

**SIMULASI PENDETEKSIAN SINYAL SENSOR GAS H<sub>2</sub>S BERBASISKAN  
FUNGSI KERJA ZnO**

**(Skripsi)**

**Oleh**

**Zhara Nabila**



**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2024**

## ABSTRAK

### SIMULASI PENDETEKSIAN SINYAL SENSOR GAS H<sub>2</sub>S BERBASISKAN FUNGSI KERJA ZnO

Oleh

ZHARA NABILA

Penelitian ini berhasil membuat simulasi untuk pendeteksian sinyal H<sub>2</sub>S pada permukaan ZnO berdasarkan fungsi kerja menggunakan metode mekanisme reaksi dengan membuat Persamaan Diferensial Biasa. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perbandingan antara hasil eksperimen dan simulasi dengan melibatkan 3 reaksi dasar. Penelitian ini berhasil memperoleh 12 parameter baru yang belum didapatkan dari studi literatur, yaitu  $E_{f1}$  (0,0905 eV),  $E_{r1}$  (0,715 eV),  $E_{f2}$  (0,015 eV),  $E_{r2}$  (0,158 eV),  $E_{f3}$  (0,368 eV),  $E_{r3}$  (0,064 eV),  $v_{r1}$  ( $9,5 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ ),  $v_{r2}$  ( $1,425 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ ),  $v_{r3}$  ( $2,05 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ ),  $v_{f3}$  ( $3,25 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ ),  $S_{0-H_2S}$  (2,18), dan  $S_{0-O}$  (0,423). Simulasi ini menghasilkan *trend* grafik yang sama dengan eksperimen, yaitu *work function change* ( $\Delta\Phi$ ) pada simulasi sebesar -24 mV, sedangkan pada eksperimen Widanarto *et al.* sebesar -25 mV dengan *average error* sebesar 0,0095 V. Penelitian ini juga berhasil memperkirakan nilai *coverage* ( $\theta$ ) atom/molekul gas yang terdapat pada permukaan ZnO dengan nilai *coverage* molekul H<sub>2</sub>S sebesar  $1,4 \times 10^{-2}$  ML, *coverage* atom O sebesar 0,024 ML, *coverage* molekul SO<sub>2</sub> sebesar  $10^{-5}$  ML, dan *coverage* molekul H<sub>2</sub>O sebesar  $10^{-5}$  ML.

**Kata kunci:** perubahan fungsi kerja, sensor gas, hidrogen sulfida, seng oksida

## ABSTRACT

### SIGNAL DETECTION SIMULATION OF H<sub>2</sub>S GAS SENSOR BASED ON ZnO-WORK FUNCTION

By

ZHARA NABILA

This research simulated the signal detection of hydrogen sulfide (H<sub>2</sub>S) on the ZnO surface based on work function used a reaction mechanism method by created Regular Differential Equation. This research aims to compare the experiment and simulation involving three essential reactions. This research obtained twelve values of parameters which were not available from many literatures, i.e.,  $E_{f1}$  (0,0905 eV),  $E_{r1}$  (0,715 eV),  $E_{f2}$  (0,015 eV),  $E_{r2}$  (0,158 eV),  $E_{f3}$  (0,368 eV),  $E_{r3}$  (0,064 eV),  $v_{r1}$  ( $9,5 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ ),  $v_{r2}$  ( $1,425 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ ),  $v_{r3}$  ( $2,05 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ ),  $v_{f3}$  ( $3,25 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ ),  $S_{0-H_2S}$  (2,18) and  $S_{0-O}$  (0,423). This simulation produces the same graphic trend as in experiment. The work function change ( $\Delta\Phi$ ) in simulation is -24 mV, while in the experiment of Widanarto et al. is -25 mV with an average error of 0.0095 V. This research also estimated the coverage value of gas atoms/molecules found on the ZnO surface i.e.,  $1,4 \times 10^{-2}$  ML of H<sub>2</sub>S molecule, 0,024 ML of O atom,  $10^{-5}$  ML of SO<sub>2</sub> molecule, and  $10^{-5}$  ML of H<sub>2</sub>O molecule.

**Keyword:** *work function change, gas sensor, hydrogen sulfide, zinc oxide.*

**SIMULASI PENDETEKSIAN SINYAL SENSOR GAS H<sub>2</sub>S BERBASISKAN  
FUNGSI KERJA ZnO**

**Oleh**

**ZHARA NABILA**

**Skripsi**

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh Gelar  
SARJANA SAINS**

**Pada**

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



**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2024**

Judul Skripsi : **SIMULASI PENDETEKSIAN SINYAL  
SENSOR GAS H<sub>2</sub>S BERBASISKAN FUNGSI  
KERJA ZnO**

Nama Mahasiswa : **Zhara Nabila**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2017041007**

Jurusan : **Fisika**

Fakultas : **Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**

Bandar Lampung, 17 Januari 2024

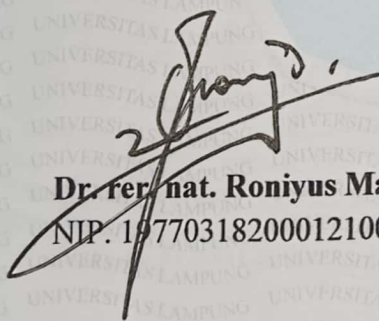


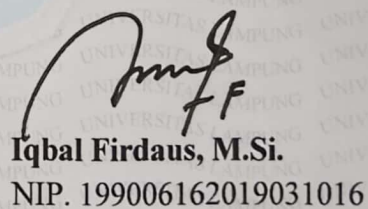
**MENYETUJUI**

**1. Komisi Pembimbing**

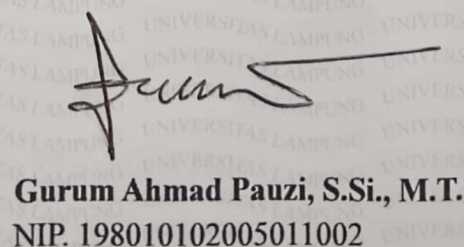
Pembimbing I

Pembimbing II

  
**Dr. rer. nat. Roniyus Marjunus, M.Si.**  
NIP. 197703182000121003

  
**Iqbal Firdaus, M.Si.**  
NIP. 199006162019031016

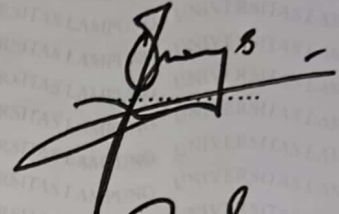
**2. Ketua Jurusan Fisika**

  
**Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T.**  
NIP. 198010102005011002

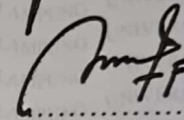
**MENGESAHKAN**

**1. Tim Penguji**

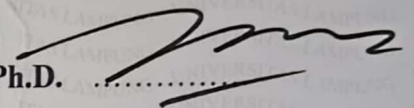
**Ketua : Dr. rer. nat Roniyus Marjunus, M.Si.**



**Sekretaris : Iqbal Firdaus, M.Si.**

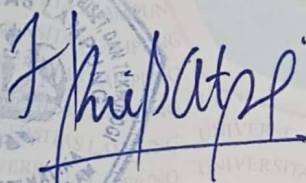


**Penguji Bukan : Prof. Drs. Posman Manurung, M.Si., Ph.D.**



**Pembimbing**

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



**Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si.**

**NIP. 197110012005011002**

**Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 17 Januari 2024**

## PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan oleh orang lain dan sepanjang pengetahuan saya tidak ada karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan oleh orang lain kecuali yang secara tertulis dicantumkan dalam daftar pustaka. Selain itu, saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan ini tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 17 Januari 2024



**Zhara Nabila**  
NPM. 2017041007



## RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Zhara Nabila merupakan anak tunggal dari pasangan Bapak Marzuki dan (Almh) Ibu Dewita yang dilahirkan di Bandar Lampung pada tanggal 02 November 2002. Penulis bersuku bangsa Melayu yang berasal dari Lintang Kanan, Sumatra Selatan dan berdomisili di Lampung. Penulis menyelesaikan pendidikan di Taman Kanak-kanak (TK) An-Nur pada tahun 2008, Sekolah Dasar (SD) Negeri 2 Perumnas Way Halim tahun 2014, Sekolah Menengah Pertama (SMP) Negeri 29 Bandar Lampung pada tahun 2017, dan Sekolah Menengah Atas (SMA) Negeri 5 Bandar Lampung pada tahun 2020. Penulis terdaftar sebagai mahasiswi Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung melalui jalur SNMPTN pada tahun 28 September 2020 dengan mengambil konsentrasi bidang Fisika Material.

Selama menjadi mahasiswi, penulis aktif dalam berbagai organisasi yaitu Dewan Perwakilan Mahasiswa (DPM) Universitas Lampung sebagai Legislator Muda PSDM tahun 2020 dan menjadi Anggota Komisi V (Hubungan Luar) tahun 2021. Penulis juga aktif dalam organisasi Badan Eksekutif Mahasiswa (BEM) FMIPA sebagai Anggota PSDM tahun 2021 dan Himpunan Mahasiswa Fisika (HIMAFI) sebagai Anggota Biro Dana dan Usaha tahun 2021 serta Anggota Minat dan Bakat tahun 2022. Penulis juga tergabung dalam beberapa kepanitian, salah satunya adalah Training Legislatif yang diselenggarakan pada tahun 2020 yang mendatangkan langsung beberapa narasumber seperti Bapak Taufik Basari, S.H., S.Hum., LL.,M (anggota DPR RI), Ibu Lesty Putri Utami, S.H., M.Kn (anggota DPRD Provinsi Lampung), dan beberapa jajaran penting lainnya. Lalu, penulis



juga pernah menjadi sekretaris acara dalam kegiatan Kajian Sains dan Teknologi tahun 2021.

Selain aktif berorganisasi, penulis juga memiliki karya dalam bidang Teknologi Informasi yang diterbitkan dalam Jurnal Sinta yang berjudul ***“Implementation of Google Translate Application Programming Interface (API) as a Text and Audio Translator”*** serta mengikuti perlombaan Essay Nasional yang diselenggarakan oleh Universitas Brawijaya dalam kegiatan *Indonesian Student Summit 2022* dan memperoleh Juara III dalam bidang pertanian dengan judul karya **“Beras Sikop: Inovasi, Strategi Marketing, dan Stratup”**.

Pada tahun 2023, penulis melakukan pengabdian masyarakat dengan mengikuti program Kuliah Kerja Nyata (KKN) Universitas Lampung Periode I di Pekon Banjarmasin, Kota Agung Barat, Kabupaten Tanggamus. Adapun hasil dari Program Kerja penulis diterbitkan dalam Jurnal Buguh yang berjudul **“Penyuluhan Pertanian Pengendalian Hama Tikus dan Pembuatan Biosaka sebagai Upaya Mendukung Sistem Pertanian Berkelanjutan di Pekon Banjarmasin”**. Penulis juga melaksanakan Praktik Kerja Lapangan (PKL) pada tahun 2023 di Laboratorium Dinas Lingkungan Hidup Provinsi Lampung yang berlokasi di Teluk Betung Selatan, Bandar Lampung dengan judul penelitian **“Analisis Konsentrasi Logam Seng (Zn) dan Mangan (Mn) pada Sampel Air Sungai Menggunakan Spektrofotometri Serapan Atom (SSA)”**.

Selama menjadi mahasiswi, penulis berkontribusi dalam Akreditasi Internasional ASIIN yang diselenggarakan pada 5 Juli 2023 sebagai salah satu narasumber dari pihak mahasiswa dan mengikuti lebih dari 70 Forum Ilmiah baik Tingkat Nasional maupun Internasional termasuk GEOSMART 2022 yang diselenggarakan oleh United Nation (UN) dalam bentuk kerja sama multilateral serta Audit Quality yang diselenggarakan oleh The Institute of Chartered Accountants of England and Wales (ICAEW). Menjelang tahun terakhir sebagai mahasiswi, penulis meraih Juara I dalam Pemilihan Mahasiswa Berprestasi (PILMAPRES) kategori Program Sarjana dengan gagasan kreatif berjudul **“Penerjemah Multibahasa Dengan Convolutional Neural Network (CNN) untuk Penyandang Disabilitas (Tuna**

**Rungu dan Tuna Netra) guna Mewujudkan *Sustainable Development Goals* (SDGs) 2030”.**

Penulis juga memiliki rekam jejak karir, yang dimulai dengan merintis usaha pribadi sejak tahun 2020 dan menjadi Master Teacher di PT Ruang Raya Indonesia sejak tahun 2022 dengan memegang 10 cabang di 7 Provinsi dan pada tahun 2023 menjadi Guru Fisika di Ar-Raihan Islamic Sci-Tech School Bandar Lampung. Selain itu, penulis menjadi salah satu Asisten di Dinas Perkebunan Provinsi Sumatra Selatan dan pernah menjadi Asisten Praktikum dalam mata kuliah Pemrograman Komputer dan Teknologi Informasi di tahun 2023. Yang pada akhirnya, dengan keras dan kehendak-Nya penulis dapat menyelesaikan penelitian Tugas Akhir di Jurusan Fisika yang berjudul “**Simulasi Pendeteksian Sinyal Sensor Gas H<sub>2</sub>S Berbasis Fungsi Kerja ZnO**”.

