



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TL 184834

ANALISIS PENGARUH KONSENTRASI PREKURSOR
DAN DOPING ALUMINIUM TERHADAP
KARAKTERISTIK THIN FILM ZnO SEBAGAI APLIKASI
SENSOR GAS SO₂ DENGAN METODE DEPOSISI SPRAY
PYROLYSIS

FIRDOS NUR FADILLAH
NRP 0251154000079

Dosen Pembimbing
Dr. Agung Purniawan, ST., M.Eng
Diah Susanti, S.T., M.T., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



TUGAS AKHIR - TL184834

**ANALISIS PENGARUH KONSENTRASI
PREKURSOR DAN DOPING ALUMINIUM
TERHADAP KARAKTERISTIK THIN FILM ZnO
SEBAGAI APLIKASI SENSOR GAS SO₂ DENGAN
METODE DEPOSISI SPRAY PYROLYSIS**

**FIRDOS NUR FADILLAH
NRP 0251154000079**

**Dosen Pembimbing
Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng.
Diah Susanti, S.T., M.T., PhD.**

**DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019**

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TL184834

**EFFECT OF PRECURSOR CONCENTRATION
AND ALUMINIUM DOPING ON
CHARACTERISTIC OF ZnO THIN FILM AS SO₂
GAS SENSOR APPLICATION BY SPRAY
PYROLYSIS DEPOSITION METHOD**

**FIRDOS NUR FADILLAH
NRP 0251154000079**

Advisors

**Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng.
Diah Susanti, S.T., M.T., PhD.**

**DEPARTMENT OF MATERIAL ENGINEERING
Faculty Of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute Of Technology
Surabaya 2019**

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**ANALISIS PENGARUH KONSENTRASI
PREKURSOR DAN DOPING ALUMINIUM
TERHADAP KARAKTERISTIK THIN FILM ZnO
SEBAGAI APLIKASI SENSOR GAS SO₂ DENGAN
METODE DEPOSISI SPRAY PYROLYSIS**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Metalurgi Manufaktur
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

FIRDOS NUR FADILLAH
NRP 0251154000079

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Agung Purniawan, ST., M.Eng (Pembimbing I)
2. Diah Susanti, ST., MT., PhD (Pembimbing II)



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**ANALISIS PENGARUH KONSENTRASI
PREKURSOR DAN DOPING ALUMINIUM
TERHADAP KARAKTERISTIK THIN FILM ZnO
SEBAGAI APLIKASI SENSOR GAS SO₂ DENGAN
METODE DEPOSISI SPRAY PYROLYSIS**

Nama : Firdos Nur Fadillah
NRP : 0251154000079
Departemen : Teknik Material
Dosen Pembimbing: Dr. Agung Purniawan, ST., M.Eng
Co-Pembimbing : Diah Susanti, ST., MT., PhD

Abstrak

ZnO merupakan material semikonduktor yang secara luas digunakan dalam berbagai aplikasi teknologi, seperti sensor gas. Pada proses pembuatan lapisan ZnO, Zinc acetate dihydrate digunakan sebagai prekursor dan metanol sebagai pelarut yang dideposisikan pada material kaca borosilikat dengan metode spray pyrolysis. Variasi konsentrasi prekursor dan penambahan doping mempengaruhi karakteristik lapisan ZnO. Penelitian ini menganalisis pengaruh konsentrasi prekursor dan penambahan doping Aluminium terhadap karakteristik lapisan tipis ZnO sebagai aplikasi untuk sensor gas SO₂. Variasi konsentrasi prekursor yang diteliti yaitu 0,05M, 0,1M, 0,15M, dan 0,2M. Sementara penambahan doping Aluminium sebesar 4%. Dari hasil pengujian XRD ditunjukkan peningkatan kristalinitas ZnO, sedangkan pada penambahan doping Aluminium terjadi penurunan kristalinitas ZnO. Pada hasil pengujian SEM-EDX menunjukkan morfologi dengan butir semakin membesar sedangkan penambahan doping Aluminium menyebabkan morfologi banyak retakan tetapi lebih padat dan halus. Pada hasil pengujian UV-Vis ditunjukkan peningkatan absorbansi dan penurunan energi band gap, sedangkan penambahan doping

Aluminium menyebabkan penurunan absorbansi dan peningkatan energi band gap. Pada uji sensitivitas sensor gas SO₂ ditunjukkan peningkatan sensitivitas gas sedangkan penambahan doping Aluminium menurunkan temperatur operasi thin film ZnO .

Kata Kunci: *ZnO, spray pyrolysis, kaca borosilikat, sensor gas.*

**EFFECT OF PRECURSOR CONCENTRATION AND
ALUMINIUM DOPING ON CHARACTERISTIC OF ZnO
THIN FILM AS SO₂ GAS SENSOR APPLICATION
DEPOSITED BY SPRAY PYROLYSIS METHOD**

Name : Firdos Nur Fadillah
NRP : 0251154000079
Department : Material Engineering
Advisors : Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng.
: Diah Susanti, S.T., M.T., PhD.

Abstract

ZnO is a semiconductor material that is widely used in various technological applications, such as gas sensors. In the process of making ZnO film, Zinc acetate dehydrate is used as a precursor and methanol as a solvent which is deposited on borosilicate glass material with the spray pyrolysis method. Variations in precursor concentration and the addition of doping affect the characteristics of the ZnO layer. This research is aimed to analyze the effect of the concentration of precursors and Aluminium doping additions on the characteristics of the ZnO thin film as an application for the SO₂ gas sensor. Variations in concentration of precursors studied were 0.05M, 0.1M, 0.15M, and 0.2M. While the addition of Aluminum doping is 4%. From the test results of XRD showed an increase in ZnO crystallinity, while the addition of Aluminum doping occurred decreased the crystallinity of ZnO. From the SEM-EDX test, grain morphology was getting bigger, meanwhile, Aluminum doping addition caused many cracks on the morphology but made the surface became denser and smoother. the UV-Vis test results, showed increasing in absorbance but decreasing the bandgap energy meanwhile, the

addition of Aluminum doping caused decreasing in absorbance but increasing the bandgap energy. The SO₂ gas sensor sensitivity test showed increasing in gas sensitivity meanwhile, the addition of Aluminum doping decreased the operating temperature of ZnO thin film.

Keywords: ZnO, spray pyrolysis, borosilicate glass, gas sensor

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir dengan judul “**Analisis Pengaruh Konsentrasi Prekursor dan Doping Aluminium terhadap Karakteristik Thin Film ZnO sebagai Aplikasi Sensor Gas SO₂ dengan Metode Deposisi Spray Pyrolysis**” untuk memenuhi syarat kelulusan di Departemen Teknik Material FTI-ITS Surabaya.

Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dari berbagai pihak, tugas akhir ini tidak dapat terselesaikan dengan baik dan tepat waktu. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu, antara lain:

1. Allah S.W.T yang merupakan Rahmatan Lil ‘Alamin
2. Kedua orang tua yang mendoakan dan mendukung penulis
3. Dr. Agung Purniawan S.T., M.Eng selaku Ketua Departemen Teknik Material FTI – ITS dan dosen pembimbing tugas akhir
4. Diah Susanti, S.T., M.T., PhD. selaku co-dosen pembimbing tugas akhir
5. Dr. Eng. Hosta Ardhyananta S.T., M.Sc selaku kepala program studi S-1 dan dosen wali penulis.
6. Dian Mughni Felicia, S.T., M.Sc selaku sekretaris program studi S-1.
7. Tim penguji seminar proposal dan sidang tugas akhir
8. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Material FTI – ITS.
9. Mahasiswa Teknik Material angkatan 2015 selaku angkatan penulis .

Surabaya, Juli 2019

Penulis

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 <i>Thin Film</i>	5
2.2 Metode Deposisi <i>Thin Film</i>	6
2.3 Metode Deposisi <i>Chemical Spray Pyrolysis</i>	8
2.4 Semikonduktor.....	17
2.5 Sensor Gas	22
2.6 Sensor Gas Semikonduktor.....	23
2.7 Sensitivitas Sensor Gas.....	25
2.8 Sulfur Dioksida.....	26
2.9 Penelitian Sebelumnya.....	28
BAB III METODOLOGI	
3.1 Diagram Alir Penelitian	41
3.2 Metode Perancangan.....	42
3.3 Prosedur Penelitian	42
3.4 Pengujian Penelitian	45
3.5 Rancangan Penelitian.....	50
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1 Hasil Uji XRD	51
4.2 Hasil Uji SEM-EDX	55

4.3 Hasil Uji UV-Visible Spectrophotometry.....	59
4.4 Hasil Uji Sensitivitas Sensor Gas.....	64
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan	71
5.2 Saran	72
DAFTAR PUSTAKA	73
LAMPIRAN	81
BIODATA PENULIS	101

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Diagram Teknik Deposisi <i>Thin Film</i>	7
Gambar 2.2	Skema Rangkaian <i>Spray Pyrolysis</i>	9
Gambar 2.3	Proses Dekomposisi Prekursor.....	12
Gambar 2.4	Struktur Wurtzite ZnO	18
Gambar 2.5	Struktur Kristal ZnO dengan Doping Aluminium	20
Gambar 2.6	Skema Sensor Gas <i>Thin Film</i>	24
Gambar 2.7	SEM <i>Micrograph</i> Lapisan ZnO pada Berbagai Konsentrasi Larutan Prekursor (a) 0,03M (b) 0,05M (c) 0,07M (d) 0,1 M	28
Gambar 2.8	EDS Lapisan ZnO pada Temperatur 503 K dengan Konsentrasi 0,05 M.....	29
Gambar 2.9	Plot Energi Foton ($h\nu$) vs $(\alpha h\nu)^2$ pada Lapisan ZnO pada Konsentrasi Larutan yang Berbeda	30
Gambar 2.10	Karakteristik I-V dari Lapisan Tipis ZnO dari Berbagai Konsentrasi Prekursor.....	31
Gambar 2.11	Kurva Respon Sensor ZnO Tanpa Doping dan Doping Al pada Temperatur 100-300°C dengan Konsentrasi H ₂ S 600 ppm.....	32
Gambar 2.12	Respon Dinamika Transien Sensor 4Al-ZnO terhadap Perbedaan Konsentrasi Gas H ₂ S pada Temperatur 200°C.....	33
Gambar 2.13	Pola XRD pada Proses Deposisi Lapisan Tipis terhadap Perbedaan Temperatur Substrat.....	35
Gambar 2.14	Sensitivitas ZnO (Temperatur Substrat 400°C) terhadap Perbedaan Temperatur Operasi Gas CH ₄	36
Gambar 2.15	Pola XRD <i>Hiarchical ZnO Nanoflowers</i>	37
Gambar 2.16	Morfologi <i>Hiarchical ZnO Nanoflowers</i>	38

