4.12 Simulasi numerik untuk nilai parameter $f > 0,25$ pada penskalaan ulang model <i>oregonator</i> dalam proses nondimensionalisasi .....	67



# I. PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Dalam kehidupan sehari-hari hampir semua fenomena alam, erat kaitannya dengan reaksi kimia yang dapat dilihat atau tidak dapat dilihat oleh mata. Reaksi kimia sendiri dapat diartikan sebagai transformasi atau perubahan dalam struktur molekul, yang bisa menghasilkan penggabungan molekul menjadi lebih besar maupun pembelahan molekul menjadi lebih kecil.

Reaksi kimia yang terus berkembang, membuat para ilmuwan tidak berhenti untuk mengkaji setiap reaksi yang ada. Terdapat banyak sekali reaksi kimia yang sangat unik untuk dipelajari dan diteliti, salah satunya adalah reaksi kimia Belousov-Zhabotinskii. Reaksi ini dikenal sebagai salah satu reaksi kimia yang menghasilkan osilasi dan pembentukan pola dalam setiap reaksinya.

Selain itu, reaksi Belousov-Zhabotinskii termasuk reaksi penting dalam kimia teoritis. Reaksi ini membuktikan bahwa tidak semua reaksi kimia harus dalam keadaan setimbang untuk bereaksi, dikarenakan reaksi ini jauh dari kesetimbangan.

Fenomena reaksi Belousov-Zhabotinskii banyak digunakan pada dunia biologi dan kimia. Reaksi ini mampu menganalogikan osilasi biokimia, kepastian gelombang kimia, dan fenomena *pulsatory* seperti pengumpulan kotoran jamur *Dictyostelium discoideum* yang didekati dengan pembentukan osilasi dari reaksi ini.

Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dikaji mengenai model matematika dari reaksi Belousov-Zhabotinskii serta pengaruh perubahan nilai parameter terhadap perilaku osilasi dan menemukan hampiran formula perioda osilasi dari reaksi Belousov-Zhabotinskii.

## 1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah

1. Mengkontruksi bentuk model *oregonator* dari reaksi kimia Belousov-Zhabotinskii.
2. Menganalisis sensitivitas nilai parameter yang terlibat dalam model *oregonator* terhadap perilaku osilasi (waktu tertentu), serta mempertimbangkan model tak berdimensinya untuk mendapatkan hampiran formula perioda osilasi.

### **1.3 Manfaat Penelitian**

Manfaat penelitian ini adalah sebagai berikut

1. Memahami dan memperdalam konsep mengenai ilmu matematika yang bisa diaplikasikan ke dalam ilmu kimia.
2. Mempelajari ilmu matematika yang bisa diaplikasikan ke dalam program komputer.
3. Mampu menganalisis hasil dari pemodelan matematika yang telah diaplikasikan ke dalam program komputer.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Persamaan Differensial Biasa

Persamaan differensial adalah persamaan yang melibatkan peubah-peubah tak bebas dan turunan-turunannya terhadap peubah-peubah bebas. Persamaan differensial dapat diklasifikasikan dalam dua kelas yaitu biasa dan parsial. Persamaan differensial biasa adalah suatu persamaan differensial yang hanya mempunyai satu variabel bebas. Jika  $y(x)$  adalah suatu fungsi satu peubah, maka  $x$  dinamakan peubah bebas dan  $y$  dinamakan peubah tak bebas. Secara umum, persamaan differensial biasa orde 1 dapat dituliskan sebagai berikut

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y) \quad (2.1)$$

atau dalam bentuk

$$M(x, y)dx + N(x, y)dy = 0 \quad (2.2)$$

Didalam persamaan differensial terdapat orde persamaan differensial yang ditentukan oleh turunan tingkat tertinggi dari persamaan tersebut. (Kusmaryanto, 2013).

## 2.2 Sistem Persamaan Differensial

Terdapat bentuk sistem persamaan differensial yang cukup umum, yang dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{dx}{dt} = \dot{x} = f(x) \quad (2.3)$$

Dimana  $x = x(t) \in R^n$  adalah fungsi bernilai vektor dari peubah bebas (waktu) dan  $f: U \rightarrow R^n$  adalah fungsi halus yang didefinisikan pada beberapa subset  $U \subseteq R^n$  (Guckenheimer dan Holmes, 1983).