## MOTTO

فَإِنَّ مَعَ الْعُسْرِ يُسْرًا , إِنَّ مَعَ الْعُسْرِ يُسْرًا

“Maka sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan,  
sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan.”

(QS Al-Insyirah: 5-6)

“Discipline today creates options tomorrow.”

“We don’t need to be good to start, but we have to start to be good!”

“Ketakutanmu yang akan mematikanmu.”

“In the end, you’re measured not by how much you undertake but by  
what you finally accomplish.”

- Donald Trump -

“Mustahil, Tuhan membawamu sejauh ini untuk gagal!”

- Anonim -

## PERSEMBAHAN

### *Bismillahirrahmanirrahim..*

Dengan penuh rasa syukur kepada Allah SWT, karya ini kupersembahkan kepada:

### *Kedua Orang Tuaku*

Bapak Marzuki dan (Almh) Ibu Dewita

Terima kasih atas segala dukungan, do'a, usaha, dan fasilitas yang selalu diberikan untuk kesuksesan putrinya hingga mampu menyelesaikan pendidikan di tingkat Universitas sebagai seorang Sarjana Sains.

### *Kerabat*

Keluarga Besar Kosim Lintang Kanan dan Keluarga Besar M. Yusuf Djamil  
Muara Dua Haji

Terima kasih atas segala dukungan, saran, dan semangat yang telah diberikan sehingga dapat tetap bertahan dalam keadaan suka maupun duka.

### *Bapak dan Ibu Dosen*

Terima kasih atas ilmu pengetahuan dan budi pekerti yang telah diajarkan.

### *Rekan Seperjuangan dan Partner Kerja*

Terima kasih untuk bantuan, dukungan, kebersamaan, dan pengalaman yang telah kalian berikan.

### *Almamater Tercinta*

UNIVERSITAS LAMPUNG

## KATA PENGANTAR

Segala puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah memberikan kesehatan, rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan berjudul “**Simulasi Pendeteksian Sinyal Sensor Gas H<sub>2</sub>S Berbasis Fungsi Kerja ZnO**”. Tujuan penulisan skripsi ini adalah sebagai salah satu persyaratan untuk mendapatkan gelar Sarjana Prodi Fisika FMIPA Universitas Lampung dan juga melatih mahasiswa untuk berpikir cerdas dan kreatif dalam menulis karya ilmiah.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penelitian dan penulisan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan adanya kritik dan saran yang membangun untuk memperbaiki kekurangan tersebut. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat dan menambah pengetahuan bagi penulis maupun pembaca.

Bandar Lampung, 17 Januari 2024

Penulis,

Zhara Nabila

## SANWACANA

Puji dan syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT, karena atas kuasanya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Penulis menyadari bahwa untuk menyelesaikan penelitian dan skripsi ini tidak lepas dari dukungan dan bantuan pihak lain. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua yang selalu mendo'akan penulis dan terus memberikan kasih sayang berupa arahan, dukungan, dan nasihat kepada putri kecilnya hingga dapat menyelesaikan pendidikan di Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. rer. nat Roniyus Marjunus, M.Si. selaku Dosen Pembimbing I dan Wakil Dekan III FMIPA Universitas Lampung yang telah memberikan waktu, bimbingan, arahan, dan telah memberikan ilmunya kepada penulis selama penelitian dan proses penyusunan skripsi.
3. Bapak Iqbal Firdaus, M.Si. selaku Dosen Pembimbing II dan pembimbing Lomba Essay Nasional ISS 2022 yang telah memberikan arahan, nasihat, dan saran dalam kepenulisan.
4. Bapak Prof. Drs. Posman Manurung, M.Si., Ph.D. selaku Dosen Pembahas yang telah memberikan kritik dan saran sehingga penulisan skripsi ini dapat lebih baik, serta telah berbagi cerita kehidupan yang sangat berkesan selama masa perkuliahan yang membuka wawasan bagi penulis.
5. Bapak Drs. Pulung Karo-Karo, M.Si. selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah berbagi cerita dan pengalamannya serta memberikan nasihat, motivasi, dan dukungan bagi penulis selama masa kuliah.
6. Ibu Humairoh Ratu Ayu, M.Si. selaku dosen *Artificial Intelligence* dan pembimbing Lomba Essay Nasional ISS 2022 yang telah memberikan dedikasi dan pengalamannya kepada penulis yang sangat amat berarti.

7. Bapak Arif Surtono, M.Si., M.Eng. selaku dosen *Artificial Intelligence* yang telah berbagi ilmunya dan memotivasi penulis selama masa perkuliahan.
8. Ibu Dra. Endang Linirin Widiastuti, M.Sc., Ph.D. selaku Pembimbing PILMAPRES 2023 dan sekaligus telah menjadi keluarga bagi penulis. Terima kasih atas dedikasi, pengalaman, dan ceritanya yang telah diberikan satu tahun terakhir ini.
9. Bapak Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T. selaku Pembimbing PILMAPRES 2023 dan Ketua Jurusan yang telah memberikan arahan dan nasihatnya serta berbagi pengalaman kepada penulis.
10. Ibu Dr. Yanti Yulianti, M.Si. selaku Juri PILMAPRES 2023 dan Sekretaris Jurusan Fisika yang telah memeberikan arahan dan nasihatnya kepada penulis.
11. Seluruh dosen dan staff Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung yang telah berbagi ilmu dan cerita, serta membantu penulis semasa kuliah.
12. Seluruh jajaran Fakultas MIPA Universitas Lampung yang sedikit banyaknya telah membantu penulis semasa kuliah dan kompetisi.
13. Kepada Bintang Widia Sandi Haryawan (Hubungan Internasional-UNILA), Adi Sulaksono (Teknik Informatika-ITERA), dan Fransisca Ayu Wulandari (Teknik Geofisika-ITERA) selaku rekan seperjuangan dan teman baik semasa sekolah penulis yang telah menjadi *support system* dalam merajut asa dan menggapai cita, tempat berbagi cerita baik suka maupun duka, dan membantu penulis sejak masa sekolah hingga saat ini.
14. Kepada Kak Arkham Muhammad Naufal (Teknologi Informasi-IIB Darmajaya), Theo Aulia Akbar (Teknik Elektro-UNILA), Adi Sucipto, Abdullah Haris Tandoko, dan M. Syarif Hidayatullah selaku senior dalam riset komputasi yang sedikit banyaknya membantu dan memberikan nasihat kepada penulis.
15. Kepada partner kerja penulis yang telah memberikan motivasi, nasihat, dan pengalamannya kepada penulis untuk dapat menyelesaikan studi dengan cepat.
16. Seluruh mahasiswa/mahasiwi jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung angkatan 2020.



17. Seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

Bandar Lampung, 17 Januari 2024  
Penulis,

Zhara Nabila

## DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	ii
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	iii
<b>LEMBAR PERSETUJUAN</b> .....	iv
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	v
<b>HALAMAN PERNYATAAN</b> .....	vi
<b>RIWAYAT HIDUP</b> .....	vii
<b>MOTTO</b> .....	x
<b>PERSEMBAHAN</b> .....	xi
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	xii
<b>SANWACANA</b> .....	xiii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xvi
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xix
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xxi
<b>DAFTAR SIMBOL</b> .....	xxii
<b>I. PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	6

1.3 Batasan Masalah .....	6
1.4 Tujuan Penelitian.....	6
1.5 Manfaat Penelitian .....	7
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>8</b>
2.1 Gas H <sub>2</sub> S pada Material ZnO.....	8
2.1.1 Fungsi Kerja Material.....	8
2.1.2 Adsorpsi.....	9
2.1.3 Interaksi .....	12
2.1.4 Disosiasi .....	13
2.1.5 Desorpsi.....	13
2.2 Reaksi Pendeteksian Gas H <sub>2</sub> S .....	13
2.3 Pendeteksian Gas H <sub>2</sub> S Berbasiskan Fungsi Kerja.....	16
<b>III. METODE PENELITIAN .....</b>	<b>18</b>
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian .....	18
3.2 Alat dan Bahan.....	18
3.3 Prosedur Penelitian .....	18
3.3.1 Persamaan Diferensial Biasa (PDB) Orde Satu .....	18
3.3.2 Grafik Fitting .....	19
3.3.3 Optimasi Parameter.....	19
3.3.4 Optimasi Ulang Parameter .....	20
3.3.5 Simulasi Akhir .....	21
3.4 Diagram Alir .....	21
<b>IV. HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>25</b>
4.1 Persamaan Diferensial Biasa .....	25
4.2 Persamaan Garis .....	26
4.3 Optimasi Parameter .....	27
4.3.1 Energi Adsorpsi H <sub>2</sub> S pada Material ZnO ( $E_{f1}$ ) .....	28
4.3.2 Energi Adsorpsi O pada Material ZnO ( $E_{f2}$ ).....	29
4.3.3 Energi <i>Forward Reaction</i> pada Material ZnO ( $E_{f3}$ ).....	30
4.3.4 Energi Desorpsi H <sub>2</sub> S pada Material ZnO ( $E_{r1}$ ) .....	30

4.3.5 Energi Desorpsi O pada Material ZnO ( $E_{r2}$ ) .....	31
4.3.6 Energi <i>Reverse Reaction</i> pada Material ZnO ( $E_{r3}$ ) .....	32
4.3.7 Koefisien Arrhenius Desorpsi H <sub>2</sub> S pada Material ZnO ( $v_{r1}$ ) .....	33
4.3.8 Koefisien Arrhenius Desorpsi O pada Material ZnO ( $v_{r2}$ ).....	34
4.3.9 Koefisien Arrhenius <i>Reverse Reaction</i> pada Material ZnO.....	35
4.3.10 Koefisien Arrhenius <i>Forward Reaction</i> pada Material ZnO .....	36
4.3.11 <i>Initial Sticking Coefficient</i> H <sub>2</sub> S pada Material ZnO ( $S_{0-H_2S}$ ).....	37
4.3.12 <i>Initial Sticking Coefficient</i> O pada Material ZnO ( $S_{0-O}$ ) .....	38
4.4 Simulasi Akhir Fungsi Kerja Gas H <sub>2</sub> S pada Material ZnO .....	40
<b>V. KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>46</b>
5.1 Kesimpulan .....	46
5.2 Saran .....	47
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>48</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>54</b>

## DAFTAR GAMBAR

	<b>Halaman</b>
<b>Gambar 2.1</b> Diagram adsorpsi dan <i>work function change</i> (a) terpapar gas pengoksidasi, (b) tidak terpapar gas, dan (c) terpapar gas pereduksi.....	9
<b>Gambar 2.2</b> Proses (a) adsorpsi fisis dan (b) adsorpsi kimia.....	10
<b>Gambar 2.3</b> Suhu sensor Ag <sub>2</sub> O dalam mendeteksi 20 ppm gas H <sub>2</sub> S .....	16
<b>Gambar 2.4</b> Selektivitas sensor pada suhu 165°C dalam kondisi kering.....	17
<b>Gambar 3.1</b> Diagram alir optimasi parameter .....	22
<b>Gambar 3.2</b> Diagram alir optimasi ulang parameter .....	23
<b>Gambar 3.3</b> Diagram alir simulasi akhir penelitian.....	24
<b>Gambar 4.1</b> Fitting persamaan garis pada penelitian Widanarto <i>et al.</i> (2011).....	27
<b>Gambar 4.2</b> Optimasi kedua $E_{f1}$ dengan lebar partisi 0,0005 eV.....	28
<b>Gambar 4.3</b> Optimasi kedua $E_{f2}$ dengan lebar partisi 0,005 eV.....	29
<b>Gambar 4.4</b> Optimasi kedua $E_{f3}$ dengan lebar partisi 0,007 eV.....	30
<b>Gambar 4.5</b> Optimasi kedua $E_{r1}$ dengan lebar partisi 0,01 eV.....	31
<b>Gambar 4.6</b> Optimasi kedua $E_{r2}$ dengan lebar partisi 0,002 eV.....	32
<b>Gambar 4.7</b> Optimasi kedua $E_{r3}$ dengan lebar partisi 0,001 eV.....	33
<b>Gambar 4.8</b> Optimasi kedua $\nu_{r1}$ dengan lebar partisi $10^{11} \text{ s}^{-1}$ .....	34
<b>Gambar 4.9</b> Optimasi kedua $\nu_{r2}$ dengan lebar partisi $10^{11} \text{ s}^{-1}$ .....	35
<b>Gambar 4.10</b> Optimasi kedua $\nu_{r3}$ dengan lebar partisi $10^{11} \text{ s}^{-1}$ .....	36