Gambar 2.17	Respon <i>Hierarchical ZnO Nanoflowers</i> dengan 30 ppm dan 60 ppm Gas SO ₂ pada Berbagai Temperatur Kerja.....	39
Gambar 2.18	Respon <i>Hierarchical ZnO nanoflowers</i> dengan Temperatur Operasi Optimum pada Berbagai Konsentrasi gas SO ₂	40
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian.....	41
Gambar 3.2	Rangkaian Alat Kerja <i>Spray Pyrolysis</i>	44
Gambar 3.3	Sistem <i>Dynamic Gas</i>	45
Gambar 3.4	Preparasi Sampel Uji Sensor Gas.....	46
Gambar 3.5	Rangkaian Peralatan Uji Sensor Gas.....	46
Gambar 3.6	Alat Uji SEM <i>Inspect S50</i>	49
Gambar 3.7	Alat Uji XRD <i>Panalytical X'pert Pro</i>	49
Gambar 4.1	Pola XRD Lapisan ZnO dengan Variasi Konsentrasi Prekursor.....	51
Gambar 4.2	Pola XRD Lapisan Tipis ZnO dengan Variasi Konsentrasi Prekursor dan Penambahan Doping 4% Al.....	53
Gambar 4.3	SEM <i>Micrograph</i> Lapisan ZnO pada Berbagai Konsentrasi Larutan Prekursor ZnO (a) 0,05M (b) 0,1M (c) 0,15M (d) 0, 2M.....	55
Gambar 4.4	SEM <i>Micrograph</i> Lapisan ZnO pada Berbagai Konsentrasi Larutan Prekursor ZnO yang Didoping 4% Al (e) 0,05M (f) 0,1M (g) 0,15M (h) 0,2M.....	57
Gambar 4.5	Spektrum Absorbansi <i>Thin Film</i> ZnO.....	60
Gambar 4.6	Spektrum Transmittansi <i>Thin Film</i> ZnO.....	61
Gambar 4.7	Variasi $(\alpha h\nu)^2$ vs Energi Foton (h ν) pada Konsentrasi Prekursor 0,05M.....	63
Gambar 4.8	Sensitivitas Sensor Gas pada Variasi Konsentrasi Prekursor <i>Thin Film</i> terhadap Konsentrasi Gas SO ₂ (T=250°C).....	65
Gambar 4.9	Sensitivitas Sensor Gas <i>Film</i> ZnO pada Variasi Konsentrasi Prekursor terhadap Variasi Temperatur Operasi (gas =25 ppm).....	66

Gambar 4.10 Sensitivitas Sensor Gas pada *Thin Film* ZnO
Tanpa Doping dan Didoping Al terhadap
Temperatur (gas=75 ppm)..... 68

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Karakteristik dan Aplikasi <i>Thin Film</i>	6
Tabel 2.2 Atomizer yang Digunakan dalam Metode <i>Spray Pyrolysis</i>	11
Tabel 2.3 Jenis-Jenis Prekursor <i>Spray Pyrolysis</i>	15
Tabel 2.4 Solvent dan Aditif <i>Spray Pyrolysis</i>	17
Tabel 2.5 Kelebihan dan Kekurangan dari Beberapa Jenis Sensor Gas yang Paling Umum	22
Tabel 2.6 Dampak Gas SO ₂ terhadap Manusia.....	27
Tabel 2.7 Variasi Ketebalan Lapisan Tipis dengan Temperatur Deposisi	34
Tabel 2.8 Hasil Ukuran Kristal	34
Tabel 3.1 Komposisi Kimia Kaca Borosilikat	42
Tabel 3.2 Parameter Konstan pada Penelitian <i>Spray Pyrolysis</i>	44
Tabel 3.3 Spesifikasi Sensor Gas SO ₂	47
Tabel 3.4 Tabel Perancangan.....	50
Tabel 4.1 Ukuran Kristal pada Variasi Konsentrasi Prekursor	52
Tabel 4.2 Rasio Zn/O pada Perbedaan Konsentrasi Prekursor <i>Thin Film ZnO</i>	58
Tabel 4.3 Rasio Zn/O dan Al/Zn pada <i>Thin Film ZnO</i>	59
Tabel 4.4 Energi <i>Bandgap Thin Film ZnO</i>	64

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan peradaban industri saat ini, memerlukan pemantauan lingkungan gas sehubungan dengan perlindungan kesehatan manusia dan perlindungan lingkungan alam, serta di pabrik industri dalam proses-proses teknologi. Salah satu gas yang berbahaya bagi manusia dan lingkungan adalah gas SO₂. SO₂ adalah komponen pencemar udara dengan jumlah paling banyak. Gas ini memiliki karakteristik tidak berwarna dan berbau tajam. Sumber SO₂ adalah penggunaan batubara dan minyak bumi sebagai sumber energi, dan juga dari emisi kendaraan bermotor. Pada konsentrasi rendah, keberadaan SO₂ jika terhirup akan menimbulkan infeksi sistem pernafasan, dan pada konsentrasi tinggi akan berbahaya dan menyebabkan kematian. Terlepas dari efek berbahaya bagi tubuh manusia, senyawa sulfur juga dapat merusak peralatan logam dan katalis racun, yang mengakibatkan kerugian ekonomi dikarenakan SO₂ dapat menyebabkan hujan asam. Terkait dengan fenomena tersebut, diperlukan suatu teknologi sensor gas untuk mendeteksi gas-gas pencemar lingkungan tersebut. Struktur sensor yang peka terhadap beberapa lingkungan gas yang dipilih harus memiliki sensitivitas tinggi dan selektivitas yang baik. Sejak ditemukannya sensor gas berbasis metal oksida oleh Taguchi, berbagai macam sensor gas telah banyak tersedia di pasaran.

Sensor gas berbasis oksida logam semikonduktor umumnya digunakan untuk pemantauan lingkungan dan aplikasi industri karena keunggulannya seperti dimensi kecil, biaya rendah dan pengoperasian yang mudah. Solusi penggunaan sensor untuk mendeteksi keberadaan gas berbahaya mulai berkembang. Sensor gas SnO₂ termasuk sensor yang paling banyak digunakan dan dikembangkan di pasaran, tapi sampai saat ini belum bisa menghasilkan sensitivitas yang tinggi (Hermida, *et al.*, 2013). SnO₂ merupakan salah satu bahan yang banyak digunakan

sebagai sensor gas CO karena memiliki masa pakai yang lama dan relatif stabil, namun memiliki kelemahan seperti temperatur kerja yang tinggi ($>350^{\circ}\text{C}$), resistansi juga relatif tinggi ($\text{M}\Omega$) dan kurang sensitif (Debataraja, 2017). Beroperasi pada temperatur tinggi dapat menyebabkan perpaduan dan perubahan struktural yang menyebabkan ketidakstabilan sensor dan variasi respons. Fabrikasi material sensor dengan temperatur operasi rendah dapat menghambat perubahan struktural, mengurangi konsumsi daya, dan memungkinkan deteksi gas yang mudah terbakar dengan lebih aman, dan SnO_2 memiliki energi band gap yang lebar (Sahraei, *et al.*, 2009).

Untuk mengatasi kelemahan dari sensor berbasis SnO_2 , adapun sensor ZnO telah dipelajari secara luas untuk aplikasi sensor gas. Telah dibuktikan bahwa ZnO adalah material sensitif gas yang baik untuk mendeteksi gas pereduksi maupun pengoksidasi. Berbagai gas telah diuji untuk sensor struktur nano ZnO yang dipelajari termasuk etanol, aseton, NO_2 , NH_3 , H_2 dan CO_2 dan hidrogen. Dalam rangka meningkatkan sensitivitas dan selektivitas H_2S , banyak upaya dilakukan untuk mensistematika struktur nano ZnO dengan morfologi yang berbeda. Namun, ada sangat sedikit laporan tentang sensor H_2S suhu kamar berbasis nanostructure ZnO (Kalyamwar, *et al.*, 2013).

Pembuatan lapisan tipis ZnO dapat dilakukan dengan beberapa cara, salah satunya adalah metode *spray pyrolysis*. Metode deposisi tersebut menggunakan larutan yang disemprotkan oleh *nozzle* pada substrat yang dipanaskan, metode tersebut memiliki keunggulan antara lain biaya peralatan dan bahan baku murah, proses sederhana dengan berbagai pilihan prekursor, dan kemampuan untuk membentuk film di area yang luas. Komposisi film dapat dikontrol dengan menyesuaikan larutan prekursor. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan proses deposisi *thin film* ZnO pada substrat kaca dengan bervariasi konsentrasi larutan prekursor dan doping aluminium sebagai aplikasi sensor gas SO_2 dengan metode

deposisi *spray pyrolysis* yang kemudian diuji sifat struktur, sifat optik dan kemampuan untuk merespon gas SO₂.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun permasalahan yang diangkat dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh konsentrasi prekursor ZnO dan penambahan Al pada prekursor terhadap karakteristik film tipis ZnO hasil deposisi dengan metode *spray pyrolysis*?
2. Bagaimana pengaruh konsentrasi prekursor ZnO dan penambahan Al pada prekursor terhadap sensitivitas sensor gas ZnO hasil deposisi dengan menggunakan metode *spray pyrolysis*?

1.3 Batasan Masalah

Agar diperoleh hasil akhir yang baik dan sesuai dengan yang diinginkan serta tidak menyimpang dari permasalahan yang ditinjau, maka batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Komposisi material kaca borosilikat dianggap homogen.
2. Kecepatan alir prekursor dianggap konstan.
3. Oksigen dalam *chamber* dianggap konstan.
4. Kekasaran setiap kaca borosilikat dianggap homogen.
5. Proses *recovery time* pada sensor diabaikan

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan diadakannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh konsentrasi prekursor ZnO dan penambahan Al pada prekursor terhadap karakteristik film tipis ZnO hasil deposisi dengan metode *spray pyrolysis*.
2. Menganalisis pengaruh konsentrasi prekursor ZnO dan penambahan Al pada prekursor terhadap sensitivitas sensor gas ZnO hasil deposisi dengan menggunakan metode *spray pyrolysis*.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai salah satu solusi dalam mengatasi permasalahan gas SO₂ di lingkungan industri untuk meningkatkan keselamatan dan kesehatan kerja.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Thin Film*

Thin Film dapat didefinisikan sebagai lapisan material yang ketebalannya hanya beberapa mikrometer ($<1 \mu\text{m}$). *Thin film* tidak dapat berdiri sendiri dan membutuhkan substrat untuk melekat. Teknologi *thin film* membutuhkan lapisan permukaan yang jauh lebih halus. Atom-atom/molekul-molekul memiliki energi tinggi karena adanya panas atau tenaga listrik atau karena cara lain, kemudian langsung diangkut dari sumber ke substrat untuk membuat lapisan tipis (Roy & Chandan, 2016). Struktur lapisan tipis tidak hanya dipengaruhi oleh jenis proses yang digunakan, tetapi juga oleh parameter pertumbuhan lapisan dalam proses tertentu. Karena kisaran ketebalan *thin film* tersebut nano hingga mikro, variasi kecil dalam kondisi pertumbuhan dapat menyebabkan perbedaan sifat lapisan yang cukup besar (Gaspari, 2018).