## 2.3 Kondisi Tunak (Steady State)

Sebuah titik  $\bar{x} \in R^n$  dapat dikatakan titik ekuilibrium atau solusi kondisi steady state dari

$$\dot{x} = f(x) \text{ jika } f(\bar{x}) = 0 \quad (2.4)$$

Ketika  $\bar{x}$  adalah sebuah titik ekuilibrium, maka fungsi konstan  $x(t) = \bar{x}$ , untuk semua  $t$  adalah suatu solusi (Hale dan Kocak, 1991).

## 2.4 Pemodelan Matematika

Model matematika didefinisikan sebagai kontruksi yang dirancang untuk mempelajari sistem atau fenomena dunia nyata yang disertai kontruksi, grafis, simbolik, simulasi, dan eksperimental. Model matematika dapat dibedakan menjadi dua bagian yaitu

model matematika yang dapat mempelajari fenomena dunia nyata dan model fenomena khusus. Adapun langkah-langkah dalam pemodelan matematika, dapat dituliskan sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi masalah yang dihadapi.
2. Membuat asumsi dengan mengidentifikasi dan mengklasifikasi hubungan antara peubah dengan bagian model.
3. Menyelesaikan model matematika.
4. Memeriksa model matematika dengan data didunia nyata.
5. Mengimplementasikan model matematika.
6. Mempertahankan model matematika.

Langkah-langkah tersebut membutuhkan keahlian, sehingga terdapat teknik ilmiah yang diterapkan (Giordano, dkk., 2014).

## 2.5 Proses Nondimensionalisasi

Dalam menyederhanakan masalah berkaitan dengan peubah tanpa dimensi ( peubah tanpa unit), dapat dilakukan dengan proses yang dikenal sebagai *nondimensionalization*. Proses ini memiliki manfaat tambahan untuk mengurangi jumlah parameter dalam sistem, sehingga mengurangi kompleksitas masalah. Proses nondimensionalisasi dapat dinyatakan, jika sebuah model memiliki peubah  $u$  maka persamaan nondimensionalisasinya dapat dituliskan sebagai berikut:

$$u = [u]u^* \quad (2.5)$$

dimana  $[u]$  adalah skala yang dipilih, dan  $u^*$  adalah variabel tanpa dimensi yang sesuai, persamaan ini juga berlaku untuk nondimensionalisasi terhadap waktu (Fowler, 1997).

## 2.6 Notasi Big-O

Didefinisikan :

$f = O(\phi)$  sebagai  $\varepsilon \downarrow \varepsilon_0$  berarti ada konstanta  $k_0$  dan  $\varepsilon_1$  ( tidak bergantung dari  $\varepsilon$ ) sehingga

$$|f(\varepsilon)| \leq k_0 |\phi(\varepsilon)| \text{ untuk } \varepsilon_0 < \varepsilon < \varepsilon_1.$$

Dikatakan bahwa  $f$  adalah “big Oh” dari  $\phi$  sebagai  $\varepsilon \downarrow \varepsilon_0$  (Fowler, 1997).

## 2.7 Reaksi Belousov-Zhabotinskii

Reaksi Belousov-Zhabotinskii adalah contoh paling awal yang dipahami dengan baik dari sistem kimia yang menghasilkan osilasi dan pembentukan pola. Pertama kali ditemukan pada tahun 1951 oleh biofisikawan Soviet Boris Belousov. Pada saat itu, para ahli kimia skeptis terhadap kemungkinan suatu rangkaian yang menghasilkan amplitudo berubah-ubah secara periodik (*oscillator*) dalam kimia. Hal ini mengakibatkan Belousove tidak bisa menerbitkan karyanya. Satu dekade kemudian, seorang ilmuwan Soviet lainnya bernama Anatol Zhabotinskii mengkaji eksperimen Belousov. Ilmuan tersebut berhasil membujuk lebih banyak ahli kimia, untuk

menerima gagasan tentang suatu rangkaian yang menghasilkan amplitudo berubah-ubah secara periodik (*oscillator*) dalam kimia (Hill dan Morgan, 2003).