<b>Gambar 4.11</b> Optimasi kedua $v_{f3}$ dengan lebar partisi $10^{11} \text{ s}^{-1}$ .....	37
<b>Gambar 4.12</b> Optimasi kedua $S_{0-H_2S}$ dengan lebar partisi 0,04.....	38
<b>Gambar 4.13</b> Optimasi kedua $S_{0-O}$ dengan lebar partisi 0,01.....	39
<b>Gambar 4.14</b> Grafik perbandingan antara hasil simulasi dengan eksperimen..	40
<b>Gambar 4.15</b> Coverage molekul $H_2S$ pada permukaan ZnO ( $\theta_{H_2S}$ ).....	42
<b>Gambar 4.16</b> Coverage molekul O pada permukaan ZnO ( $\theta_O$ ) .....	43
<b>Gambar 4.17</b> Coverage molekul $SO_2$ pada permukaan ZnO ( $\theta_{SO_2}$ ) .....	44
<b>Gambar 4.18</b> Coverage molekul $H_2O$ pada permukaan ZnO ( $\theta_{H_2O}$ ) .....	45

## DAFTAR TABEL

	<b>Halaman</b>
<b>Tabel 2.1</b> Parameter reaksi pendeteksian gas H <sub>2</sub> S.....	15
<b>Tabel 3.1</b> Parameter tebakan pada optimasi parameter .....	20
<b>Tabel 4.1</b> Nilai akhir parameter .....	40



## DAFTAR SIMBOL

Simbol	Keterangan	Satuan
$ads$	<i>Adsorption</i>	-
$E_F$	Energi Fermi	eV
$E_{VAC}$	Energi vakum	eV
$E_a$	Energi adsorpsi	eV
$E_{diss}$	Energi disosiasi	eV
$E_d$	Energi desorpsi	eV
$E_{f1}$	Energi adsorpsi H <sub>2</sub> S pada material ZnO	eV
$E_{f2}$	Energi adsorpsi O <sub>2</sub> pada material ZnO	eV
$E_{f3}$	Energi <i>forward</i> gas pada material ZnO	eV
$E_{r1}$	Energi desorpsi H <sub>2</sub> S pada material ZnO	eV
$E_{r2}$	Energi aktivasi O <sub>2</sub> pada material ZnO	eV
$E_{r3}$	Energi <i>reverse</i> gas pada material ZnO	eV
$F$	Fluks molekul	molekul.m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
$k$	Konstanta Boltzmann	JK <sup>-1</sup>
$m$	Massa molekul gas	kg
$N_{ads}$	Jumlah atom/molekul pada <i>surface</i>	atom/molekul
$P$	Tekanan gas	Pa
$S$	<i>Surface area</i>	-
$s$	Fase adsorpsi pada permukaan material	-
$S_0$	<i>Initial sticking coefficient</i>	-
$S_{0-H_2S}$	<i>Initial sticking coefficient</i> H <sub>2</sub> S	-
$S_{0-O}$	<i>Initial sticking coefficient</i> O <sub>2</sub>	-

Simbol	Keterangan	Satuan
$T$	Suhu	K
$\Phi$	<i>Work Function</i>	eV
$\Delta\Phi$	<i>Work Function Change</i>	eV
$\theta$	Hunian/Cakupan	ML
$\theta_{\text{H}_2\text{S}}$	Hunian molekul H <sub>2</sub> S	ML
$\theta_{\text{O}}$	Hunian atom O	ML
$\theta_{\text{SO}_2}$	Hunian molekul SO <sub>2</sub>	ML
$\theta_{\text{H}_2\text{O}}$	Hunian molekul H <sub>2</sub> O	ML
$\sigma$	Rapat permukaan atom	atom/m <sup>2</sup>
$\nu_{\text{diss}}$	Koefisien Arrhenius AB	disosiasi/s
$\nu_d$	Koefisien Arrhenius	disosiasi/s
$\nu_{\text{r}_2}$	Koefisien Arrhenius desorpsi O <sub>2</sub> pada material ZnO	s <sup>-1</sup>
$\nu_{\text{r}_3}$	Koefisien Arrhenius <i>forward</i> H <sub>2</sub> S pada material ZnO	s <sup>-1</sup>
$\nu_{\text{r}_3}$	Koefisien Arrhenius <i>reverse</i> H <sub>2</sub> S pada material ZnO	s <sup>-1</sup>
$\nu_r$	Koefisien Arrhenius dari reaksi AB	reaksi/s
$r_a$	Laju penyerapan	atom/molekul/s
$z$	Konstanta gas	-

## I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Emisi gas beracun menjadi bahaya lingkungan dan ancaman serius bagi semua makhluk di bumi. Gas yang cukup berbahaya adalah *hydrogen sulfide* (H<sub>2</sub>S) yang dihasilkan melalui dekomposisi bahan organik, ekstraksi minyak bumi, dan gas alam (Ranea *et al.*, 2019). H<sub>2</sub>S dapat dilepaskan dari produk daging, makanan laut, telur, dan susu selama memasak dan penyimpanan (Galstyan *et al.*, 2018). *National Research Council* (2009) menyatakan bahwa H<sub>2</sub>S merupakan gas beracun yang tidak berwarna serta mudah terbakar yang lebih berat dari udara dan terlihat pada konsentrasi serendah 0,00047 ppm. Efek toksik dari H<sub>2</sub>S pertama kali didokumentasikan kira-kira 300 tahun lalu (Ramazzini, 1713).

Menghirup gas H<sub>2</sub>S dalam konsentrasi rendah sekalipun dapat berakibat fatal dalam waktu singkat (Glass, 1990). Kehadiran gas beracun ini menyebabkan iritasi mata, kelelahan, sakit kepala, ingatan buruk, pusing, kelumpuhan penciuman, dan gangguan pernapasan (Chou and Selene, 2003). *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA) melaporkan bahwa konsentrasi ambang aman gas H<sub>2</sub>S ditetapkan menjadi 20 ppm untuk beban kerja 8 jam (Sriram *et al.*, 2015).

Pada konsentrasi 100 ppm, gas ini memiliki kemampuan dalam melumpuhkan indra penciuman dan mematikan pada konsentrasi 500 ppm (Hendrickson *et al.*, 2004). Selain itu, H<sub>2</sub>S dapat mengakibatkan kerusakan struktur material, menyebabkan korosi pada bahan logam hingga mempercepat penuaan pada bahan non-logam (Kaur *et al.*, 2008), serta dapat menonaktifkan katalis yang dapat menyebabkan hilangnya energi atau efisiensi reaksi (Guo *et al.*, 2014). H<sub>2</sub>S juga merupakan polutan atmosfer dan sumber penting hujan asam (Guo *et al.*, 2015). Akan tetapi, H<sub>2</sub>S yang larut dalam air, alkohol, minyak bumi, dan minyak mentah adalah salah satu produk penting dalam industri gas alam (Dorman *et al.*, 2000).

H<sub>2</sub>S perlu direduksi menjadi kadar yang rendah dalam gas alam, gas sintesis kimia, dan gas bahan bakar turunan batubara karena efek negatifnya terhadap lingkungan dan proses kimia (Cheah *et al.*, 2009). *Semiconductor Metal Oxide* (SMO) telah diselidiki sebagai *desulfurizer* untuk menghilangkan H<sub>2</sub>S (Najjar and Jung, 1995) karena kemampuannya dalam berinteraksi dengan senyawa gas (Yamazoe and Shimanoe, 2008). Sensor ini terdiri dari film tipis berbahan oksida yang beroperasi dengan mengukur perubahan konduktivitas setelah gas menyerap di permukaan bahan (Klingshirn, 2007). Sensor ini berperan dalam mendeteksi gas dengan membentuk daerah penipisan karena adanya adsorpsi spesies oksigen yang terionisasi pada permukaan. Hal ini terjadi karena adanya reaksi antara ion oksigen teradsorpsi dengan target molekul gas serta perpindahan ion oleh molekul yang bergantung pada suhu penginderaan (Barsan and Weimar, 2001). Semakin luas kekosongan oksigennya, maka respon gas yang dihasilkan semakin tinggi (Han, 2010). Pengembangan dari sensor gas H<sub>2</sub>S berkinerja tinggi telah menjadi kebutuhan yang mendesak karena metode *probe fluoresen* (Li *et al.*, 2013),

*electrochemiluminescence* (Zhang *et al.*, 2014), dan metode kimia (Henthorn and Pluth, 2015) begitu rumit dan mahal dalam pendeteksiannya. Saat ini, gas H<sub>2</sub>S telah terpantau menggunakan sensor *chemiresistive* berbahan ZnO (Rout *et al.*, 2008) karena ZnO merupakan *desulfurizer* yang sangat efisien (Gupta *et al.*, 2001) dalam menghilangkan spesies belerang (Novochinskii *et al.*, 2004).

Penggunaan sensor gas berbahan ZnO memiliki mobilitas elektron konduksi yang tinggi, stabilitas kimia dan termal yang baik di bawah kondisi pengoperasian, dan tidak menyebabkan pencemaran lingkungan (Henrich and Cox, 1994) dengan mereduksi konsentrasi H<sub>2</sub>S menjadi beberapa ppm (Gibson III and Harrison, 1980). Berdasarkan hasil eksperimen yang dilakukan Shinde *et al.* (2012) memperlihatkan bahwa ZnO memiliki sensitivitas dan stabilitas yang tinggi dalam mendeteksi gas H<sub>2</sub>S dengan konsentrasi 100 ppm pada suhu 50°C dan pada suhu 300°C memiliki waktu *response* dan *recovery* sensor yang lebih stabil (Mortezaali and Moradi, 2014) dengan energi aktivasi antara gas H<sub>2</sub>S dan material ZnO sebesar 30.31 kJ/mol (Westmoreland and Harrison, 1976).

Sensor yang digunakan merupakan salah satu jenis sensor kimia (Korotcenkov, 2011) yang berperan dalam mengawasi proses kimia dan memeriksa perubahan lingkungan baik di lokasi industri maupun non-industri (Korotcenkov, 2007). Sensor kimia merupakan suatu perangkat yang bekerja sesuai dengan prinsip operasi transduser yaitu dengan mengubah energi yang berisi informasi kimia berupa sekumpulan sampel menjadi sinyal listrik analitis (Hulanicki *et al.*, 1991).

Berdasarkan prinsip operasinya, sensor ini merupakan sensor padatan (Korotcenkov, 2011) yang bersifat *reversible*. Dalam pendeteksiannya, reaksi sensor ini dapat mengukur konduktivitas, massa, kapasitansi, karakteristik optik atau energi reaksi yang dilepaskan, hingga perubahan fungsi kerja (Capone *et al.*, 2003). Sensor padatan berbasis fungsi kerja memiliki berbagai keunggulan (Eisele and Burgmair, 2000) diantaranya adalah sistem operasi pendeteksi yang tinggi, konsumsi daya yang rendah, sensitivitas yang luas pada reaksi adsorpsi, serta mampu mendeteksi gas pada permukaan bagian dalam (Lange *et al.*, 2014).