Tujuan utama pengendapan oksida logam pada substrat target adalah menumbuhkan lapisan tipis di atasnya. *Thin film* ditandai oleh ketebalan dan bentuk serta susunan partikel. Istilah film tipis digunakan ketika partikel-partikel ini diklasifikasikan sebagai struktur nano. Struktur nano dikenal sebagai struktur yang dirancang pada skala atom atau molekul dimana satu dimensi diukur dalam skala nanometer (1-100 nm). Karena mereka memiliki ukuran kecil (partikel, butir atau lapisan) dan rasio permukaan terhadap volume yang tinggi, peningkatan signifikan dalam area batas butir, bahan ini diharapkan menunjukkan sifat mekanis, optik, elektronik, dan magnetik yang unik (Khatami, 2012). Karena setiap *thin film* yang terbentuk memiliki karakteristik yang berbeda sehingga pengaplikasiannya pun berbeda, seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 2.1.

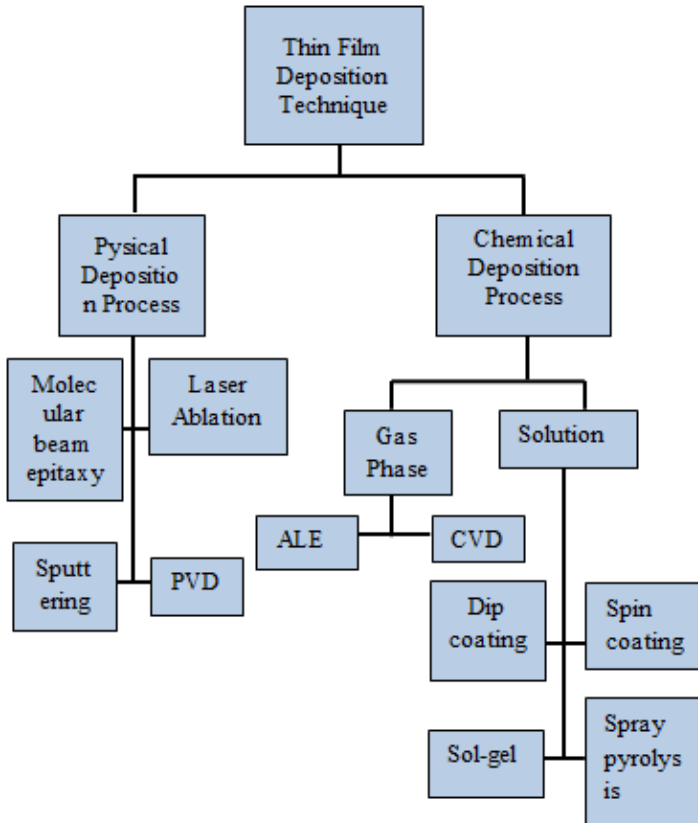
Tabel 2. 1 Karakteristik dan Aplikasi *Thin Film*
(Filipovic, et al., 2013)

Karakteristik <i>Thin Film</i>	Aplikasi
Optik	Reflektif/Antireflektif coating <i>Interference filters</i> Dekorasi (warna, mengkilap) <i>Disk</i> memori optik (CD, DVD) <i>Waveguides</i> Optik
Magnetik	Disk memori (Hard disk dan kaset)
Listrik	Isolasi Konduksi Perangkat semikonduktor <i>Driver</i> piezoelektrik
Thermal	<i>Barrier layers</i> <i>Heat sinks</i>
Kimia	Penghalang terhadap difusi atau paduan Perlindungan terhadap oksidasi atau korosi Sensor gas / cairan
Mekanik	<i>Tribological (wear resistant) coating</i> Kekerasan <i>Adhesi</i> Mikromekanik

2.2 Metode Deposisi *Thin Film*

Metode yang digunakan untuk deposisi *thin film* dibagi menjadi 2 kelompok berdasarkan sifat proses deposisi yaitu, *physical deposition process* (fisik) dan *chemical deposition process* (kimia). Metode deposisi fisik antara lain, *Physical Vapour Deposition* (PVD), *laser ablation*, *molecular beam epitaxy*, dan *sputtering*. Sedangkan pada metode deposisi kimia

terdiri dari fase gas dan larutan (Gambar 2.1). Metode deposisi kimia fase gas yaitu *Chemical Vapour Deposition* (CVD) dan *Atomic Layer Epitaxy* (ALE). *Spray Pyrolysis*, sol-gel, *spin-coating* dan *dip-coating* merupakan metode deposisi kimia dengan menggunakan larutan (Perednis & Ludwig J.Gauckler, 2005).



Gambar 2. 1 Diagram Teknik Deposisi *Thin Film*
(Umar & Mahendra Kumar, 2018)

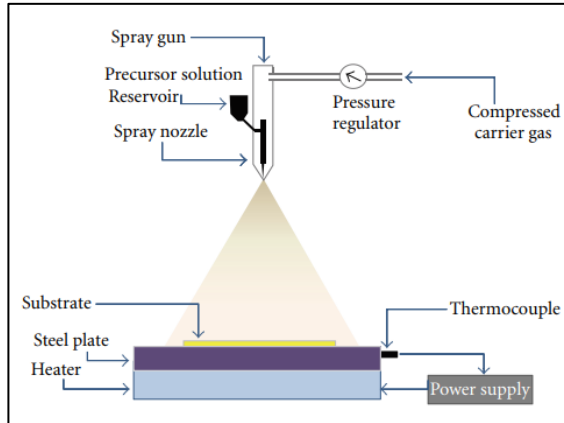
2.3 Metode Deposisi *Chemical Spray Pyrolysis*

Spray adalah proses pembentukan droplet dari fase cair yang terdispersi dalam fase gas. Proses pembentukan *spray* dikenal sebagai proses atomisasi. Metode *spray* banyak digunakan untuk membuat material dalam bentuk partikel berukuran mikrometer dan submikrometer (Tyassena, 2015). *Pyrolysis* berarti penguraian senyawa atau larutan kimia di bawah panas pada temperatur yang sangat tinggi. Kata *pyrolysis* berasal dari *pyro* berarti panas dan *lysis* berarti pemecahan/penguraian. Pemecahan bagian molekul kompleks menjadi unit sederhana dengan menggunakan panas disebut *pyrolysis*. *Pyrolysis* adalah jenis *Chemical Vapour Deposition* (CVD) khusus yang terjadi dengan dekomposisi termal dari komponen *volatile* pada substrat. Dalam dekomposisi termal, substrat biasanya dipanaskan di atas temperatur dekomposisi dan gas reaktan mengalir di atas substrat panas, terdekomposisi menjadi lapisan (Singh, 2017).

Spray Pyrolysis adalah teknik yang melibatkan larutan prekursor yang diatomisasi menjadi aerosol dan disemprotkan pada substrat yang dipanaskan. Temperatur substrat yang tinggi menyebabkan reaksi *pyrolysis* di permukaan sehingga pada substrat terbentuk deposit film tipis (Sripiyanem, 2018). Pada *Chemical Spray Pyrolysis*, larutan prekursor yang mengandung unsur-unsur penyusun senyawa yang disimpan dalam wadah yang dihubungkan ke alat *spray atomizer*. Udara atmosfer terkompresi dari kompresor dialirkan ke wadah dan ke *spray gun*. Larutan prekursor dari *spray gun* dipecah menjadi *droplet* kecil yang disemprotkan ke substrat, dipertahankan pada 350°C dengan bantuan unit pengontrol suhu. Pada permukaan substrat, terjadi dekomposisi pirolitik prekursor sehingga terbentuk film yang melekat (Safeera, 2015).

Peralatan khas metode *spray pyrolysis* terdiri dari alat penyemprot (*atomizer*), larutan prekursor, pemanas substrat, dan pengontrol temperatur. Jenis atomizer yang biasanya digunakan dalam metode *spray pyrolysis*: *air blast / pneumatic* (cairan terkena aliran udara), ultrasonik (frekuensi ultrasonik

menghasilkan panjang gelombang pendek yang diperlukan untuk atomisasi halus) dan elektrostatik (cairan terpapar ke medan listrik tinggi (Perednis, *et al.*, 2005). Alat dan rangkaian dari metode *spray pyrolysis* dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Skema Rangkaian *Spray Pyrolysis* (Patil, *et al.* 2012)

Spray Pyrolysis adalah teknik penelitian pemrosesan yang dipertimbangkan untuk menyiapkan lapisan tipis dan tebal, pelapis keramik dan bubuk. *Thin film* dengan ketebalan berbeda, morfologi permukaan, ukuran kristal, sifat listrik dan optik dapat disimpan. Teknik *Pneumatic Spray Pyrolysis* (PSP) digunakan untuk pelapisan film tipis karena teknik tersebut sederhana dan hemat biaya, yang mengarah pada pertumbuhan *film* yang seragam, dibandingkan dengan teknik lain seperti *dip coating*, CVD atau MOCVD (Gadhi, 2017). Berdasarkan bentuk produk yang diperoleh, metode *spray pyrolysis* dapat dibagi menjadi dua kelompok, yaitu: metode *Spray Pyrolysis Synthesis* (SPS) untuk memperoleh powder dan metode *Spray Pyrolysis Deposition* (SPD) untuk memperoleh *thin film*. Metode *spray pyrolysis* juga dapat diterapkan untuk memperoleh berbagai jenis film tipis. Ketebalan film sangat penting untuk *Spray Pyrolysis Deposition*,

seperti ukuran partikel serbuk di *Spray Pyrolysis Synthesis*. Ini sebanding dengan aliran semprotan, luas permukaan substrat, dan lamanya tinggal di tungku. Selain itu, SPD memungkinkan sistem multilayer, dengan pengulangan penyemprotan (Kozhukharov & S. Tchaoushev, 2011).