Hukum termodinamika kedua menjelaskan bahwa mustahil bagi sistem manapun untuk mengalami sebuah proses, di mana sistem menyerap panas dari reservoir pada suhu tunggal dan mengubah panas seluruhnya menjadi kerja mekanik. Kemudian sistem berakhir pada keadaan yang sama seperti keadaan awalnya. Reaksi Belousov-Zhabotinskii yang menghasilkan *oscillator* dalam kimia, tidaklah melanggar hukum termodinamika kedua. Hal ini dikarenakan proses termodinamika yang berlangsung secara alami adalah proses yang tidak dapat diubah (*irreversible*) sedangkan untuk proses yang dapat diubah (*reversible*) akan selalu mendekati keadaan kesetimbangan termodinamika antara sistem dengan lingkungannya (Young dan Freedman, 2002).

## 2.8 Mekanisme Reaksi Belousov-Zhabotinskii

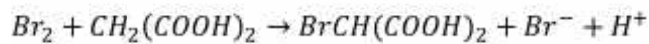
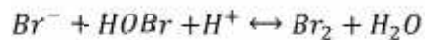
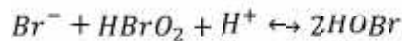
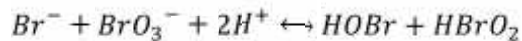
Reaksi Belousov-Zhabotinskii terdiri dari dua proses. Pada proses I, konsentrasi Bromin  $[Br^-]$  tinggi sedangkan konsentrasi Asam Bromit  $[HBrO_2]$  rendah. Konsentrasi Bromin  $[Br^-]$  yang tinggi dibutuhkan untuk menghasilkan konsentrasi Asam bromit  $[HBrO_2]$  agar proses II dapat terjadi. Ketika konsentrasi Asam bromit  $[HBrO_2]$  telah tinggi, dimana proses II sedang terjadi maka secara otomatis konsentrasi Bromin  $[Br^-]$  akan kembali diproduksi untuk selanjutnya kembali ke proses I. Kedua proses ini akan terus berlangsung hingga reaksi ini mencapai kesetimbangannya. Reaksi Belousov-Zhabotinskii menggunakan Cerium  $[Ce^{4+}]$



sebagai katalis untuk mempercepat reaksinya. Selain itu, mekanisme reaksi Belousov-Zhabotinskii harus memuat lima senyawa penting agar dapat bereaksi. Kelima senyawa tersebut adalah  $Br^-$  (Bromin),  $HBrO_2$  (Asam bromit),  $Ce^{4+}$  (Cerium),  $HOBr$  (Asam hipobromus),  $BrO_3^-$  (Ion Bromat) (Fowler, 1997).

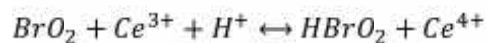
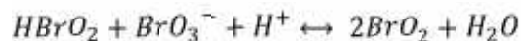
## 2.9 Proses Reaksi Belousov-Zhabotinskii

Poses I dalam reaksi Belousov-Zhabotinskii terjadi sebagai berikut :

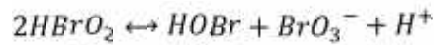


Proses I membutuhkan bantuan katalis untuk mempercepat reaksi menuju proses II, sehingga terjadi proses oksidasi senyawa  $[Ce^{3+}]$  menjadi  $[Ce^{4+}]$  dengan senyawa  $[BrO_2]$  untuk menghasilkan  $[HBrO_2]$  yang dibutuhkan pada proses II.

Proses II yang terjadi dalam reaksi ini, adalah sebagai berikut



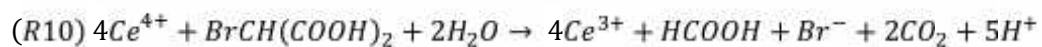
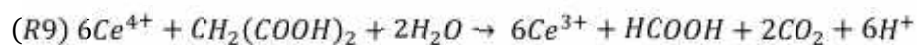
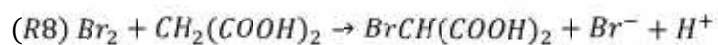
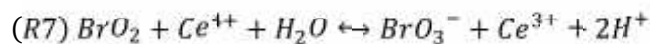
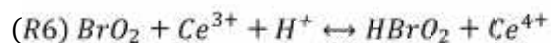
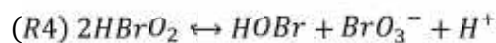
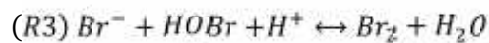
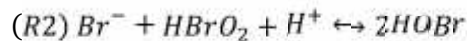
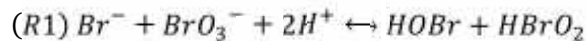
Selain proses I dan proses II, terjadi penambahan reaksi berupa pereduksian katalis  $[Ce^{4+}]$  menjadi  $[Ce^{3+}]$  yang diusulkan oleh Field dan Noyes. Reaksi tersebut dapat dituliskan sebagai berikut



Kesepuluh reaksi di atas dikenal sebagai reaksi Belousov-Zhabotinskii atau mekanisme FKN (Fowler, 1997).