Widanarto *et al.* (2007) telah melakukan penelitian sensor gas menggunakan material  $\text{Ag}_2\text{O}$  untuk mendeteksi aliran gas  $\text{H}_2\text{S}$  yang dialirkan tiap 15 menit saat suhu  $25^\circ\text{C}$ ,  $95^\circ\text{C}$ , hingga  $135^\circ\text{C}$  dengan *work function change* ( $\Delta\Phi$ ) bernilai 0,12 V saat  $95^\circ\text{C}$  dan berdasarkan simulasi Sucipto (2022) didapatkan *trend* grafik yang sama antara simulasi dan eksperimen, akan tetapi terdapat perbedaan pada *Contact Potential Difference* (CPD) sebesar 1,4266% pada suhu  $95^\circ\text{C}$ . Susanto (2020) melaporkan bahwa  $\Delta\Phi$  pada simulasi gas  $\text{NH}_3$  menggunakan material ZnO sebesar 12,7 mV, sedangkan penelitian yang dilakukan oleh Widanarto *et al.* (2011) memiliki  $\Delta\Phi$  sebesar 15,5 mV.

Selain itu, simulasi gas  $\text{SO}_2$  pada permukaan ZnO telah dilakukan oleh Zuandara (2020) dimana nilai  $\Delta\Phi$  adalah -9 mV dan hasilnya dipadankan dengan penelitian Widanarto *et al.* (2011) yang bernilai -35 mV. Simulasi pendeteksian sinyal sensor dengan material ZnO telah dijalankan oleh Kekalenteu (2020) dalam mendeteksi gas  $\text{NO}_2$  dengan *average errors*  $\Delta\Phi$  sebesar 0,447035 V. Fath (2020) melaporkan bahwa  $\Delta\Phi$  pada simulasi sensor gas  $\text{H}_2$  pada material  $\text{Pt}_{80}\text{Au}_{14}\text{Ti}_6$

sebesar -240 mV, namun nilai yang didapat berbeda dengan penelitian yang telah dilakukan Marjunus (2018) yaitu sebesar  $(-297 \pm 9)$  mV. Hal ini terjadi karena hanya melibatkan 3 reaksi dan 12 parameter dengan melibatkan 4 atom/senyawa, sehingga hasil simulasi tidak begitu optimal.

Eksperimen yang dilakukan Widanarto *et al.* (2011) menunjukkan bahwa material ZnO mampu mendeteksi gas H<sub>2</sub>S pada suhu 165°C dengan nilai  $\Delta\Phi$  sebesar -25 mV. Akan tetapi, berdasarkan studi literatur yang dilakukan, belum adanya simulasi pendeteksian gas H<sub>2</sub>S pada permukaan ZnO karena perubahan sinyal yang ditampilkan pada penelitian Widanarto *et al.* (2011) cukup lemah dan minimnya laporan penginderaan gas H<sub>2</sub>S pada material ZnO (Casarin *et al.*, 1997).

Sehingga, metode yang efisien dalam mendeteksi gas H<sub>2</sub>S pada permukaan ZnO adalah dengan melakukan simulasi mekanisme reaksi (Marjunus, 2018). Penelitian ini dimulai dengan studi literatur mengenai reaksi antara permukaan material ZnO, gas H<sub>2</sub>S, dan gas O<sub>2</sub>. Kemudian, mencari nilai-nilai parameter berupa koefisien Arrhenius, koefisien lengket hingga energi aktivasi pada *reverse* dan *forward reactions*, serta untuk mengetahui bahwa data yang didapat adalah independen maka dilakukan optimasi nilai parameter sebanyak 2 kali dengan melakukan simulasi sinyal yang akan dibandingkan dengan data hasil eksperimen Widanarto *et al.* (2011). Melalui simulasi ini, akan diperoleh informasi mengenai *coverage* dari setiap gas yang terlibat.



## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana simulasi pendeteksian sensor gas  $H_2S$  menggunakan ZnO berbasis fungsi kerja?
2. Bagaimana mendapatkan nilai-nilai parameter dari setiap reaksi yang terlibat?
3. Bagaimana hasil simulasi jika dibandingkan dengan eksperimen?
4. Bagaimana *coverage* untuk setiap gas yang terlibat?

## 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Menggunakan 3 reaksi antara gas  $H_2S$  dengan permukaan material, gas  $O_2$  yang mengenai permukaan material, dan  $H_2S$  dengan O di permukaan material.
2. Menggunakan 12 parameter, yaitu 2 koefisien lengket, 4 koefisien Arrhenius, dan 6 energi aktivasi untuk mengukur fungsi kerja.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Membuat simulasi sinyal untuk mendeteksi gas  $H_2S$  pada permukaan ZnO berbasis fungsi kerja.
2. Melakukan optimasi parameter untuk mendapatkan nilai-nilai parameter dari setiap reaksi yang terlibat.
3. Membandingkan hasil simulasi sensor gas  $H_2S$  pada material ZnO dengan hasil eksperimen.
4. Menghitung rata-rata seluruh nilai *coverage* dari setiap gas yang terlibat.

### **1.5 Manfaat Penelitian**

Manfaat pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Memahami proses pendeteksian gas H<sub>2</sub>S melalui metode simulasi.
2. Berperan serta dalam ilmu pengetahuan mengenai teori pendeteksian sensor gas H<sub>2</sub>S menggunakan ZnO berdasarkan fungsi kerja.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Gas H<sub>2</sub>S pada Material ZnO

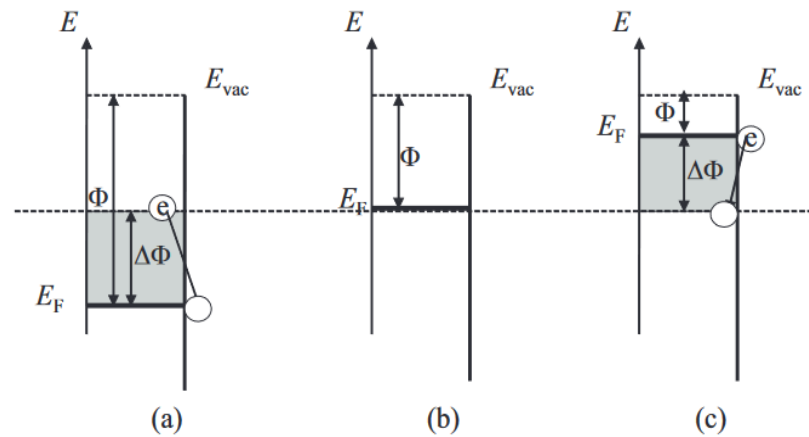
#### 2.1.1 Fungsi Kerja Material

Setiap zat padat tersusun dari atom yang mengandung elektron baik yang bergerak bebas atau terikat erat dalam ikatan atom. Elektron bebas dapat lepas dari permukaan zat padat, seperti pada logam atau semikonduktor. Peristiwa ini terjadi disebabkan adanya suatu energi yang menimbulkan elektron bergerak bebas dari tempat satu ke tempat yang lain. Energi yang dimaksud adalah fungsi kerja/*work function* yang dilambangkan dengan  $\Phi$  (eV). Pada bahan isolator dan semikonduktor, *work function* dapat dikatakan suatu perbedaan energi pada elektron yang bergerak bebas dalam zat padat dengan elektron yang terikat pada ruang vakum di luar zat padat (Bare and Somorjai, 1986).

*Work Function* dapat diartikan sebagai suatu perbedaan antara tingkat energi vakum dengan energi Fermi. Nilai dari *work function* ini dapat dihitung dengan menggunakan formula berikut.

$$\Phi = E_F - E_{VAC} \quad (2.1)$$

dengan  $E_{VAC}$  adalah energi vakum dan  $E_F$  (eV) adalah energi Fermi. Tingkat energi Fermi bisa mengalami perubahan jika molekul gas menumbuk sebuah material. Persamaan (2.1) mengindikasikan bahwa perubahan nilai pada  $E_F$  akan menghasilkan perubahan pada *work function* (Senft *et al.*, 2011).



**Gambar 2.1.** Diagram adsorpsi dan *work function change* (a) terpapar gas pengoksidasi, (b) tidak terpapar gas, dan (c) terpapar gas pereduksi (Senft *et al.*, 2011).

Gambar 2.1 (a) menunjukkan bahwa ketika sebuah material dipaparkan gas pengoksidasi maka akan terjadi penurunan tingkat energi Fermi dan meningkatnya *work function*. Sebaliknya, ketika suatu material terpapar gas pereduksi seperti pada Gambar 2.1 (c) maka akan terjadi peningkatan pada energi Fermi, sehingga nilai *work function* akan menurun. Besarnya *work function change* diformulasikan sebagai berikut.

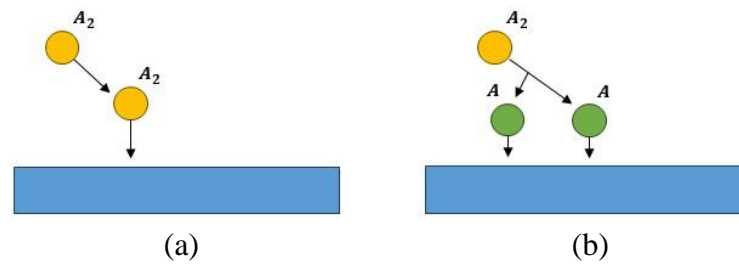
$$\Delta\Phi = E_F^{\text{awal}} - E_{VAC}^{\text{akhir}} \quad (2.2)$$

dengan  $\Delta\Phi$  adalah *work function change*,  $E_{VAC}^{\text{akhir}}$  menggambarkan energi akhir berupa energi vakum dan  $E_F^{\text{awal}}$  menggambarkan energi awal berupa energi Fermi (Senft *et al.*, 2011).

### 2.1.2 Adsorpsi

Adsorpsi merupakan suatu fenomena ketika molekul gas diendapkan pada permukaan suatu material, seperti saat sebuah larutan bersentuhan langsung pada permukaan logam baik secara fisis atau kimia (Senft *et al.*, 2011). Molekul gas yang tertarik ke permukaan logam adalah adsorbat, sedangkan permukaan

logam sendiri disebut adsorben (McCash, 2001).



**Gambar 2.2.** Proses (a) adsorpsi fisis dan (b) adsorpsi kimia (Senft *et al.*, 2011).

Gambar 2.2 (a) merupakan proses adsorpsi fisis yang terjadi apabila molekul gas yang terpapar tidak bereaksi antara satu sama lain, sehingga molekul gas akan tetap sama seperti saat masuk. Energi pengikat pada adsorpsi fisis ( $\Delta E_p$ ) akan mengikat molekul yang teradsorpsi ke materi yang umumnya terjadi pada suhu rendah. Roberts and McKee (1978) menerangkan bahwa nilai  $\Delta E_p$  adsorpsi fisis berkisar 0,0021 eV sampai 0,301 eV.

Gambar 2.2 (b) menunjukkan proses adsorpsi kimia yang terjadi pada suhu tinggi. Energi pengikat pada adsorpsi kimia, dilambangkan dengan  $\Delta E_c$  yang umumnya memiliki nilai lebih besar daripada energi pengikat pada adsorpsi fisis. Oudar (1973) mengungkapkan bahwa pada adsorpsi fisis, kekuatan ikatan antara molekul yang teradsorpsi pada permukaan begitu lemah, sedangkan pada adsorpsi kimia ikatan pada molekulnya berperan sangat penting dan merupakan hasil transfer reaksi antara adsorben dengan adsorbat. Ketika gas menyentuh permukaan bahan, ikatan kimia akan terbentuk dengan memisahkan molekul di dalamnya. Misalnya, ketika molekul  $A_2$  menumbuk suatu material, molekul tersebut akan berpisah menjadi dua buah molekul  $A$ . Fenomena yang terjadi tentunya membutuhkan

energi yang dikenal sebagai energi disosiasi ( $E_{\text{diss}}$ ) dengan nilai lebih besar dari 0,311 eV (Gottfried, 2003).