Metode *Chemical Spray Pyrolysis* memiliki sejumlah keunggulan lain: 1) Biaya rendah (peralatan murah, tidak memerlukan target kualitas tinggi atau ruang hampa); 2) Kontrol komposisi dan struktur mikro yang mudah (cara yang mudah untuk melunakkan bahan hanya dengan menambahkan elemen doping ke dalam larutan semprot); 3) pengendapan pada temperatur menengah 100-500 °C; 4) Kemampuan teknologi untuk produksi massal. Namun *Chemical Spray Pyrolysis* memiliki beberapa kelemahan, yang utama sebagai berikut: 1) kemungkinan oksidasi sulfida ketika diproses di atmosfer udara; 2) kesulitan dalam penentuan temperatur pertumbuhan; 3) pada proses penyemprotan dengan waktu yang lama menjadikan semprotan berantakan; 4) kualitas *film* tergantung pada ukuran droplet dan *spray nozzle* (Dedova, 2017). Komposisi lapisan dapat dikontrol dengan menyesuaikan larutan prekursor. Struktur lapisan yang padat maupun berpori dapat terbentuk, tergantung pada kondisi pendeposisian, seperti temperatur substrat, jenis dan konsentrasi larutan prekursor, jenis dan tekanan *carrier gas*, jenis *nozzle*, dan karakteristik geometri dari sistem penyemprotan (Sripanem, 2018).

2.3.1 Mekanisme Deposisi pada *Spray Pyrolysis*

1. Atomisasi Prekursor

Atomisasi didefinisikan sebagai langkah pertama dalam sistem deposisi *spray pyrolysis*. Proses atomisasi merupakan faktor kritis dalam proses *spray pyrolysis*. Untuk menghasilkan droplet dari larutan spray dan mengirimkannya, dengan beberapa kecepatan awal dan radius ke arah permukaan media. *Spray pyrolysis* biasanya menggunakan *atomizer* yaitu *air blast*, ultrasonik, atau elektrostatik. *Atomizer* berbeda dalam ukuran

droplet yang dihasilkan, laju atomisasi, dan kecepatan awal tetesan. Jenis dan karakteristik atomizer dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Atomizer yang Digunakan dalam Metode *Spray Pyrolysis* (Filipovic L. d., 2013)

Atomizer	Diameter droplet (μm)	Kecepatan droplet (m/s)
<i>Pressure</i>	5 – 50	5 – 20
Ultrasonik	1 – 100	0,2 – 0,4
Elektrostatik	5 – 70	1 - 4

Nozzle ultrasonik menerapkan jumlah energi yang relatif kecil dan dapat menghasilkan droplet dengan radius sekitar kurang dari $2\mu\text{m}$, tetapi dengan biaya laju atomisasi yang rendah ($< \sim 2\text{cm}^3/\text{menit}$). Karena kemudahan produksinya, banyak perusahaan memilih untuk menggunakan *atomizer* tekanan daripada atomizers ultrasonik. *Atomizer* tekanan atau *air blast*, alat *spray* yang menggunakan udara kecepatan tinggi untuk menghasilkan aerosol dari larutan prekursor. Ukuran droplet dipengaruhi oleh kecepatan atomisasi dan kecepatan droplet mencapai substrat, ukuran droplet yang diproduksi dengan *pneumatic* atau *pressure nozzle* dipengaruhi oleh tekanan udara yang digunakan. Peningkatan tekanan udara menyebabkan penurunan diameter *droplet* rata-rata yang dihasilkan. Sebaliknya, peningkatan tekanan cair menyebabkan peningkatan diameter tetesan rata-rata. Meningkatkan jarak antara *spray nozzle* dan permukaan substrat akan mengurangi efek pemanasan dan tingkat deposisi yang berkurang, tetapi area pelapisan yang luas. Cara lain untuk mencapai efek yang sama adalah dengan meningkatkan sudut *spray nozzle* yang digunakan (Filipovic L. d., 2013).

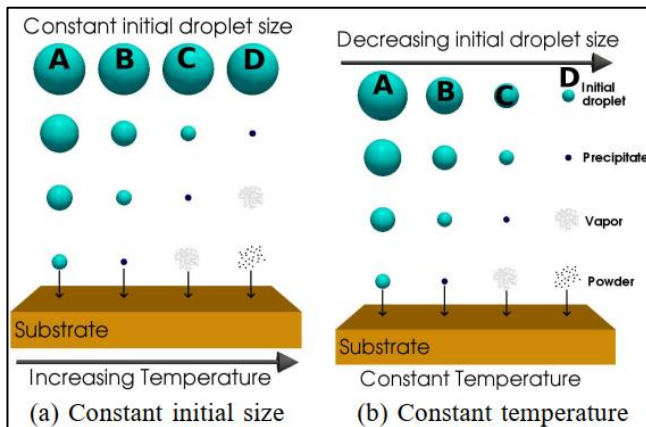
2. Transportasi Aerosol

Dalam aerosol, *droplet* diangkut dan kemudian menguap. Hal penting selama proses ini ialah sebanyak mungkin droplet

yang diangkut ke substrat tanpa membentuk bubuk atau partikel garam. *Droplet* aerosol mengalami penguapan pelarut selama pengangkutan ke substrat. Hal ini menyebabkan pengurangan ukuran *droplet* dan pengembangan gradien konsentrasi dalam *droplet*. Prekursor mengendap pada permukaan *droplet*, ketika konsentrasi permukaan melebihi batas kelarutan. Pengendapan terjadi karena penguapan pelarut cepat dan difusi zat terlarut lambat. Ini menghasilkan pembentukan kerak berpori dan partikel berongga, yang tidak diinginkan karena mereka meningkatkan kekasaran lapisan.

3. Dekomposisi Prekursor

Pada saat prekursor bergerak menuju substrat yang dipanaskan, prekursor mengalami berbagai perubahan yang dicirikan pada Gambar 2.3. Penguapan, pembentukan endapan, dan penguapan semua terjadi tergantung pada ukuran *droplet* dan temperatur sekitar.



Gambar 2.3 Proses Dekomposisi Prekursor
(Filipovic, et al., 2013)

Berdasarkan Gambar 2.3, Proses A (Temperatur rendah – ukuran droplet awal besar), ketika *droplet* besar mendekati substrat yang dipanaskan dan temperatur tidak cukup tinggi untuk

semua menguapkan larutan, *droplet* mengenai permukaan substrat. Setelah kontak, *droplet* seluruhnya menguap dan endapan kering tertinggal. Selama proses penguapan, temperatur substrat sedikit menurun pada titik tumbukan karena penguapan membutuhkan panas, yang mempengaruhi kinetika reaksi. Proses ini memiliki kemungkinan pelekatan yang lemah.

Proses B (Temperatur menengah - ukuran *droplet* sedang), ketika *droplet* berukuran sedang pada awal terbentuk, pelarut menguap sepenuhnya sebelum mengenai permukaan substrat. Ketika *droplet* mencapai permukaan, membentuk endapan seperti garam amorf dan endapan kering menyentuh permukaan, dimana terjadi dekomposisi. Proses ini memiliki kemungkinan pelekatan sedang.

Proses C (Temperatur lebih tinggi - ukuran *droplet* sedang / kecil), temperatur di substrat yang cukup tinggi meningkatkan temperatur ruang yang menyebabkan *droplet* menguap sebelum mencapai sekitar substrat sehingga endapan akan terbentuk lebih awal. Ketika endapan mencapai substrat, endapan menguap tanpa dekomposisi dan mengalami reaksi heterogen melalui langkah-langkah antara lain difusi molekul reaktan ke permukaan substrat, adsorpsi beberapa molekul di permukaan, difusi permukaan dan reaksi kimia, memasukkan reaktan ke dalam kisi, desorpsi dan difusi molekul produk dari permukaan substrat. Ini adalah reaksi CVD klasik, yang menghasilkan deposisi film yang berkualitas tinggi dan probabilitas pelekatan yang tinggi.

Proses D (Temperatur tertinggi - ukuran *droplet* kecil), pada temperatur tinggi *droplet* awal yang terbentuk berukuran kecil, prekursor menguap sebelum mencapai permukaan substrat sehingga *droplet* cepat membentuk endapan. Ketika endapan mencapai permukaan substrat, endapan menguap dan reaksi kimia terjadi dalam fase uap yang akibatnya partikel padat terbentuk. Reaksi homogen ini menyebabkan kondensasi molekul menjadi kristalit dalam bentuk endapan serbuk. Serbuk jatuh ke permukaan substrat, tetapi tanpa reaksi deposisi atau tidak terjadi

reaksi pengendapan. Proses ini memiliki kemungkinan pelekatan yang lemah (Filipovic L. d., 2013).

Ukuran rata-rata dan distribusi ukuran partikel akhir dapat ditentukan dari ukuran droplet yang diatomisasi dan konsentrasi awal larutan. Atomisasi adalah produksi droplet dan dispersinya ke dalam gas. Ukuran atau morfologi partikel akhir yang dihasilkan juga dapat ditentukan oleh konsentrasi dan kecepatan droplet yang dihasilkan oleh *atomizer*. Berbagai metode atomisasi (Bayvel & Z.Orzechowski, 1993) telah digunakan dalam studi *spray pyrolysis*, seperti bantuan udara (*pneumatic*) atau *two-fluid nozzle*, *ultrasonic*, *vibrating orifice*, dan *spinning disk* (Okuyama & I.Wuled, 2003).

2.3.2 Prekursor *Spray Pyrolysis*

Setiap prekursor memiliki karakteristik yang berbeda yang akan mempengaruhi karakteristik lapisan yang terbentuk. Pada Tabel 2.3 adalah karakteristik dari berbagai jenis prekursor. Garam anorganik seperti nitrat, karbonat, sulfat, dan klorida adalah prekursor yang paling umum digunakan. Sebagian besar partikel oksida logam tunggal atau multi dihasilkan dari garam anorganik. Kriteria utama pemilihan prekursor adalah kelarutan dan temperatur dekomposisi. Perbedaan kelarutan dua garam berbeda menghasilkan komposisi partikel yang tidak seragam karena pengendapan terjadi pada kejenuhan konsentrasi yang berbeda.