## 2.10 Mekanisme Field, Koros, Noyes (FKN)

Mekanisme FKN adalah mekanisme yang diusulkan oleh Field, Koros, dan Noyes. Mekanisme ini terdiri dari 10 proses reaksi dasar yang dapat ditunjukkan sebagai berikut:



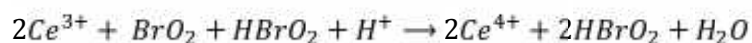
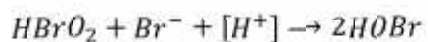
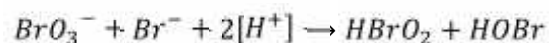
Mekanisme FKN dapat dikatakan masih terlalu rumit untuk perhitungan numerik, karena mencakup banyak langkah dasar dan bentuk kimia. Sehingga Field dan Noyes menyederhanakan mekanisme tersebut dan mengusulkan model *oregonator* (Kinoshita, 2013).

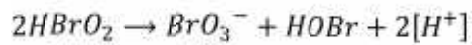
## 2.11 Oregonator

Pada tahun 1972, tiga peneliti di *University of Oregon*, Field, Koros, dan Noyes, menerbitkan mekanisme lengkap yang menggambarkan reaksi Belousov-Zhabotinskii yang dikenal sebagai mekanisme FKN. Namun, persamaan mereka terlalu rumit untuk analisis numerik oleh komputer pada saat itu. Akibatnya, Field dan Noyes menyuling model mereka ke satu set persamaan diferensial biasa dengan tiga peubah ( $X, Y$ , dan  $Z$ ). Persamaan tersebut dikenal dengan "*the Oregonator*" (Hill dan Morgan, 2003).

## 2.12 Mekanisme Oregonator

Mekanisme FKN yang telah disederhanakan menjadi beberapa reaksi kimia dapat dituliskan sebagai berikut :





Reaksi di atas disebut sebagai mekanisme *oregonator* dan digolongkan menjadi dua proses didalam reaksi Belousov-Zhabotinskii. Dimana proses pertama Bromine akan dikonsumsi, sedangkan pada proses kedua Bromine akan diproduksi. Kelima reaksi di atas nantinya akan diubah ke dalam bentuk model *oregonator* berupa peubah  $X, Y,$  dan  $Z,$  untuk memudahkan perhitungan numerik didalam reaksi Belousov-Zhabotinskii (Fowler, 1997).

### 2.13 Reaksi Osilasi

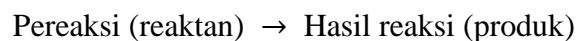
Reaksi osilasi kimia adalah salah satu fenomena yang paling mengesankan dalam reaksi kimia. Dalam satu jenis reaksi kimia, campuran bahan kimia dapat menghasilkan semburan gas, berbusa hingga serangkaian perubahan warna yang berulang secara berkala. Reaksi osilasi dapat dikatakan sebagai contoh "sihir kimia", dikarenakan reaksi kimia hanya menuju satu arah dan sulit ditemukan reaksi kimia yang muncul untuk membalikkan dirinya, apalagi melakukan hal itu berulang kali.

Ketika reaksi berlangsung seperti ini, mungkin cenderung dianalogikan sebagai osilator fisik sederhana seperti pendulum. Dimana sebuah bandul berosilasi dari sisi ke sisi melalui posisi ekuilibriumnya. Osilator kimia mungkin tampak berayun melalui komposisi kesetimbangannya. Namun ini bertentangan dengan hukum kedua termodinamika, yang menegaskan bahwa sekali sistem kimia mencapai

kesetimbangan maka tidak dapat menyimpang dari kondisi itu secara spontan (Shakhashiri, 1985).