Besarnya nilai *surface area* pada material yang terpapar oleh molekul gas disebut *coverage*. Utilitas ini dilambangkan dengan  $\theta$  dengan satuan Mono Layer (ML). Sebelum menghitung laju perubahan dari *coverage*, laju adsorpsi perlu dihitung terlebih dahulu menggunakan Persamaan (2.3) (Nix, 2014).

$$r_a = \frac{dN_{\text{ads}}}{dt} \quad (2.3)$$

dengan  $N_{\text{ads}}$  adalah jumlah atom/molekul yang teradsorpsi pada *surface area* yang dirumuskan seperti Persamaan (2.4).

$$N_{\text{ads}} = \sigma\theta \quad (2.4)$$

dengan  $\sigma$  menggambarkan kerapatan atom dalam satuan atom/m<sup>2</sup>. Selain laju adsorpsi bergantung pada jumlah atom/molekul teradsorpsi di permukaan,  $r_a$  akan bergantung pula pada aliran molekul yang mencapai permukaan. Nilai ini ( $F$ , m<sup>2</sup>/s) dikenal sebagai hukum Hertz-Knudsen (Yan and Xu, 2010). Besarnya fluks molekul dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$F = \frac{P}{\sqrt{2\pi mkT}} \quad (2.5)$$

dengan  $P$  (Pa) menunjukkan tekanan parsial molekul gas,  $m$  (kg) merupakan massa dari molekul/atom,  $k$  merupakan konstanta Boltzmann yang memiliki nilai  $1,38 \times 10^{-23}$  JK<sup>-1</sup> dan  $T$  (K) merupakan suhu.

Adsorpsi dapat bersifat disosiatif atau molekuler, ketika adsorpsi bersifat asosiatif molekul yang teradsorpsi pecah menjadi molekul yang lebih kecil dan adsorpsi molekuler terjadi saat molekul yang diserap tidak terdisosiasi (Laksono,

2001). Selain itu, permukaan material dapat mengindikasikan adanya koefisien lengket ( $S$ ) dengan formula sebagai berikut.

$$S = S_0(1-\theta)^z \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.6)$$

dengan  $S_0$  adalah *initial sticking coefficient* sebelum terpapar gas dan  $z$  merupakan konstanta yang bernilai 1 apabila gas tidak terdisosiasi dan bernilai 2 apabila gas terdisosiasi. Okupansi permukaan/laju perubahan *coverage* selama proses adsorpsi diperoleh dengan menggabungkan Persamaan (2.3) dan (2.6) yang menghasilkan Persamaan (2.7).

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{S_0(1-\theta)^z P}{\sigma\sqrt{2\pi mkT}} \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.7)$$

### 2.1.3 Interaksi

Saat material teradsorpsi hingga dua bahkan lebih molekul, maka menimbulkan reaksi antara molekul dengan *surface area*. Seperti, molekul A yang bertemu molekul B di permukaan, mereka akan membentuk molekul AB. Proses ini dikenal sebagai proses Langmuir-Hinshelwood yang menerangkan bahwa perubahan *coverage* AB dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.8).

$$\frac{d\theta_{AB}}{dt} = \nu_r \exp\left(-\frac{E_r}{kT}\right) \theta_A \theta_B \quad (2.8)$$

dengan  $\nu_r$  mengindikasikan banyaknya reaksi antar molekul per detik atau dikenal sebagai koefisien Arrhenius.  $E_r$  merupakan *activation energy* untuk terjadinya reaksi antar molekul serta  $\theta_A$  dan  $\theta_B$  adalah perpindahan nilai gas A dan gas B (*dimensionless*) (Somorjai and Li, 2010).

### 2.1.4 Disosiasi

Disosiasi merupakan suatu proses yang terjadi ketika molekul terpecah menjadi beberapa bagian yang lebih kecil. Misalnya, ketika gas AB mengalami disosiasi, maka gas tersebut akan terpisah menjadi gas A dan B. Nilai perubahan laju perpindahan disosiasi dituliskan pada Persamaan (2.9) (Senft, 2009).

$$\frac{d\theta_{AB}}{dt} = \nu_{\text{diss}} \exp\left(-\frac{E_{\text{diss}}}{kT}\right) \theta_{AB} \quad (2.9)$$

dengan  $\nu_{\text{diss}}$  mewakili jumlah disosiasi gas AB dalam satu detik dan  $E_{\text{diss}}$  merupakan energi minimum yang diperlukan untuk terjadinya disosiasi serta  $\theta_{AB}$  adalah laju *coverage* molekul gas AB (*dimensionless*).

### 2.1.5 Desorpsi

Proses yang berlawanan dengan proses adsorpsi disebut desorpsi. Desorpsi didefinisikan sebagai pelepasan suatu atom dari permukaan suatu bahan. Pelepasan ini harus disertai dengan penyerapan energi yang disebut energi desorpsi ( $E_d$ ). Nilai perubahan *coverage* atom pada permukaan dapat dihitung menggunakan Persamaan (2:10) (Senft, 2009).

$$\frac{d\theta}{dt} = \nu_d \exp\left(-\frac{E_d}{kT}\right) \theta \quad (2.10)$$

dengan  $\nu_d$  mewakili jumlah desorpsi/s.

## 2.2 Reaksi Pendeteksian Gas H<sub>2</sub>S

Berdasarkan tinjauan literatur, diperoleh beberapa reaksi pada sensor H<sub>2</sub>S. Reaksi antara H<sub>2</sub>S dan permukaan material ditunjukkan pada Persamaan (2.11).





dengan tanda bintang mewakili permukaan bahan (Bashiri and Mohamadi, 2016).

Dalam penelitian ini reaksi yang diajukan tertulis pada persamaan berikut.



dengan (S) menginterpretasikan molekul yang duduk di permukaan bahan.

Ketika ZnO terpapar udara, molekul oksigen diserap di permukaan bahan dengan membentuk anion oksigen yang menangkap elektron dalam pita konduksi, seperti pada Persamaan (2.13) di bawah ini (Tepore *et al.*, 1998).

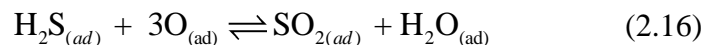
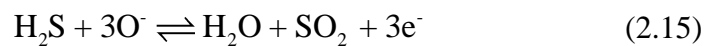


Callaghan (2006) melaporkan, apabila gas oksigen dipaparkan pada permukaan material akan mengalami reaksi seperti yang tercantum pada Persamaan (2.14).



pada Persamaan (2.11) hingga (2.14), lambang (g) menunjukkan fase gas dan lambang (S) adalah permukaan material.

Persamaan (2.12) dan (2.14) memperlihatkan proses penyerapan  $\text{O}_2$  dan  $\text{H}_2\text{S}$  pada permukaan sensor ZnO. Setelah oksigen diserap maka terjadi interaksi antara keduanya pada permukaan bahan, sehingga diperoleh persamaan reaksi sebagai berikut (Liu *et al.*, 2009).



Berbagai parameter reaksi kimia terlibat di dalamnya, termasuk koefisien lengket, koefisien Arrhenius, serta energi aktivasi.  $E$  adalah energi aktivasi yang dibutuhkan dalam menyelesaikan suatu reaksi, umumnya melibatkan energi

panas. Koefisien Arrhenius ( $\nu$ ) menunjukkan pengaruh perubahan suhu dalam kecepatan reaksi dan *initial sticking coefficient* ( $S_0$ ) menunjukkan perbandingan partikel terikat terhadap partikel yang mengenai permukaan bahan (Ranke, 2008). Parameter yang diperlukan tertera dalam Tabel 2.1.

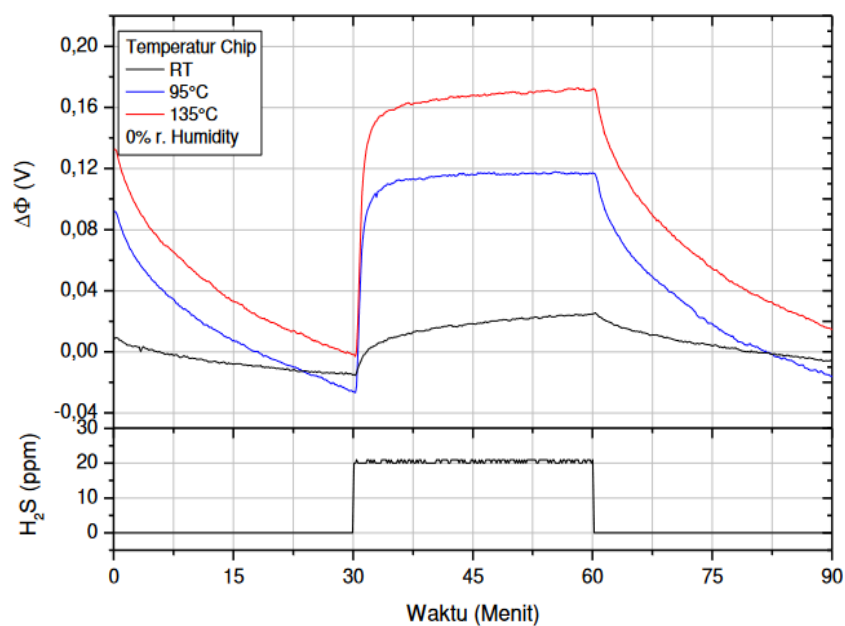
**Tabel 2.1.** Parameter reaksi pendeteksian gas H<sub>2</sub>S.

Reaksi	Koefisien (s <sup>-1</sup> )		Energi Aktivasi (eV)	
	<i>Forward</i>	<i>Reverse</i>	<i>Forward</i>	<i>Reverse</i>
(2.12)	$S_{0-H_2S} = 0,2$	$\nu_{r1} = -$	$E_{r1} = 0,105$	$E_{r1} = 0,722$
(2.14)	$S_{0-O} = 0,07$ (300/T)	$\nu_{r2} = 8,0515 \times 10^{12}$	$E_{r2} = 0,53$	$E_{r2} = 2,2096 -$ 0,622( $\theta_0$ )
(2.16)	$\nu_{r3} = -$	$\nu_{r3} = -$	$E_{r3} = -$	$E_{r3} = -$

Parameter yang ditunjukkan oleh Tabel 2.1 berasal dari tinjauan literatur penulis. Kuhr and Ranke (1987) melakukan eksperimen pada kristal Ge yang berbentuk silinder untuk mengetahui besarnya nilai adsorpsi pada gas H<sub>2</sub>S dan molekul H<sub>2</sub>O, dan didapat besarnya nilai  $S_0$  untuk gas H<sub>2</sub>S pada permukaan kristal Ge adalah 0,2. Pada Persamaan (2.12), nilai parameter  $E_{r1}$  sebesar 0,105 eV berasal dari studi Moradi *et al.* (2020) yang menyimulasikan adsorpsi gas H<sub>2</sub>S pada permukaan karbon aktif dengan menempatkan molekul klorida dalam pori-pori grafit. Selain itu, Bashiri dan Mohamadi (2016) menemukan parameter  $E_{r1}$  untuk Persamaan (2.14) sebesar 69,47 kJ/mol atau 0,722 eV dengan mekanisme dekomposisi H<sub>2</sub>S pada permukaan Ni yang diselidiki dengan simulasi kinetik Monte Carlo. Nilai parameter  $E_{r2}$  bernilai 0,53 eV,  $E_{r2}$  bernilai 2,2096-0,622  $\nu(\theta_0)$ ,  $\nu_{r2}$  bernilai  $8,05 \times 10^{12}$ , serta  $S_{0-O}$  bernilai 0,07(300/T) untuk gas O<sub>2</sub> pada permukaan material Pt yang diperoleh melalui persamaan Navier-Stokes (Behrendt, 1999).

### 2.3 Pendeteksian Gas H<sub>2</sub>S Berbasiskan Fungsi Kerja

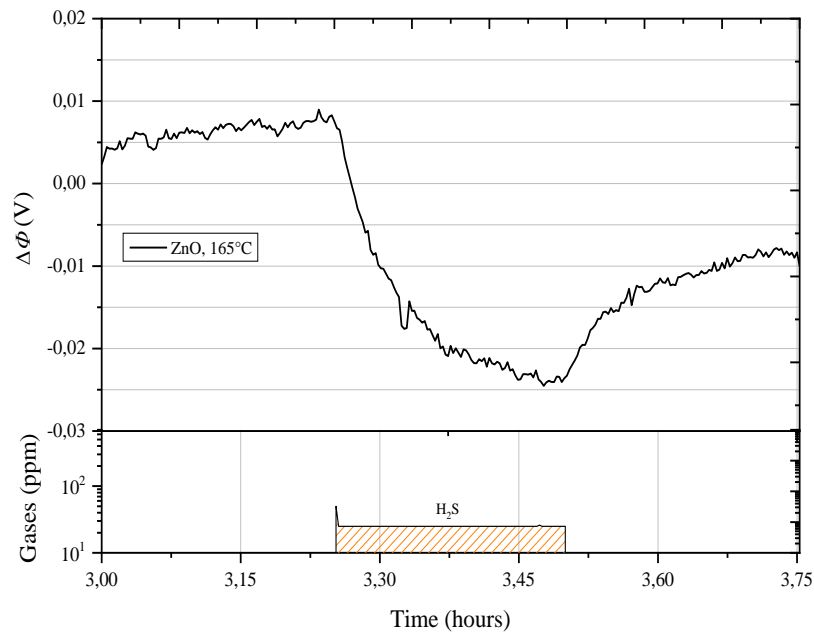
Widanarto (2007) berhasil menumbuhkan film Ag<sub>2</sub>O pada elektroda Si/Ti/Pt menggunakan metode *thermal evaporation* kemudian dilakukan pengujian suhu pada 25°C, 95°C, dan 135°C. Dari hasil tersebut, perubahan suhu sangat berpengaruh terhadap sensitivitas sensor. Suhu operasi optimal dicapai pada 95°C dengan  $\Delta\Phi$  selama 60 menit sekitar 0,12 V.