Tabel 2. 3 Jenis-Jenis Prekursor *Spray Pyrolysis*
(Jung, et al., 2010)

Prekursor	Keterangan	Contoh
Senyawa Anorganik	Paling sering digunakan sebagai prekursor. Kelarutan dan temperatur dekomposisi mempengaruhi bentuk partikel.	Nitrat, Karbonat, Sulfat, Klorida
Senyawa Metalorganik	Meningkatkan volatilitas untuk aplikasi dalam AACVD dan konversi gas ke partikel.	Asetat, Oksalat, Butoksida, Alkosida, Cu(hfac)
Senyawa Organometalik	Meningkatkan volatilitas untuk aplikasi dalam AACVD dan konversi gas ke partikel.	Sn(CH ₃) ₄ , Al(i-Bu) ₃
Koloid	Mengontrol porositas partikel.	Sol partikulat, Sol polimer, Emulsi (W/O, O/W)

Beberapa garam meleleh sebelum terdekomposisi sehingga membuat morfologi partikel tidak dapat diprediksi. Garam anorganik tidak mahal dan larut dalam air, yang merupakan keuntungan utama dari *spray pyrolysis droplet* larutan. Senyawa metalorganik dan organometalik juga merupakan prekursor yang baik yang menjadikan aplikasi *spray pyrolysis* lebih fleksibel. Terutama, keduanya berguna untuk pembentukan *thin film* pada

temperatur rendah atau tingkat produksi nanopartikel yang tinggi. Namun, kedua prekursor tersebut tidak stabil, beracun dan relatif mahal. Keduanya terdekomposisi pada temperatur rendah sehingga partikel diproduksi melalui proses konversi gas ke partikel. Partikel koloid seperti koloid sederhana atau air dalam emulsi minyak digunakan untuk mengontrol porositas partikel. Partikel padat dihasilkan ketika partikel koloid merupakan prekursor, karena pada tahap pengeringan, tidak ada cangkang keras yang terbentuk sehingga molekul pelarut diuapkan dan mereka keluar melalui pori-pori dengan mudah (Jung, et al., 2010).

2.3.3 *Solvent* dan Aditif

Solvent (pelarut) digunakan untuk melarutkan prekursor serbuk dan dapat pula ditambahkan suatu bahan aditif. Tabel 2.4 merupakan daftar pelarut dan aditif untuk merumuskan larutan prekursor pada *spray pyrolysis*. Garam anorganik dan metalorganik masing-masing dipasangkan dengan air dan organik sebagai pelarut. Kriteria pemilihan utama pelarut adalah densitas, tekanan uap, viskositas, dan tegangan permukaan. Properti ini mempengaruhi pembentukan *droplet* dan morfologi partikel. Salah satu peran aditif adalah memodifikasi sifat fisik larutan itu sendiri seperti viskositas atau tegangan permukaan, yang mempengaruhi ukuran *droplet* atau laju pembangkitan dalam generator aerosol. Pencegahan aglomerasi adalah peran aditif lainnya. Partikel bebas agregasi diproduksi setelah garam atau silika dilarutkan dengan air atau asam florida. Sifat-sifat partikel diubah oleh aditif. Misalnya, sukrosa atau CNT digunakan untuk mengontrol sifat partikel seperti konduktivitas partikel.

Tabel 2. 4 *Solvent dan Aditif Spray Pyrolysis*
(Jung, et al., 2010)

	Keterangan	Contoh
<i>Solvent</i>	Viskositas, densitas, tegangan permukaan merupakan sifat yang mempengaruhi morfologi dan produktivitas	Air Cairan ionik Fluida superkritis Organik
<i>Aditif</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Modifikasi viskositas dan tegangan permukaan. - Pencegahan aglomerasi - Meningkatkan sifat termasuk morfologi atau konduktivitas listrik produk 	Sufaktan (SDS, PVP, dll) Garam (NaCl) Sukrosa CNT Bahan Peledak (Asam Sitrat, Urea)

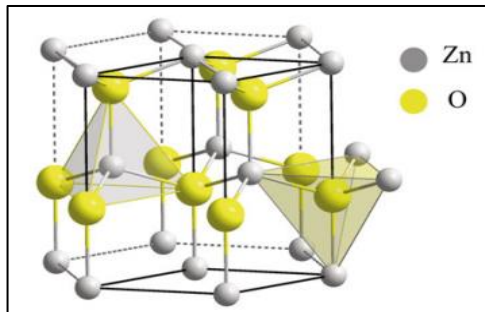
2.4 Semikonduktor

Material padat diklasifikasikan menjadi 3 kelompok berdasarkan kemampuan mengalirkan arus listrik yaitu konduktor, semikonduktor, dan isolator. Material konduktor memiliki banyak elektron bebas yang bertindak sebagai pembawa muatan, sehingga memiliki tingkat konduktivitas listrik yang tinggi. Material isolator hampir tidak memiliki elektron bebas dan tingkat konduktivitas listrik yang sangat rendah. Semikonduktor merupakan material yang memiliki tingkat konduktivitas listrik yang besarnya diantara konduktor dan isolator (Kal, 2002).

2.4.1 Material ZnO

Seng oksida (ZnO) terdapat dikulit bumi sebagai *mineral zincite* dan telah diteliti secara luas serta digunakan dalam

berbagai aplikasi teknologi saat ini, antara lain sebagai *transparent conducting oxide* (TCO), sensor gas. ZnO umumnya berupa serbuk berwarna putih yang hampir tak larut dalam air. Serbuk ini digunakan secara luas sebagai bahan tambahan ke dalam berbagai material seperti polimer, keramik, gelas (glass), semen, karet, pigmen, makanan (*source of Zn nutrient*), ferit, pemadam kebakaran, plester dan lain-lain. Sebagai material semikonduktor, ZnO menghasilkan luminisen biru sampai hijau-kuning yang cukup efisien. Sifat ini menjadikan ZnO sebagai material yang sangat potensial bagi pengembangan sumber cahaya putih (*white light source*). ZnO juga merupakan material yang sangat efisien bagi pengembangan fosfor tegangan rendah dan peraga flouresen vakum serta peraga medan emisi (*field emission display*, FED) (Witjaksono, 2011). ZnO merupakan material semikonduktor dengan struktur *wurtzite* yang stabil seperti pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Struktur *Wurtzite* ZnO (Jiao, 2017)

Berdasarkan Gambar 2.4, struktur *wurtzite* heksagonal adalah jenis kristal ZnO yang paling stabil pada kondisi sekitar, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4. Konstanta kisi *wurtzite* ZnO adalah $a = 3,296 \text{ \AA}$ dan $c = 5,206 \text{ \AA}$. ZnO memiliki celah pita lebar (3,37 eV). Kekosongan (*vacancy*) ion oksigen merupakan cacat yang paling umum pada ZnO, dan konduktivitas material semikonduktor tipe-n utamanya berasal dari cacat tersebut. Adapun penyisipan (*interstitial*) ion oksigen yang juga

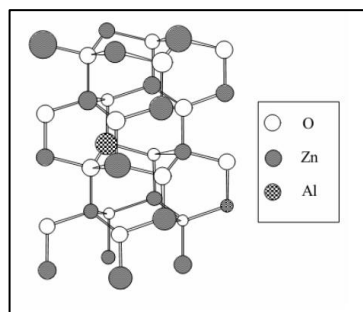
merupakan cacat pada ZnO, dimana cacat tersebut terjadi pada material semikonduktor tipe-p (Jiao, 2017). Struktur ini adalah kisi heksagonal dan dikarakterisasikan dengan kisi yang saling berhubungan yakni kisi Zn^{2+} dan O^{2-} , dimana masing-masing ion Zn dikelilingi oleh empat ion O, atau sebaliknya. Struktur kristal dan ukuran butir partikel pada *thin film* ZnO sangat mempengaruhi sifat optik dan elektriknya. Pada dasarnya orientasi dari nanokristal yang membentuk *thin film* sangat bergantung pada jenis substrat yang digunakan, hal ini berkaitan dengan energi permukaan yang terbentuk antara substrat dan lapisan yang ditumbuhkan. Penggunaan substrat yang memiliki ketidaksesuaian kisi yang kecil, akan mempermudah pembentukan kristal menjadi lebih teratur dan seragam (Jiao, 2017).

2.4.2 Doping Semikonduktor

Penambahan dopan ke dalam bahan semikonduktor disebut doping. Pengaruh konsentrasi doping dapat meningkatkan kualitas *thin film*. Tujuan pendopongan adalah untuk mengoptimalkan sifat dari suatu material. Konduktivitas ZnO dapat ditingkatkan dengan penambahan doping berupa logam seperti galium, indium, stronsium, magnesium, aluminium dan boron sebagai benda asing yang dimasukkan ke dalam struktur ZnO (Yun *et al*, 2010; Yamamoto *et al*, 2001). Ketika semikonduktor didoping dengan impuritas maka semikonduktor menjadi ekstrinsik. Berdasarkan jenis pembawa muatan mayoritas dan minoritasnya, semikonduktor ekstrinsik dibedakan menjadi semikonduktor tipe-n dan tipe-p. Secara alamiah, ZnO tanpa doping adalah semikonduktor tipe-n. Konduksi ZnO tipe-n dapat ditingkatkan dengan dua metode pendopongan yaitu: (i) menciptakan donor intrinsik seperti penyisipan Zn dan (ii) menggunakan dopan ekstrinsik (Dengyuan, 2005). Film yang didoping dengan metode pertama memiliki sifat listrik yang tidak stabil dikarenakan film yang kekurangan oksigen mengalami reoksidasi. Doping ekstrinsik pada ZnO diperoleh dengan cara

substitusi kation atau anion. Kelebihan pendopingan secara ekstrinsik adalah sifat listrik dan optik lapisan relatif stabil. Tipikal dopan yang banyak digunakan untuk meningkatkan konduktivitas film ZnO adalah atom-atom trivalen (atom yang memiliki tiga elektron valensi) seperti unsur-unsur golongan III A (Al, In, Ga) melalui substitusi kation.

Aluminium adalah salah satu dopan yang paling cukup banyak digunakan karena menghasilkan film ZnO dengan konduktivitas tertinggi. Peningkatan konduktivitas yang ditimbulkan doping aluminium disebabkan oleh peningkatan konsentrasi muatan pembawa bebas karena aluminium memiliki satu elektron valensi lebih banyak dari pada seng (González et al., 1998). Logam Aluminium merupakan unsur yang paling baik digunakan sebagai doping dibanding Boron (B), Galium (Ga), Indium (In) (Kuo, *et al.*, 2006) didasarkan pada mobilitas elektron yang paling tinggi, dan memberikan pembawa muatan level yang tinggi. ZnO doping Al sangat berpotensi untuk diaplikasikan sebagai TCO. Selain karena konduktivitas dan transparansinya tinggi. Al berkontribusi terhadap lebar band gap ZnO dikarenakan bertambahnya konsentrasi pembawa muatan yang dikenal sebagai efek Burstein-Moss (Suchea, *et al.*, 2007). Gambar 2.5 memperlihatkan struktur kristal ZnO dengan doping atom Aluminium.