## 2.14 Pengertian Laju Reaksi

Bidang kimia yang mengkaji kecepatan, laju dan terjadinya reaksi kimia dinamakan kinetika kimia. Kinetika kimia dalam reaksi kimia menyangkut perubahan dari suatu pereaksi (reaktan) menjadi hasil reaksi (produk) yang dinyatakan dengan persamaan reaksi:



Laju reaksi dapat dinyatakan sebagai berkurangnya konsentrasi pereaksi atau bertambahnya konsentrasi hasil reaksi setiap satu satuan waktu (detik). Laju reaksi dapat dituliskan dengan persamaan sebagai berikut:



$$\text{Laju reaksi} = -\frac{\Delta[A]}{\Delta t} \text{ atau } \text{Laju reaksi} = +\frac{\Delta[B]}{\Delta t} \quad (2.7)$$

Tanda negatif dari  $\Delta[A]$  menunjukkan bahwa A berkurang,  $\Delta[B]$  bertanda positif karena B bertambah (Chang, 2005)

Selanjutnya didefinisikan mengenai persamaan laju reaksi yang menunjukkan adanya hubungan antara konsentrasi zat yang tersisa saat itu dengan laju reaksi. Tinjau suatu reaksi dalam bentuk persamaan



Persamaan laju reaksi dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$v = k[A]^m[B]^n \quad (2.9)$$

dengan:

$v$  = laju reaksi ( $\text{mol L}^{-1} \text{det}^{-1}$ )

$k$  = tetapan laju reaksi

$m$  = tingkat reaksi (orde reaksi) terhadap A

$n$  = tingkat reaksi (orde reaksi) terhadap B

$[A]$  = konsentrasi awal A ( $\text{mol L}^{-1}$ )

$[B]$  = konsentrasi awal A ( $\text{mol L}^{-1}$ )

Dengan  $a, b, g, h$  merupakan koefisien reaksi dan orde laju reaksi tidak bisa dinyatakan sebagai koefisien dari sebuah reaksi. Apabila dalam sebuah reaksi tidak diketahui data ordenya maka dapat diasumsikan orde reaksi tersebut adalah 1 (Petrucci, 1985).

## 2.15 Hukum Aksi Massa

Secara umum reaksi yang dapat berlangsung kedua arah dapat dinyatakan sebagai berikut :



Dalam hal ini  $a, b, c,$  dan  $d$  adalah koefisien mengenai hubungan kuantitatif reaktan dan produk dalam reaksi kimia (stokiometri). Konstanta kesetimbangannya atau yang dikenal dengan hukum aksi massa dari reaksi kimia tersebut adalah

$$K = \frac{[C]^c[D]^d}{[A]^a[B]^b} \quad (2.11)$$

Persamaan ini menghubungkan konsentrasi reaktan dan produk pada kesetimbangan dengan konstanta kesetimbangan. Konstanta kesetimbangan dapat dinyatakan sebagai hasil bagi, dimana pembilangnya adalah hasil kali antara konsentrasi- konsentrasi kesetimbangan produk masing-masing dipangkatkan koefisien stokiometri dalam persamaan setara. Laju reaksi pertambahan produk adalah

$$\text{laju reaksi produk} = k_1[A]^a[B]^b \quad (2.12)$$

sedangkan untuk laju reaksi pengurangan produk adalah

$$\text{laju reaksi reaktan} = k_2[C]^c[D]^d \quad (2.13)$$

Laju reaksi akan bergantung pada laju awal pada konsentrasi awal, konstanta k dibedakan karena k laju reaksi produk dengan laju reaksi reaktan tidak sama (Chang, 2005).

### **III. METODE PENELITIAN**

#### **3.1 Waktu dan Tempat Penelitian**

Penelitian ini dilakukan pada semester Ganjil tahun akademik 2018/2019 di Jurusan Matematika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.

#### **3.2 Langkah -Langkah Penelitian**

Penelitian ini dilakukan melalui studi pustaka yaitu mempelajari buku-buku yang terkait dengan reaksi Belousov-Zhabotinskii, proses nondimensionalisasi dan sebagainya di perpustakaan maupun yang dapat diakses melalui internet. Adapun langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian adalah sebagai berikut:

1. Menjabarkan reaksi Belousov-Zhabotinskii.
2. Melakukan pemisalan reaksi Belousov-Zhabotinskii ke dalam bentuk sederhana.
3. Menentukan model *oregonator* dari persamaan laju reaksi yang diperoleh melalui bentuk sederhana hasil pemisalan reaksi Belousov-Zhabotinskii.