**Gambar 2.3.** Suhu sensor Ag<sub>2</sub>O dalam mendeteksi 20 ppm gas H<sub>2</sub>S (Widanarto *et al.*, 2007).

Selain itu, Widanarto *et al.* (2011) berhasil menciptakan sensor NO<sub>2</sub> dengan FG-FET (*Floating Gate Field Effect Transistor*) berbahan ZnO dengan temperatur dan kelembapan yang berbeda. Sensor ini dapat menunjukkan selektivitas dan sensitivitas tinggi pada kisaran antara suhu kamar hingga suhu 165°C yang ditandai dengan paparan gas H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O. Selain berhasil menunjukkan sinyal gas NO<sub>2</sub>, material ZnO dapat menunjukkan sinyal gas H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>, dan SO<sub>2</sub> meski perubahan sinyal yang ditampilkan lemah.

Pada deteksi gas H<sub>2</sub>S diperlukan waktu 45 menit dalam menerima sinyal fungsi kerja yang dimulai dengan memaparkannya ke atmosfer hingga memberikan gas H<sub>2</sub>S ke dalamnya dan diakhiri dengan menghentikan gas H<sub>2</sub>S setiap 15 menit. Dengan demikian, nilai  $\Delta\Phi$  diperoleh sebesar -25 mV.



**Gambar 2.4.** Selektivitas sensor pada suhu 165°C dalam kondisi kering (Widanarto *et al.*, 2011).

Karena belum dilakukannya simulasi sinyal sensor gas H<sub>2</sub>S pada material ZnO dalam eksperimen Widanarto *et al.* (2011), maka penulis mengusulkan untuk mensimulasi pendeteksian sinyal sensor gas H<sub>2</sub>S menggunakan ZnO berbasiskan fungsi kerja menimbang deteksi H<sub>2</sub>S sangat penting dilakukan karena H<sub>2</sub>S lebih berbahaya dari *hydrogen cyanide* (HCN) (Cotton and Wilkinson, 1989) sekaligus berkontribusi dalam teori pendeteksian gas karena minimnya laporan penginderaan gas H<sub>2</sub>S pada material ZnO (Casarin *et al.*, 1997).

### III. METODE PENELITIAN

#### 3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan September hingga November 2023 di Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.

#### 3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu komputer yang sudah terinstal *software* Origin dan MATLAB yang nantinya digunakan untuk melakukan plotting grafik serta simulasi sinyal sensor.

#### 3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang akan dilakukan adalah sebagai berikut.

##### 3.3.1 Persamaan Diferensial Biasa (PDB) Orde Satu

Reaksi pada Persamaan (2.12), (2.14), dan (2.16) dibentuk menjadi persamaan diferensial orde satu untuk memperoleh nilai dari *coverage* gas. Merujuk pada penelitian Kekalenteu (2020) bahwasannya *work function change* pada permukaan material ZnO akan diformulasikan berbanding lurus dengan *coverage* setiap molekul gas.

$$\Phi(\theta_{H_2S}) = \theta_{H_2S} \quad (3.1)$$

$$\Phi(\theta_o) = \theta_o \quad (3.2)$$

$$\Phi(\theta_{SO_2}) = \theta_{SO_2} \quad (3.3)$$

$$\Phi(\theta_{H_2O}) = \theta_{H_2O} \quad (3.4)$$

### 3.3.2 Graphic Fitting

Berdasarkan eksperimen Susanto (2020), Zuandara (2020), dan Kekalenteu (2020) dilakukan pendekatan grafik pada penelitian Widanarto *et al.* (2011) dengan melakukan fitting grafik untuk mendapatkan persamaan garis, sehingga memudahkan perhitungan nilai *error*. Adapun tahapan yang dilakukan sebagai berikut.

1. Menginput data eksperimen Widanarto *et al.* (2011) ke *software* Origin.
2. Mendapatkan grafik eksperimen Widanarto *et al.* (2011).
3. Melakukan *graphic plotting* eksperimen Widanarto *et al.* (2011).
4. Melakukan *fitting* persamaan garis pada *software* Origin.
5. Mendapatkan grafik hasil *fitting* dan persamaan garis.

### 3.3.3 Optimasi Parameter

Tabel 2.1 merupakan nilai parameter yang berasal dari tinjauan literatur penulis. Lima parameter yang tercantum dalam tabel tersebut belum diketahui nilainya, sehingga diperlukannya pencarian nilai parameter untuk digunakan pada simulasi akhir. Proses ini dilakukan dengan tujuan agar memperoleh nilai *error* terkecil saat disandingkan dengan grafik hasil eksperimen Widanarto *et al.* (2011). Adapun tahapan pada proses ini sebagai berikut.

1. Membuat program PDB orde 1 terkopel dengan *software* MATLAB.
2. Memasukkan *fitting* persamaan garis Widanarto *et al.* (2011) untuk mendapat *average errors* terkecil.

3. Menggunakan variasi waktu selama 45 menit dengan suhu 165°C.
4. Nilai  $\Phi$  pada material ZnO diusulkan berbanding lurus dengan nilai  $\theta_{\text{H}_2\text{S}}$ ,  $\theta_{\text{O}}$ ,  $\theta_{\text{SO}_2}$ , dan  $\theta_{\text{H}_2\text{O}}$ .
5. Merujuk penelitian Sucipto (2022) akan ditentukan parameter tebakan dari nilai parameter yang belum diketahui yang tertera dalam Tabel 3.1.

**Tabel 3.1.** Parameter tebakan pada optimasi parameter.

Reaksi	Koefisien ( $\text{s}^{-1}$ )		Energi Aktivasi (eV)	
	<i>Forward</i>	<i>Reverse</i>	<i>Forward</i>	<i>Reverse</i>
(2.12)	$S_{\text{O-H}_2\text{S}} = 2,772$	$\nu_{\text{r1}} = 8,29 \times 10^{12}$	$E_{\text{f1}} = 0,074$	$E_{\text{r1}} = 0,72$
(2.14)	$S_{\text{O-O}} = 0,064$	$\nu_{\text{r2}} = 1,6 \times 10^{12}$	$E_{\text{f2}} = 0,056$	$E_{\text{r2}} = 0,1264$
(2.16)	$\nu_{\text{f3}} = 9,2 \times 10^{12}$	$\nu_{\text{r3}} = 6,804 \times 10^{12}$	$E_{\text{f3}} = 0,226$	$E_{\text{r3}} = 0,028$

6. Membandingkan grafik optimasi dengan grafik Widanarto *et al.* (2011) yang mana dalam hal ini *average errors* terkecil akan dijadikan nilai parameter terbaik.
7. Melakukan uji optimasi untuk seluruh parameter pada Tabel 3.1.

### 3.3.4 Optimasi Ulang Parameter

Hasil yang diperoleh dapat mengalami pergeseran, sehingga perlunya optimasi ulang pada parameter. Optimasi yang dilakukan sama seperti optimasi pertama, tetapi grafik yang menjadi pembanding adalah grafik optimasi pertama. Jika terjadi pergeseran nilai parameter, maka *final value* adalah *average* dari nilai optimasi keduanya.

### 3.3.5 Simulasi Akhir

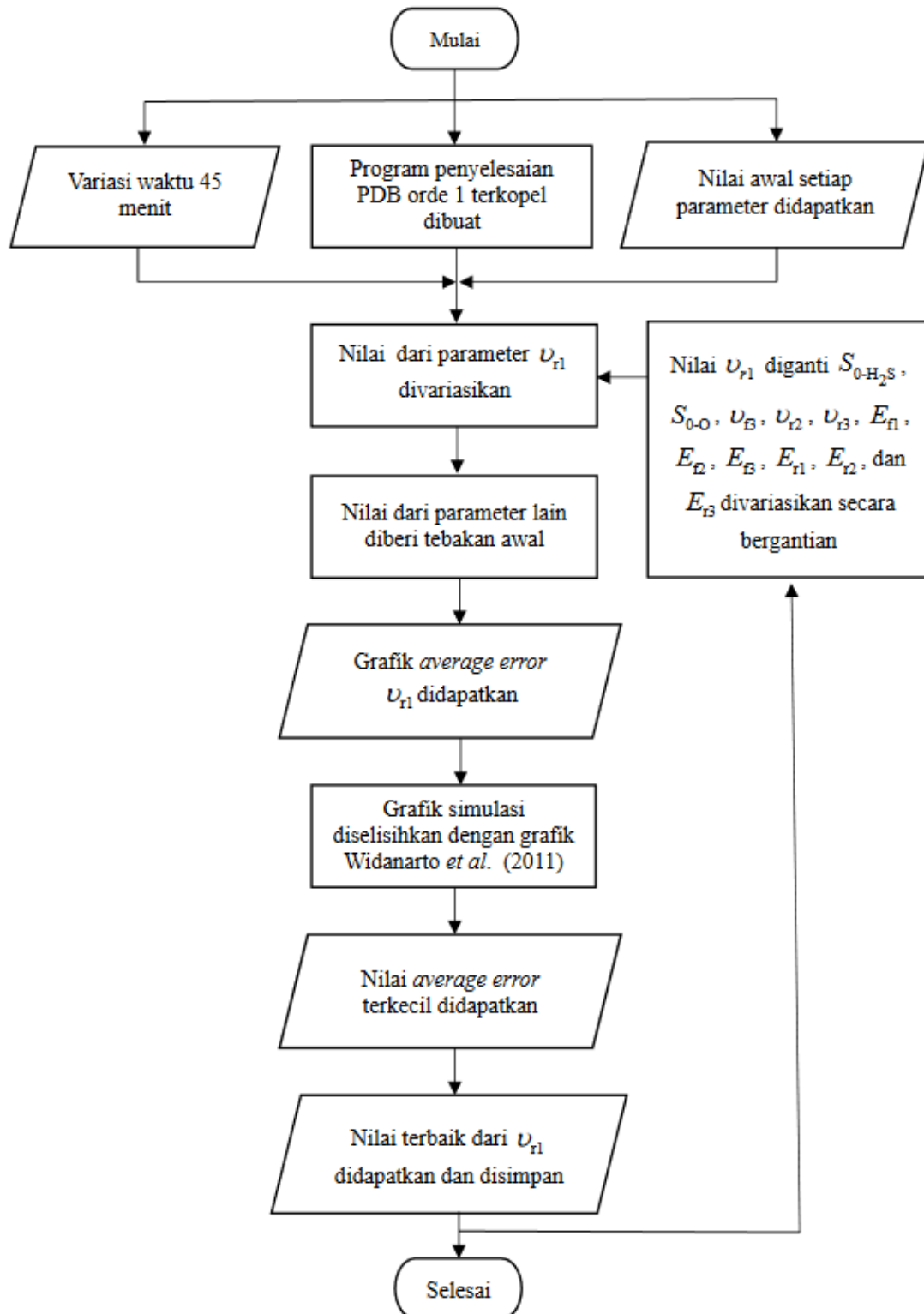
Tahap terakhir dalam penelitian ini adalah melakukan simulasi akhir untuk mendapatkan nilai  $\Delta\Phi$ . Adapun tahapan pada proses ini sebagai berikut.