Gambar 2.5 Struktur Kristal ZnO dengan Doping Aluminium (Dengyuan, 2005)

Berdasarkan Gambar 2.5 menunjukkan bahwa pada ZnO yang didoping Al, sebuah kisi yang seharusnya ditempati atom Zn digantikan oleh atom Al (atom donor). Hal itu berdasarkan pada beda keelektronegatifan antara Al (1,61) dan Zn (1,65) sangat kecil dan jari-jari ionik Al (0,530 Å) lebih kecil dibanding jari-jari ionik Zn (0,600 Å), penambahan Al pada ZnO.

ZnO juga merupakan semikonduktor yang asimetris dalam pendopongan yaitu mudah dibuat menjadi semikonduktor tipe-n tetapi sukar dibuat menjadi semikonduktor tipe-p. Sulitnya ZnO memiliki konduksi tipe-p disebabkan oleh dua sebab yaitu: (1) impuritas yang menghasilkan akseptor dangkal (*shallow acceptor*) pada satu titik kisi dapat berlaku sebagai donor ketika berada pada titik kisi yang lain atau ketika berada pada interstisial dan (2) akseptor memiliki kecenderungan untuk berpasangan dengan Zn interstisial membentuk *complex* yang secara kelistrikan tidak aktif (Dengyuan, 2005).

Diantara dopan tipe-p unsur golongan VA adalah yang dianggap paling menjanjikan dan yang dianggap akseptor yang terbaik adalah nitrogen (N) karena nitrogen memiliki ukuran ion yang hampir sama dengan oksigen (Jagadish & Stephen Pearton, 2006). Akan tetapi, doping tunggal dengan nitrogen memiliki solubilitas yang rendah dan jumlah *hole* yang dihasilkan diragukan dapat mengimbangi jumlah elektron bebas sehingga diperoleh ZnO tipe-p. Selain memiliki pengaruh terhadap sifat listrik oksida konduktif transparan, pendopongan juga memiliki pengaruh terhadap sifat optiknya. Pada ZnO pembawa muatan bebas tersebut adalah elektron. Peningkatan konsentrasi elektron juga dapat memperbesar lebar energi *bandgap* semikonduktor. Itu dikarenakan tingkat terendah pada pita konduksi ditempati oleh elektron eksitasi dari tingkat donor terendah, sehingga sesuai dengan prinsip larangan Pauli tidak terjadi absorpsi cahaya untuk bereksitasi ke tingkat keadaan ini. Efek pelebaran celah pita energi ini disebut efek *Burstein Moss* (Dengyuan, 2005).

2.5 Sensor Gas

Sensor gas merupakan suatu alat yang mampu mendeteksi perubahan kondisi lingkungan dengan menghasilkan sinyal listrik yang besarnya sebanding dengan konsentrasi dan jenis gas. Sensor gas dipilih berdasarkan persyaratan aplikasi spesifik, seperti rentang temperatur kerja, sensitivitas, dan selektivitas. Pemilihan sensor juga harus didasarkan pada kelebihan dan kekurangan dari sensor tertentu, dapat dilihat pada Tabel 2.5.

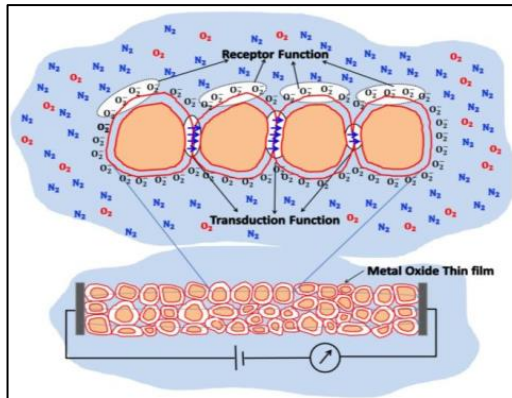
Tabel 2. 5 Kelebihan dan Kekurangan dari Beberapa Jenis Sensor Gas yang Paling Umum (Alphus D. Wilson, 2009)

Tipe Sensor	Kelebihan	Kekurangan
Kalorimetrik	Selektivitas tinggi untuk senyawa oksida, t_R rendah	Temperatur operasi tinggi, hanya sensitif terhadap senyawa oksida
<i>Catalytic field-effect transistor</i>	Stabilitas, rentang temperatur operasi lebar, ukuran kecil	Membutuhkan kontrol lingkungan
Elektrokimia	Temperatur operasi lingkungan, kebutuhan daya rendah, sensitif terhadap berbagai macam VOCs	<i>Bulky size</i> , sensitivitas terbatas terhadap <i>low weight</i> gas
Oksida logam semikonduktor	Sensitivitas tinggi, <i>range limited</i> sensing range, t_R rendah untuk gas rendah	Temperatur operasi tinggi, daya tinggi, sensitif terhadap kelembababan
Optik	Sensitivitas dan selektivitas tinggi	Mahal, probabilitas rendah, <i>complex sensor array system</i>

Sebagai contoh, sensor gas elektrokimia dapat bekerja pada suhu sekitar dan membutuhkan daya rendah. Namun, sensitivitasnya terhadap gas berbobot rendah rendah. Sensor gas optik memiliki sensitivitas dan selektivitas tinggi. Namun, mereka mahal dan seringkali tidak portabel (Alphus D. Wilson, 2009).

2.6 Sensor Gas Semikonduktor

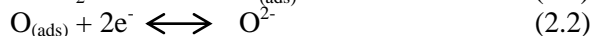
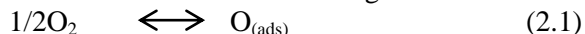
Diantara semua jenis sensor gas, sensor gas *Metal Oxide Semiconductor* (MOS), juga disebut sensor gas *chemoresistive* oksida logam, mungkin merupakan jenis yang paling menarik karena biayanya yang murah, stabilitas tinggi, dan integrasi yang mudah dengan elektronik. Untuk gas, digolongkan menjadi gas pengoksidasi dan gas pereduksi, sedangkan untuk material sensor dapat diklasifikasikan menjadi material tipe-p atau tipe-n sesuai dengan respon sinyalnya. Sensor gas oksida logam bekerja berdasarkan prinsip *chemiresistance* yaitu perubahan konduktivitas listrik atau resistivitas *thin film* terhadap paparan gas target. Dengan kata lain, molekul gas yang berinteraksi dengan oksida logam dapat bertindak sebagai donor atau akseptor pembawa muatan (*Receptor Function*), dan mengubah resistivitas oksida logam (*Transduction Function*) dan ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Skema Sensor Gas *Thin Film* (Shankar, et al., 2015).

Berdasarkan Gambar 2.6 kenaikan atau penurunan resistensi film tipis oksida logam tergantung pada jenis pembawa mayoritas dalam film semikonduktor dan sifat molekul gas (baik pengoksidasi atau pereduksi) di atmosfer sekitar. Untuk material tipe-n, ketika bereaksi dengan gas pengoksidasi akan meningkatkan nilai resistansi *thin film*, dan menurunkan nilai resistansi *thin film* ketika bereaksi dengan gas pereduksi, dan sebaliknya untuk material tipe-p (Shankar, et al., 2015).

Permukaan semikonduktor oksida logam akan berinteraksi dengan molekul-molekul oksigen yang terdapat di udara pada temperatur kamar. Proses ini meliputi penyerapan fisika, yang kemudian diikuti penyerapan kimia dengan menangkap elektron dari daerah dekat permukaan semikonduktor. Proses serapan oksigen dan penangkapan elektron disajikan pada Gambar 2.6 dan dapat ditulis dalam Persamaan 2.1 dan 2.2 sebagai berikut.



Proses oksidasi oleh molekul oksigen pada Persamaan 2.1 dan 2.2, dengan mengambil elektron dan terikatnya ion oksigen pada permukaan lapisan tipis dapat dipandang sebagai proses

pembentukan cacat (*defect*) permukaan, yaitu terjadinya interstisi atom oksigen ke dalam kisi kristal semikonduktor oksida. Hasil dari interstisi ini akan menghasilkan *hole* yang jumlahnya sesuai dengan tingkat ionisasi atom oksigen. Terbentuknya *hole* pada permukaan lapisan tipis adalah sebanding dengan penangkapan elektron. Atom oksigen yang teradsorpsi pada permukaan dapat menarik elektron dari dalam *bulk* jika temperatur dinaikkan hingga mencapai kesetimbangan termodinamik. Atom-atom oksigen yang teradsorpsi akan mengikat elektron bebas pada permukaan bahan semikonduktor oksida logam. Pengikatan elektron bebas menyebabkan terbentuknya lapisan deplesi (daerah kosong muatan bebas) pada daerah antara gas dan butir kristal.

Pembentukan lapisan deplesi (*depletion layer*) disertai pula dengan pembentukan potensial penghalang (*potensial barrier*) di daerah batas butiran. Pembentukan lapisan deplesi dan potensial penghalang akan menentukan sifat kelistrikan semikonduktor oksida logam. Semua oksida logam yang digunakan dalam sensor gas *metal oxide semiconductor* (MOS) dapat dibagi menjadi tipe-n atau tipe-p tergantung pada tipe pembawa muatannya. Oksida logam tipe-n yang khas adalah SnO_2 , ZnO , TiO_2 , WO_3 , In_2O_3 , dan Fe_2O_3 , sedangkan oksida logam tipe-p yang khas adalah CuO , NiO , Co_3O_4 , dan Cr_2O_3 . ZnO biasanya sensitif terhadap NO_2 dan $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, sedangkan CuO sering sensitif terhadap H_2S (Shankar, *et al.*, 2015).

2.7 Sensitivitas Sensor Gas

Sensitivitas sensor gas didefinisikan sebagai kemampuan dari sensor untuk merespon atau mendeteksi kehadiran sejumlah gas yang datang mengenai sensor. Respon ini ditunjukkan dengan perubahan resistivitas akibat terserapnya gas pada permukaan elemen sensitif. Sensitivitas sensor gas dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.3. Nilai nisbah serapan (S) didefinisikan sebagai perbandingan antara besar perubahan resistansi sensor pada saat diberi gas (R_g) dan resistansi sensor

sebelum diberi gas (R_n), dapat dituliskan dalam bentuk untuk semikonduktor bertipe n, sebagai berikut.

$$S = \frac{\Delta R}{R_n} \times 100\% = \left| \frac{R_g - R_n}{R_n} \right| \times 100\% \quad (2.3)$$

Dimana

S = Sensitivitas (%)

R_g = Resistansi saat tabung diberi gas uji (Ω)

R_n = Resistansi dalam kondisi normal/tanpa gas (Ω)

Pengukuran kedua resistansi dilakukan pada suhu operasi yang sama (Sayono, *et al.*, 2008) .