4. Mengkontruksi model *oregonator* yang diperoleh dari reaksi Belousov-Zhabotinskii melalui proses nondimensionalisasi.
5. Menentukan hampiran formula perioda osilasi dan simulasi numerik dari reaksi Belousov-Zhabotinskii.
6. Menganalisis sensitivitas parameter  $f$  terkait reaksi perubahan Cerium menjadi Bromine pada reaksi Belousov-Zhabotinskii terhadap perilaku osilasi.
7. Menginterpretasikan hasil analisis yang diperoleh.

## V. KESIMPULAN

Berdasarkan dari hasil dan pembahasan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa :

1. Model *oregonator* untuk reaksi kimia Belousov-Zhabotinskii yaitu :

$$\frac{dX}{dt} = k_1AY - k_2XY + k_3AX - 2k_4X^2$$

$$\frac{dY}{dt} = -k_1AY - k_2XY + f k_5Z$$

$$\frac{dZ}{dt} = 2k_3AX - k_5Z$$

2. Nilai parameter  $f$  yang terkait dengan reaksi perubahan Cerium menjadi Bromin sangat berpengaruh dalam menggambarkan perilaku osilasi pada reaksi Belousov-Zhabotinskii. Hal ini akan dijelaskan sebagai berikut
  - a. Untuk model *oregonator*, hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa model *oregonator* belum mencapai titik kuasi ekuilibrium dan akan semakin baik untuk berosilasi ketika nilai parameter  $f$  semakin besar.
  - b. Untuk model *oregonator* yang mempertimbangkan model tak berdimensi (model nondimensionalisasi), ketika nilai parameter  $f < 0,5$  hasil simulasi numerik menunjukkan hasil yang tidak valid. Sedangkan nilai parameter

$f > 0,5$  menunjukkan bahwa model tidak mencapai kuasi ekuilibrium sehingga perlu dilakukan penskalaan ulang.

- c. Pada penskalaan ulang model nondimensionalisasi menunjukkan, model ini sudah mencapai kuasi ekuilibrium dan tidak berosilasi kembali dengan semakin bertambahnya nilai parameter  $f$ . Ketika nilai parameter  $f < 0,25$  maka model ini akan mencapai kuasi ekuilibrium (berhenti bereaksi) pada proses 1 sedangkan untuk  $f > 0,25$  akan berhenti bereaksi bereaksi pada proses 2.
3. Hampiran formula solusi periode osilasi untuk mencapai kuasi ekuilibrium dari reaksi Belousov-Zhabotinskii adalah

$$P = \ln \left( \frac{1}{(3 + 2\sqrt{2})q} \right) - 1$$

## DAFTAR PUSTAKA

- Chang, R. 2003. Kimia Dasar Konsep Konsep Inti Edisi ketiga Jilid 2. Erlangga, Jakarta.
- Fowler, A.C. 1997. *Mathematical Models in the Applied Science*. Cambridge university Press, United State of Amerika.
- Giordano, F.R.,dkk. 2014. *A First Couse in Mathematical Modeling Fifth Edition*. Chengage Learning, Boston.
- Guckenheimer, J., dan Homles, P. 1893. *Nonlinear Oscillation, Dynamical System and Bifurcations of vector fields*. Springer, New York.
- Hale J., dan Kocak, H. 1991. *Dynamics and Bifurcations*. Springer, New York.
- Hill, D., dan Morgan, T. 2003. *Pattern Formation and Wave Propagation in the Belousov-Zhabotinskii Reaction*. University of California, California.
- Kusmaryanto, S. 2013. Matematika Teknik I. UB Press, Malang.
- Petrucci, R. H. 1985. Kimia Dasar Prinsip dan Terapan Modern. Erlangga, Bogor.
- Shakhashiri, Bassam Z. 1985. *Chemical Demonstrations*. The University of Wisconsin Press, London.
- Young, H.D, dan Freedman, R.A. 2002. Fisika Universitas Edisi Kesepuluh. Erlangga, Jakarta.