1. Memasukkan PDB orde 1 ke dalam program.
2. Menggunakan variasi waktu selama 45 menit dengan suhu 165°C.
8. Nilai  $\Phi$  pada material ZnO diusulkan berbanding lurus dengan nilai  $\theta_{\text{H}_2\text{S}}$ ,  $\theta_{\text{O}}$ ,  $\theta_{\text{SO}_2}$ , dan  $\theta_{\text{H}_2\text{O}}$ .
3. Menjalankan program untuk semua parameter yang telah didapat ke dalam PDB orde satu.
4. Mendapatkan nilai  $\theta$  dan  $\Delta\Phi$  pada permukaan material ZnO secara simulasi.
5. Membuat grafik  $\Delta\Phi$  terhadap waktu dengan *software* MATLAB.
6. Membandingkan hasil simulasi akhir dengan hasil eksperimen Widanarto *et al.* (2011).

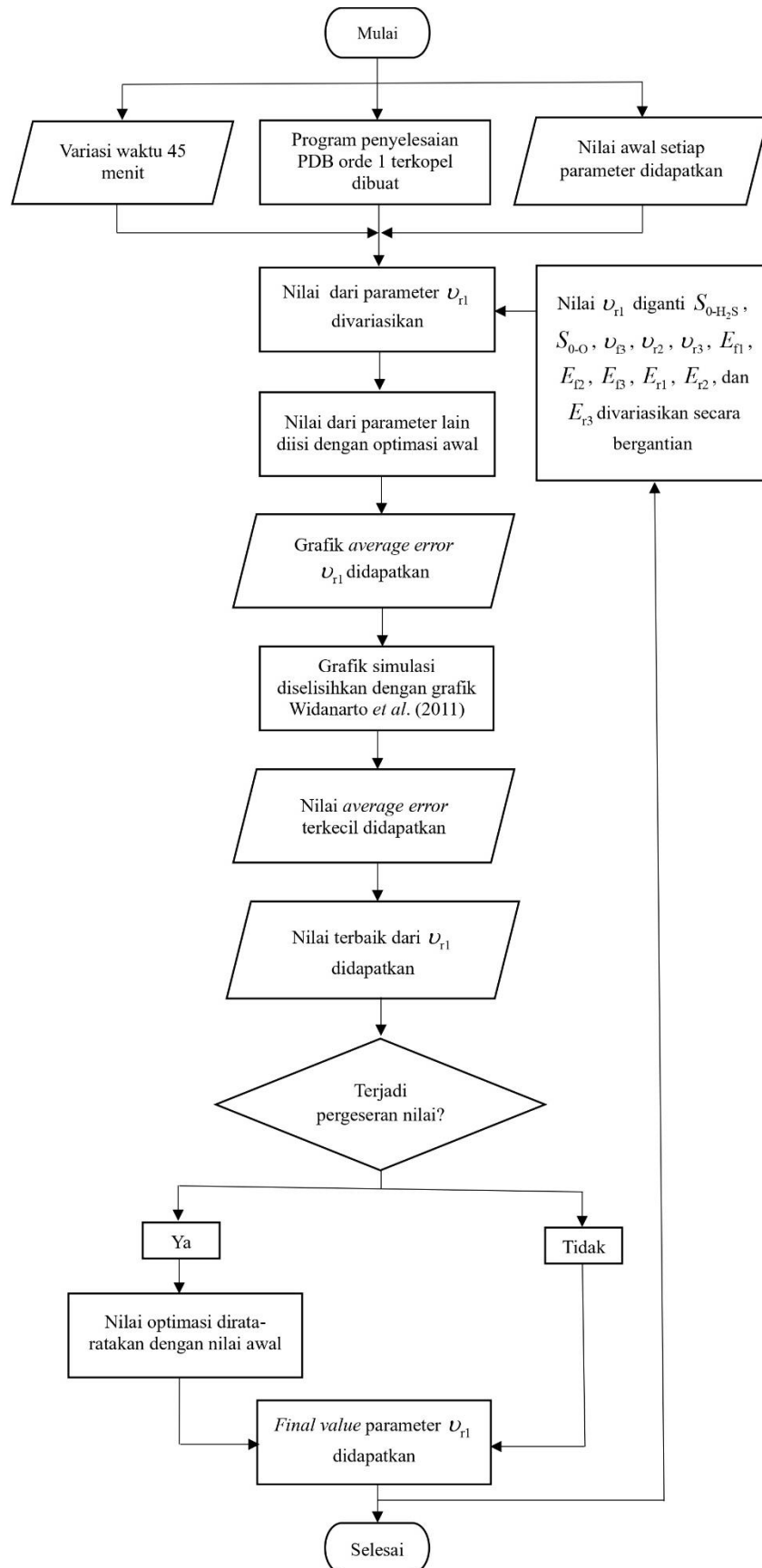
### 3.4 Diagram Alir

Diagram alir pada penelitian tercantum pada Gambar 3.1 hingga 3.3 berikut.

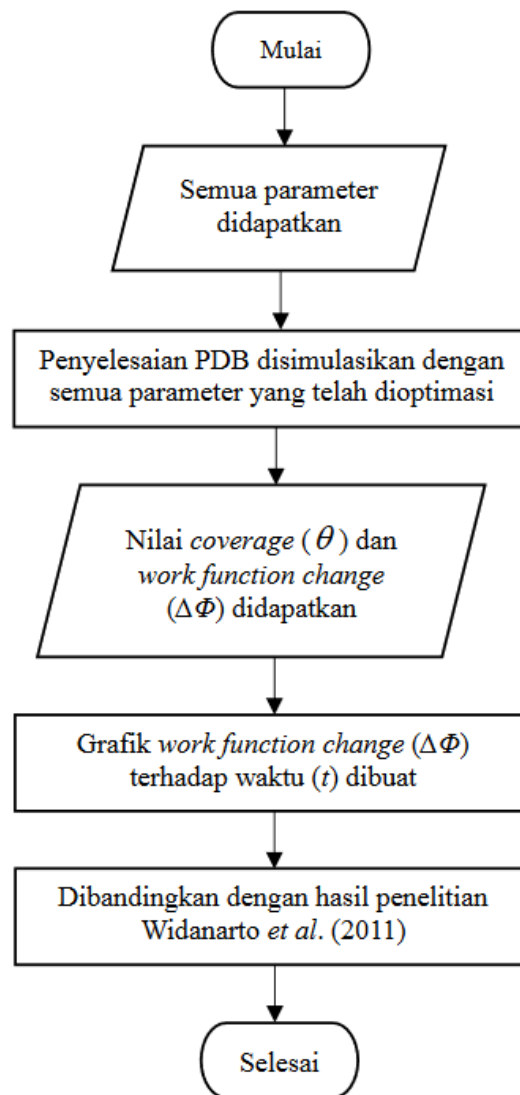




**Gambar 3.1** Diagram alir optimasi parameter.



**Gambar 3.2** Diagram alir optimasi ulang parameter.



**Gambar 3.3** Diagram alir simulasi akhir penelitian.

## V. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Penelitian ini berhasil membuat simulasi untuk pendeteksian sinyal gas H<sub>2</sub>S pada permukaan ZnO berbasis fungsi kerja dengan menggunakan Persamaan Diferensial Biasa yang ditunjukkan pada Persamaan (4.1) hingga (4.4) dan listing program terlampir.
2. Penelitian ini berhasil memperoleh 12 parameter baru yang belum didapatkan dari studi literatur, yaitu  $E_{f1}$  (0,0905 eV),  $E_{r1}$  (0,715 eV),  $E_{f2}$  (0,015 eV),  $E_{r2}$  (0,158 eV),  $E_{f3}$  (0,368 eV),  $E_{r3}$  (0,064 eV),  $\nu_{r1}$  ( $9,5 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ ),  $\nu_{r2}$  ( $1,425 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ ),  $\nu_{r3}$  ( $2,05 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ ),  $\nu_{f3}$  ( $3,25 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ ),  $S_{0-H_2S}$  (2,18), dan  $S_{0-O}$  (0,423).
3. Simulasi ini menghasilkan *trend* grafik yang sama dengan hasil eksperimen, yaitu *work function change* ( $\Delta\Phi$ ) pada simulasi sebesar -24 mV, sedangkan pada eksperimen Widanarto *et al.* sebesar -25 mV dengan *average error* sebesar 0,0095 V.
4. Penelitian ini juga berhasil memperkirakan nilai *coverage* ( $\theta$ ) atom/molekul gas yang terdapat pada permukaan ZnO dengan nilai *coverage* molekul H<sub>2</sub>S

sebesar  $1,4 \times 10^{-2}$  ML, *coverage* atom O sebesar 0,024 ML, *coverage* molekul SO<sub>2</sub> sebesar  $10^{-5}$  ML, dan *coverage* molekul H<sub>2</sub>O sebesar  $10^{-5}$  ML.

## 5.2 Saran

Terkait penelitian berikutnya untuk dapat menambah reaksi dari atom dan molekul gas yang berinteraksi pada permukaan material, seperti pengaruh uap air (H<sub>2</sub>O) karena penambahan jumlah reaksi akan berpengaruh terhadap hasil simulasi. Maka, diperlukan reaksi dengan jumlah yang sama atau mendekati jumlah reaksi pada eksperimen. Selain itu, perlunya penelitian lebih lanjut mengenai nilai *coverage* dari atom atau gas pada suatu permukaan material sensor.

## DAFTAR PUSTAKA

- Bare, S.R. and Somorjai, G.A. 1988. *Photocatalysis and Environment Trends and Applications*. NATO Science Series. Brussel. Pp. 63-189.
- Barsan, N. and Weimar, U.J. 2001. Conduction Model of Metal Oxide Gas Sensors. *Electroceramics*. 7(3): 143-167.
- Bashiri, H. and Mohamadi, S. 2016. Hydrogen Sulfide Decomposition on Ni Surface: A Kinetic Monte Carlo Study. *Applied Catalysis A: General*. 509(1): 105-110.
- Behrendt, F. 1999. Experimentelle und Numerische Beschreibung Katalytischer Zund und Verbrennungsprozesse. *Habilitationsschrift*. Fakultät für Energietechnik der Universität Stuttgart.
- Callaghan, C.A. 2006. Kinetic and Catalysis of Water-Gas-Shift Reaction: A Microkinetic and Graph Theoretic Approach. *Dissertation*. Worcester Polytechnic Institute. Worcester.
- Capone, S., Forleo, A., Francioso, L., Rella, R., Siciliano, P., Spadavecchia, J., Presicce D.S. and A.M. Taurino. 2003. Solid State Gas Sensors: State of The Art and Future Activities. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. 5(5): 1335-1348.
- Casarin, M., Maccato, C. and Vittadini, A. 1997. An LCAO-LDF Study of The Chemisorption of H<sub>2</sub>O and H<sub>2</sub>S on ZnO (0001) and ZnO (1010). *Surface Science*. 377(379): 587-591.
- Cheah, S., Carpenter, D.L. and Magrini-Bai, K.A. 2009. Review of Mid to High-Temperature Sulfur Sorbents for Desulfurization of Biomass and Coal-Derived Syngas. *Energy and Fuels*. 23(1): 5291-5307.
- Chou, C.H. and Selene, J. 2003. *Hydrogen Sulfide: Human Health Aspects*. World Health Organization and International Programme on Chemical Safety. Geneva.
- Cook, G.A. and Lauer, C.M. 1968. *The Encyclopedia of the Chemical Elements*. Reinhold Book Corporation. New York. Pp. 499.
- Cotton and Wilkinson. 1989. *Kimia Anorganik Dasar*. Erlangga. Jakarta.