2.8 Sulfur Dioksida (SO_2)

Sulfur dioksida (SO_2) adalah jenis gas pereduksi. Gas pereduksi bertindak sebagai donor elektron ketika berinteraksi dengan permukaan oksida logam. Selama berinteraksi dengan permukaan oksida logam, gas pereduksi mengeluarkan oksigen yang diserap secara kimia dari permukaan oksida logam. Sulfur dioksida adalah salah satu gas paling beracun yang membuat lapisan logam tidak kuat berikatan dengan pasangan elektronnya. Biasanya NO_2 , SO_2 bereaksi dengan molekul air untuk membentuk asam di atmosfer (Shankar, *et al.*, 2015).

Sulfur dioksida (SO_2) adalah komponen pencemar udara dengan jumlah paling banyak. Gas ini memiliki karakteristik tidak berwarna dan berbau tajam, apabila bereaksi dengan uap air di udara akan menjadi H_2SO_4 (Suyono, 2014). Sumber utama antropogenik SO_2 adalah penggunaan batubara dan minyak bumi sebagai sumber energi. Batubara yang mengandung sulfur dan kualitas batubara ditentukan oleh kandungan sulfur, batubara sulfur rendah (<1% S), sulfur sedang (1- <3% S) dan sulfur tinggi ($\geq 3\%$ S) dalam bentuk pirit (FeS_2) dan sulfur organik. Pembakaran pirit membentuk SO_2 dan hanya sebagian kecil (1-2%) membentuk SO_3 (widyamaa, *et al.*, 2015). Tingkat bahaya paparan gas SO_2 terhadap manusia dengan kadar tertentu dapat dilihat pada Tabel 2.6.

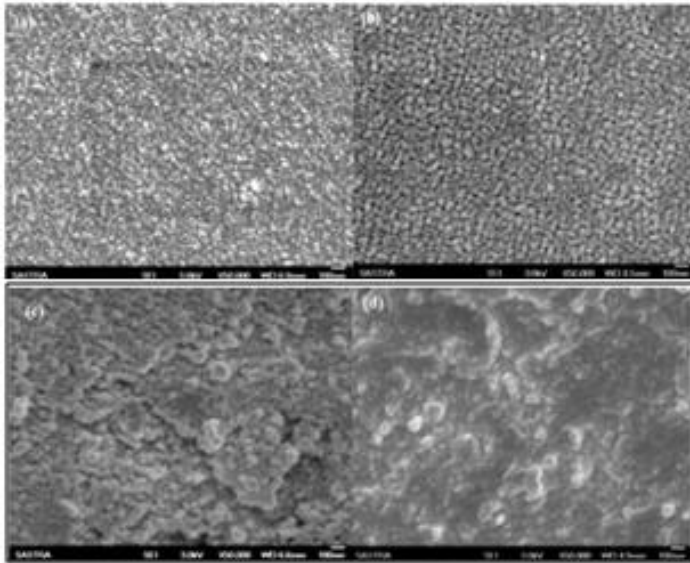
Tabel 2. 6 Dampak Gas SO₂ terhadap Manusia
(Kristanto, 2002)

Kadar (ppm)	Dampaknya terhadap manusia
3-5	Jumlah minimum yang dapat dideteksi baunya
8-12	Jumlah minimum yang segera mengakibatkan iritasi tenggorokan
20	<ul style="list-style-type: none">- Jumlah minimum yang mengakibatkan iritasi pada mata- Dapat menyebabkan batuk- Jumlah maksimum yang diperbolehkan untuk paparan yang lama
50-100	Jumlah maksimum yang diperbolehkan untuk paparan yang singkat (\pm 30 menit)
400-500	Sudah berbahaya walaupun dalam paparan singkat

Menurut *American Conference Of Governmental Industrial Hygienists*, nilai ambang batas (TLV-TWA / *Threshold Limit Value-Time Weighted Average*) SO₂ adalah 5 ppm, yang didefinisikan sebagai konsentrasi rata-rata yang diperkenankan untuk paparan selama 8 jam sehari atau 40 jam seminggu. Pekerja dapat terpapar secara berulang tanpa menimbulkan gangguan kesehatan pada konsentrasi 5 ppm (*Occupational Exposure Limit for Chemical Substances*). Sedangkan nilai ambang batas yang merekomendasikan bahwa pekerja tidak boleh terpapar SO₂ untuk jangka waktu maksimal 15 menit adalah bila emisi melebihi 10 ppm atau yang disebut dengan TLV-STEL (*Threshold Limit Value – Short Term Exposure Limit*) (Ristiana, 2013).

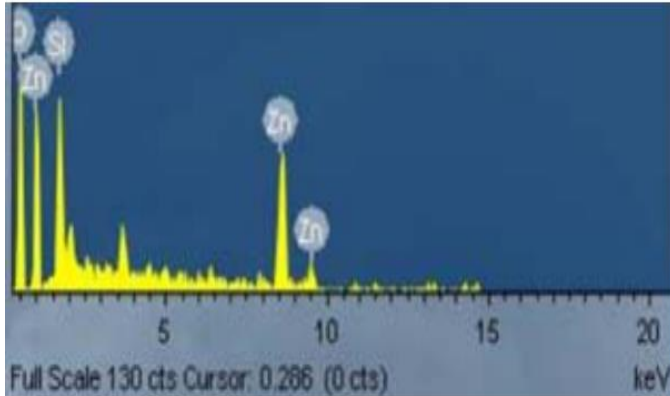
2.9 Penelitian Sebelumnya

Durgajanani, *et al.* (2011), telah melakukan penelitian proses deposisi *spray pyrolysis* dengan memvariasikan konsentrasi prekursor ZnO untuk mengetahui pengaruhnya terhadap sifat struktural, morfologi, dan listrik dari film tipis ZnO. Pada penelitian ini material substrat yang digunakan adalah kaca, prekursor yang digunakan adalah Zinc acetate dihydrate (99.9%, Merck). Pada proses pendeposisian dilakukan pada temperatur 503 K, sudut *nozzle* terhadap substrat 60° , dan *carrier gas* adalah udara bertekanan. Berdasarkan hasil karakterisasi SEM menunjukkan dengan meningkatnya konsentrasi prekursor menyebabkan peningkatan ukuran butir dan butirannya padat dengan morfologi bola seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2. 7 SEM *Micrograph* Lapisan Zno pada Berbagai Konsentrasi Larutan Prekursor (a) 0,03 M (b) 0,05 M (c) 0,07 M Tinggi (d) 0,1 M (Durgajanani, *et al.*, 2011)

Kehadiran elemen Zn dan O dikonfirmasi dengan spektrum EDAX dapat dilihat pada Gambar 2.8. Kehadiran puncak Si adalah karena substrat kaca. Tidak adanya elemen-elemen lain menegaskan puncak kemurnian film ZnO bersalut semprotan berstruktur.

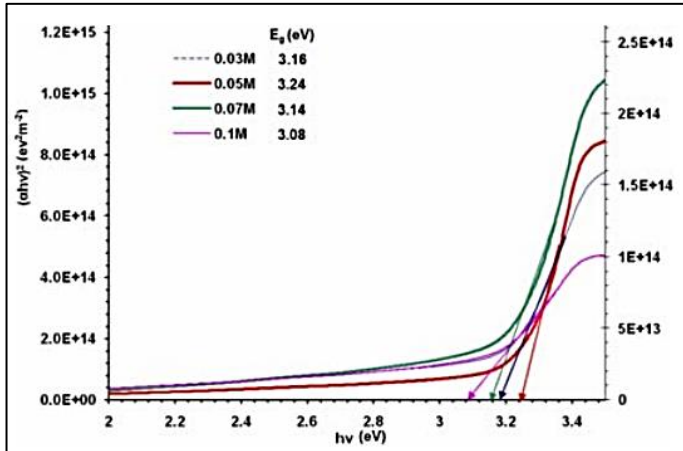


Gambar 2. 8 EDS Lapisan ZnO pada Temperatur 503 K dengan Konsentrasi 0,05 M (Durgajanani, *et al.*, 2011)

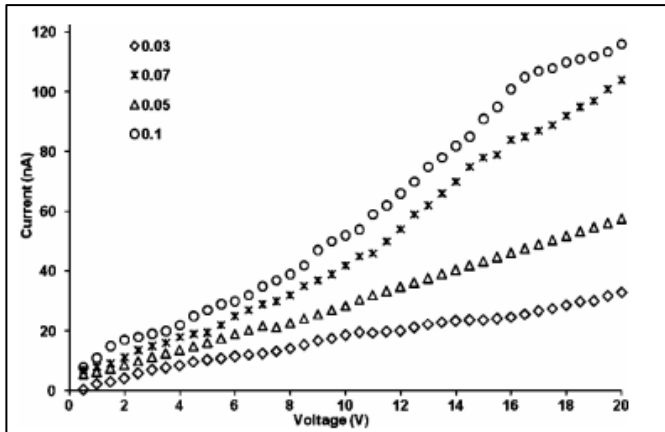
Hasil karakteristik penyerapan optik berdasarkan Gambar 2.9 menunjukkan bahwa energi *bandgap* (E_g) berkurang dengan meningkatnya konsentrasi prekursor kecuali untuk film yang diperoleh dari 0,03 M. Penurunan E_g dapat dikaitkan dengan peningkatan ketebalan lapisan. Ketidakcocokan dalam tren di 0,03 M mungkin kemungkinan cacat struktural dalam film yang timbul selama preparasi, yang dapat menimbulkan keadaan yang diinginkan di dekat pita konduksi pada energi *bandgap* yang mengarah ke penurunan.

Hasil Karakterisasi listrik ditunjukkan oleh Gambar 2.10 bahwa konduktivitas tipe-n untuk semua lapisan. Pengukuran I-V film tipis ZnO dilakukan di atmosfer udara pada suhu kamar dan dalam gelap. Lapisan pada empat konsentrasi prekursor yang berbeda, konduktivitas meningkat dengan meningkatnya konsentrasi ZnO. Diketahui bahwa konduktivitas tipe-n di ZnO

disebabkan oleh kekosongan oksigen dan atom seng interstitial, keduanya bertindak sebagai donor. Pada penelitian ini dapat disimpulkan bahwa konsentrasi prekursor mempengaruhi sifat struktural, morfologi dan sifat optik pada lapisan tipis ZnO.