- Derry, G.N. and Ross, P.N. 1985. A Work Function Change Study of Oxygen Adsorption on Pt (111) and Pt (100). *Journal of Chemical Physics*. 82(6): 2772-2778.
- Dorman, D.C., Brenneman, K.A., Struve, M.F., Miller, K.L., James, R.A., Marshall, W.M. and Foster, P.M.D. 2000. Fertility and Developmental Neurotoxicity Effects of Inhaled Hydrogen Sulfide in Sprague-Dawley Rats. *Neurotoxicology and Teratology*. 22(1): 71-84.
- Eisele, I. and Burgmair, M. 2000 Work Function Based Field Effect Devices for Gas Sensing. *Proceedings*. Conference on Optoelectronic and Microelectronic Materials and Devices. Pp. 285-291.
- Emsley, John. 2001. *Nature's Building Blocks: An A-Z Guide to the Elements*. Oxford University Press. England. Pp. 297-304.
- Fath, Y.A. 2020. Simulasi Sinyal Sensor Gas H<sub>2</sub> Berbasis Perubahan Fungsi Kerja ( $\Delta\Phi$ ) pada Permukaan Bahan Pt<sub>80</sub>Au<sub>14</sub>Ti<sub>6</sub>. *Research Paper*. Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Galstyan, V., Bhandari, M., Sberveglieri, V., Sberveglieri, G. and Comini, E. 2018. Metal Oxide Nanostructures in Food Applications: Quality Control and Packaging. *Chemosensors*. 6(2): 12-16.
- Galstyan, V., Poli, N. and Comini, E. 2019. Highly Sensitive and Selective H<sub>2</sub>S Chemical Sensor Based on ZnO Nanomaterial. *Applied Science*. 9(6): 1-10.
- Gibson III, J.B. and Harrison. D.P. 1980. The Reaction between Hydrogen Sulfide and Spherical Pellets of Zinc Oxide. *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*. 19 (2): 231-237.
- Glass, D.C. 1990. A Revive of The Health Effect of Odds of Hydrogen Sulphide Exposure. *Ann Occupypatal Hyg*. 34(1): 323-327.
- Gottfried, J.M. 2003. CO Oxidation Over Gold: Adsorption and Reaction of Oxygen, Carbon Monoxide, and Carbon Dioxide on an Au(110)-(1x2) Surface. *Dissertation*. Universitat Berlin. Berlin.
- Gupta, R.P., Turk, B.S., Portzer, J.W. and Cicero, D.C. 2001. Desulfurization of Syngas in a Transport Reactor. *Environmental Progress*. 20(3): 187-195.
- Guo, K., Wen, J. and Hao, Y. 2014. Optimal Packing of a Rotating Packed Bed for H<sub>2</sub>S Removal. *Environmental Science and Technology*. 48(12): 6844-6849.
- Guo, Z., Chen, G., Zeng, G., Liu, L. and Zhang, C. 2015. Metal Oxides and Metal Salt Nanos-Tructures for Hydrogen Sulfide Sensing: Mechanism and Sensing Performance. *RSC Advances*. 5(67): 54793-54805.
- Han, N., Chai, L., Wu, X. and Liu, H. 2010. Counterintuitive Sensing Mechanism of ZnO Nanoparticle Based Gas Sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 150(1): 230-238.

- Hendrickson, R.G., Chang, A. and Hamilton, R. J. 2004. Co-Worker Fatalities from Hydrogen Sulfide. *American Journal of Industrial Medicine*. 45(4): 346-350.
- Henrich, V.F. and Cox, P.A. 1994. *The Surface Science of Metal Oxides*. Cambridge University Press. Cambridge. Pp. 257-264.
- Henthorn, H.A. and Pluth, M.D. 2015 Mechanistic Insights into The H<sub>2</sub>S Mediated Reduction of Aryl Azides Commonly Used in H<sub>2</sub>S Detection. *Journal of the American Chemical Society*. 137(48): 15330-15336.
- Hulanicki, A., Geab, S. and Ingman, F. 1991. Chemical Sensors Definitions and Classification. *Pure and Applied Chemistry*. 63(9): 1247-1250.
- Iversen, K.J. and Spencer, M.J.S. 2013. Effect of ZnO Nanostructure Morphology on The Sensing of H<sub>2</sub>S Gas. *The Journal of Physical Chemistry*. 117(49): 26106–26118
- Kekalenteu, D.C. 2020. Simulasi Sinyal Sensor Berbasis Fungsi Kerja ZnO untuk Gas NO<sub>2</sub>. *Research Paper*. Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Kaur, M., Jain, N., Sharma, K., Bhattacharya, S., Roy, M., Tyagi, A.K, Gupta, S.K. and Yakhmi, J.V. 2008. Room-Temperature H<sub>2</sub>S Gas Sensing at ppb Level by Single Crystal In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Whiskers. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 133(2): 456-461.
- Kawamoto, K., Hayasaka, T., Nakajima, T., Streets, D. and Woo, J.H. 2004. Examining The Aerosol Indirect Effect over China using an SO<sub>2</sub> Emission Inventory. *Atmospheric Research*. 72(1). 353-363.
- Klingshirn, C. 2007. ZnO: From Basics Towards Applications. *Basic Solid State Physics*. 244(1): 3027-3073.
- Korotcenkov, G. 2007. Metal Oxides for Solid-State Gas Sensors: What Determines Our Choice?. *Materials Science and Engineering: B*. 139(1): 1-23.
- Korotcenkov, G. 2011. *Chemical Sensors: Comprehensive Sensor Technologies*. Momentum Press. New York. Pp. 1-10.
- Kuhr, H. J. and Ranke, W. 1987. Adsorption of H<sub>2</sub>S and H<sub>2</sub>O on a Cylindrical Ge Sample. *Surface Science*. 189(1): 420-425.
- Laksono, E.W. 2001. Etude de l'interaction de l'ammoniac avec des surfaces de Ni (111) pré-traitées sous oxygène et influence de l'hydroxylation. *Thesis*. Université Pierre and Marie Curie. Paris.
- Lange, I., Reiter, S., Patzel, M., Zykov, A., Nefodov, A., Hildebrandt, J., Hecht, S., Kowarik S., Wöll, C., Heimel, G. and Neher, D. 2014. Tuning the Work Function of Polar Zinc Oxide Surfaces using Modified Phosphonic Acid Self-Assembled Monolayers. *Advanced Functional Materials*. 24(44): 7014-7024.



- Li, W., Sun, W., Yu, X., Du, L. and Li, M. 2013. Coumarin-Based Fluorescent Probes for H<sub>2</sub>S Detection. *J Fluoresc.* 23(1): 181-186.
- Liu, Z., Fan, T., Zhang, D., Gong, X. and Xu, J. 2009. Hierarchically Porous ZnO Sensitivity and Selectivity to H<sub>2</sub>S derived from Biotemplates. *Sensors and Actuators B: Chemical.* 136(2): 499-500.
- Marjunus, R. 2018. Development of Pt-based Sensitive Layer for Carbon Monoxide Work Function Change Based Sensor in Air at Room Temperature. *Dissertation.* Universität der Bundeswehr München. Neubiberg.
- McCash, E.M. 2001. *Surface Chemistry.* Oxford University Press. London. Pp. 142.
- Moradi, H., Azizpour, H., Bahmanyar, H., and Mohammadi, M. 2020. Molecular Dynamics Simulation of H<sub>2</sub>S Adsorption Behavior on the Surface of Activated Carbon. *Inorganic Chemistry Communications.* 118(4): 108048.
- Mortezaali, A. and Moradi. 2014. The Correlation between The Substrate Temperature and Morphology ZnO Nanostructure for H<sub>2</sub>S Gas Sensor. *Sensors and Actuators A: Physical.* 206(1): 30-34.
- Najjar, M.S. and Jung, D.Y. 1995. High Temperature Desulfurization of Synthesis Gas with Iron Compounds. *Fuel Processing Technology.* 44(1): 173-180.
- National Research Council. 2009. Emergency and Continuous Exposure Guidance Levels for Selected Submarine Contaminants. *Sciences Engineering Medicine.* Vol 3.
- Nix, R. 2014. *An Introduction to Surface Chemistry.* Queen Mary University of London. London.
- Novochinski, I.I., Song, C.S., Ma, X.L., Liu, X.S. Shore, L., Lampert, J. and Farrauto, R.J. 2004. Low-Temperature H<sub>2</sub>S Removal from Steam-Containing Gas Mixtures with ZnO for Fuel Cell Application. 2. Wash Coated Monolith. *Energy and Fuel.* 18(2): 576-583.
- Oudar J. 1973. *La Chimie des Surfaces.* Presses Universitaire de France. Paris.
- Ranea, V.A., Quiña, P.L.D. and Yalet, N.M. 2019. General Adsorption Model for H<sub>2</sub>S, H<sub>2</sub>Se, H<sub>2</sub>Te, NH<sub>3</sub>, PH<sub>3</sub>, AsH<sub>3</sub>, and SbH<sub>3</sub> on The V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0 0 1) Including The Van der Waals interaction. *Chemical Physics Letters.* 720(2): 58-63.
- Ramazzini, B. 1713. *Diseases of Workers.* (Transl. from the Latin text *De Morbis Artificum* by W. C. Wright, 1940). The University of Chicago Press. Chicago.
- Roberts, M.W. and McKee, C.S 1978. *Chemistry of the Metal-Gas Interface.* Oxford University Press. London. Pp. 594.
- Rout, C., Hegde, M. and Rao, C. 2008. H<sub>2</sub>S Sensors Based on Tungsten Oxide Nanostructures. *Sensors and Actuators B: Chemical.* 128(2): 496-493.

- Senft, C. 2009. Austrittsarbeits Basierte Wassertofdetektion fur Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb. *Dissertation*. Universität der Bundeswehr München. Neubiberg.
- Senft, C., Iskra, P., Eisele, I. and Hansch, W. 2011. Work Function-Based Sensor Schottky and FET-Based Devices. *Proceedings of IEEE Sensors*. 4(4): 187-227.
- Shinde, S.D., Patil, G.E., Kajale D.D., Gaikward, V.B. and Jain, G.H. 2012. Synthesis of ZnO Nanorods by Spray Pyrolysis for H<sub>2</sub>S Gas Sensor. *Journal of Alloys and Compounds*. 528(1): 109-114.
- Smith, S.J., Pitcher, H. and Wigley, T.M.L. 2001. Global and Regional Anthropogenic Sulfur Dioxide Emissions. *Global and Planetary Change*. 29(1): 99-119.
- Somorjai, G.A. and Li, Y. 2010. *Introduction to Surface Chemistry and Catalysis, Second Ed.* John Wiley and Sons. New York.
- Sriram, S., Nagarajan, V. and Chandiramouli, R. 2015. H<sub>2</sub>S and NH<sub>3</sub> Adsorption Characteristics on CoO Nanowire Molecular Device a First-Principles Study. *Chemical Physics Letters*. 636(1): 51-57.
- Sucipto, A. 2022. Simulasi Pendeteksian Sinyal Sensor Gas H<sub>2</sub>S Menggunakan Ag<sub>2</sub>O Berbasis Fungsi Kerja. *Research Paper*. Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Susanto, Y.A. 2020. Simulasi Mekanisme Reaksi Pendeteksian Gas Amonia (NH<sub>3</sub>) pada Permukaan ZnO Berbasis Perubahan Fungsi Kerja. *Research Paper*. Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Syty, A. 1973. Determination of Sulfur Dioxide by Ultraviolet Absorption Spectrometry. *Analytical Chemistry*. 45(9):1744-1747.
- Tepore, A., Serra, A., Manno, D., Vali, L., Micocci, G. and Arnold, D P. 1998. Analysis of Porphyrin Langmuir-Blodgett Films Conductive Gas Sensors. *Journal of Application Physics*. 84(1): 1416-1430.
- Tyson, P. 2004. *Life's Little Essential*. NOVA. Origins.Pp. 12.
- Westmoreland, P.R. and Harrison, D.P. 1970. Evaluation of Candidate Solids for High-Temperature Desulfurization of Low-Btu Gasses. *Environmental Science and Technology*. 10(7): 659-661.
- Widanarto, R. W. 2007. Gas Detection with Floating Gate Field Effect Transistor. *Thesis*. Universität der Bundeswehr München. Neubiberg.
- Widanarto, R. W., Senft, C., Senftleben, O., Hansch, W. and Eisele, I. 2011. Characterization and Sensing Properties of ZnO Film in FG-FET Sensor System for NO<sub>2</sub> Detection. *International Journal of Basic and Applied Sciences JJBAS-IJENS*. 11(1): 104-108.

- Yamazoe, N. and Shimanoe, K. 2008. Theory of Power Laws for Semiconductor Gas Sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 128(2): 566-573.
- Yan, X.T. and Xu, Y. 2010. *Chemical Vapor Deposition*. Springer-Verlag. London. Pp. 239-243.
- Zhang, Y.Y., Zhou, H., Wu, P., Zhang, H.R, Xu, J. and Chen, H.Y. 2014. In Situ Activation of CdS Electrochemiluminescence Film and Its Application in H<sub>2</sub>S Detection. *Analytical Chemistry*. 86(17): 8657-8664.
- Zuandara, A.R. 2020. Simulasi Mekanisme Reaksi Pendeteksian Gas SO<sub>2</sub> pada Bahan ZnO Berbasis Perubahan Fungsi Kerja ( $\Delta\Phi$ ). *Research Paper*. Universitas Lampung. Bandar Lampung.