Gambar 2. 9 Plot Energi Foton ($h\nu$) vs $(\alpha h\nu)^2$ pada Lapisan ZnO pada Konsentrasi Larutan yang Berbeda (Durgajani, *et al.*, 2011)



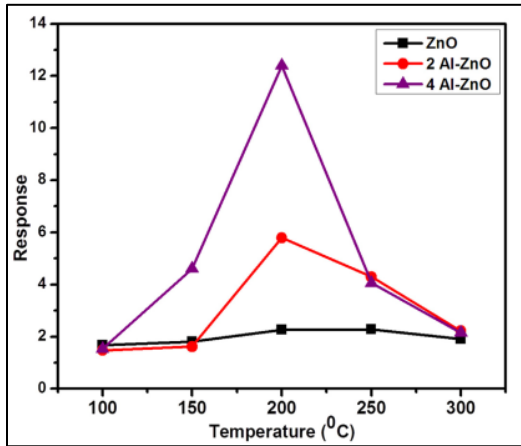
Gambar 2. 10 Karakteristik I-V dari Lapisan Tipis ZnO dari Berbagai Konsentrasi Prekursor (Durgajanani, *et al.*, 2011)

Kohle, *et al.* (2018) telah melakukan penelitian proses deposisi film tipis ZnO dan pengaruh penambahan doping Al (0,002M dan 0,004M AlCl_3) dengan metode *spray pyrolysis* untuk mendeteksi keberadaan H_2S . Pada penelitian ini material substrat yang digunakan adalah kaca, prekursor yang digunakan $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0,1 M yang dilarutkan dalam aquades, dan dilakukan penambahan doping aluminium 0,002M dan 0,004M $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Proses pendeposisian dilakukan pada temperatur substrat 400°C dengan kecepatan aliran larutan 4 ml/menit dan digunakan 50 ml larutan selama proses deposisi menggunakan udara bertekanan. Adapun hal yang dianalisis pada penelitian ini adalah pengaruh konsentrasi doping Al terhadap respon dan temperatur operasi sensor gas untuk mendeteksi gas H_2S .

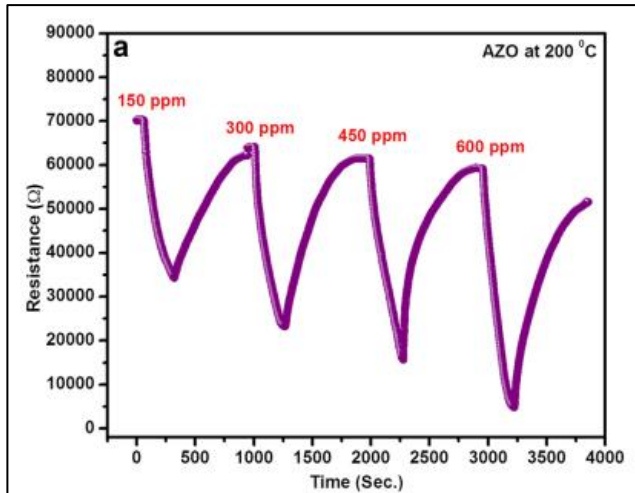
Berdasarkan hasil karakterisasi dari respon sensor dari sensor ZnO yang tidak didoping dan didoping Al yang diukur untuk jumlah konsentrasi H_2S yang tetap (600 ppm) dengan temperatur uji $100\text{-}300^\circ\text{C}$ seperti pada Gambar 2.11 menunjukkan bahwa doping Al pada ZnO meningkatkan respon dari sensor ZnO

dimana pada temperatur 200°C dihasilkan respon yang tinggi, dan respon tertinggi merupakan ZnO yang telah didoping 0,004M Al.

Ketika sensor ZnO didoping 0,004M Al diuji pada temperatur 200°C dengan konsentrasi H₂S 150, 300, 450, dan 600 ppm seperti pada Gambar 2.12 menunjukkan bahwa sensor memiliki stabilitas yang baik atas uji siklik. Pada penelitian ini dapat disimpulkan bahwa doping Al pada ZnO menghasilkan penurunan temperatur kerja optimal dari sensor gas ZnO.



Gambar 2. 11 Kurva Respon Sensor ZnO Tanpa Doping dan Doping Al pada Temperatur 100-300°C dengan konsentrasi H₂S 600 ppm (Kohle, *et al*, 2018)



Gambar 2. 12 Respon Dinamika Transien Sensor 4Al-ZnO terhadap Perbedaan Konsentrasi Gas H₂S pada Temperatur 200°C (Kohle, *et al.*, 2018)

Mahmoud, *et al.* (2009), telah melakukan penelitian proses pendeposisian lapisan tipis ZnO dengan metode *ultrasonic spray pyrolysis* pada substrat corning glass 1737 dan menggunakan zinc acetate sebagai prekursor. *Zinc acetate* dilarutkan pada metanol+air. Pendeposisian lapisan tipis pada penelitian ini dengan memvariasikan temperatur deposisi yaitu 350°C hingga 400°C untuk menganalisis pengaruh temperatur substrat pada karakteristik lapisan tipis. Waktu *spray* selama 40 menit dan carrier gas yang digunakan gas N₂ bertekanan. Berdasarkan hasil karakterisasi menunjukkan bahwa dengan menurunnya temperatur deposisi menghasilkan semakin meningkatnya ketebalan lapisan tipis (*growth rate*). Sedangkan penurunan *growth rate* terjadi akibat efisiensi deposisi, yang dihasilkan dari pengurangan transfer massa pada substrat, dan karena *droplet* prekursor yang didorong oleh gas terjadi pada temperatur deposisi yang lebih rendah yang ditunjukkan dalam Tabel 2.7.

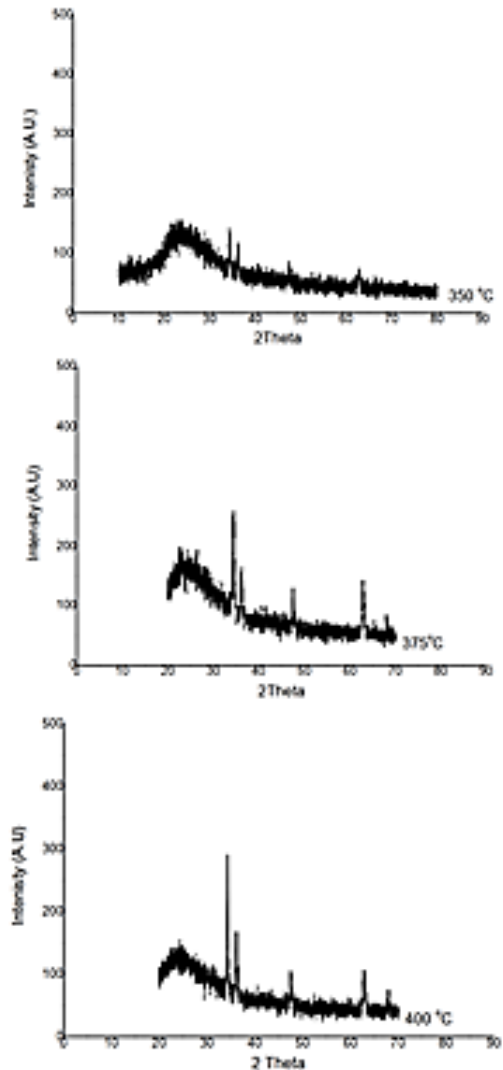
Tabel 2. 7 Variasi Ketebalan Lapisan Tipis dengan Temperatur Deposisi (Mahmoud & G.Kiriakidis, 2009)

Temperatur (°C)	Ketebalan (nm)
350	320
375	250
400	235

Berdasarkan hasil karakterisasi XRD terjadi perbedaan ukuran kristal pada variasi temperatur deposisi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.8 dan Gambar 2.13.

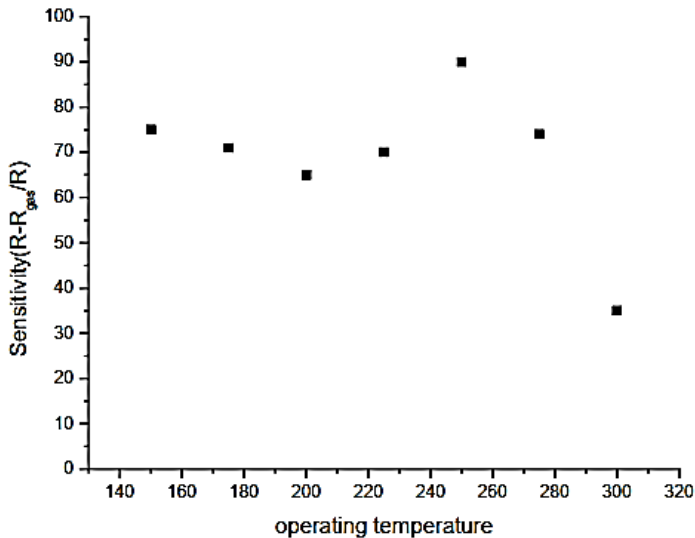
Tabel 2. 8 Hasil Ukuran Kristal
(Mahmoud & G.Kiriakidis, 2009)

Temperatur (°C)	Kristalinitas (Å)
350	150
375	162
400	186



Gambar 2. 13 Pola XRD pada Proses Deposisi Lapisan Tipis terhadap Perbedaan Temperatur Substrat (Mahmoud & G.Kiriakidis, 2009)

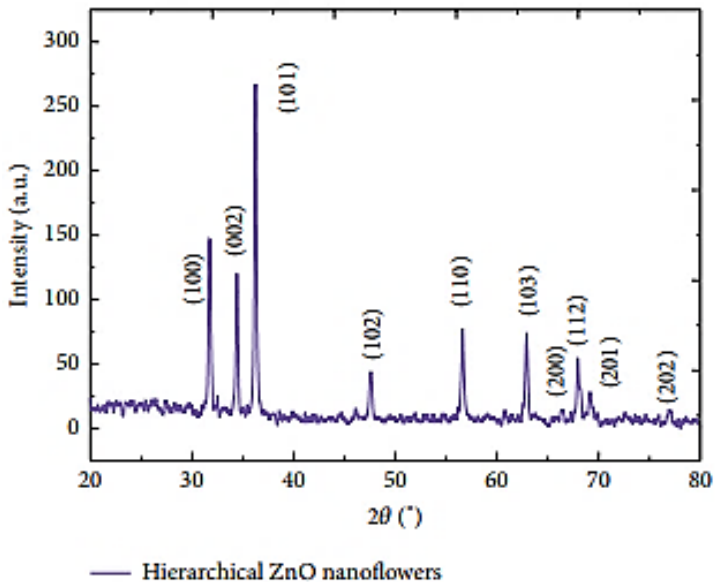
Respon *thin film* ZnO pada saat dioperasikan pada temperatur operasi berbeda menghasilkan respon yang berbeda pula seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.14.



Gambar 2. 14 Sensitivitas ZnO (Temperatur Substrat 400°C) terhadap Perbedaan Temperatur Operasi Gas CH₄ (Mahmoud & G.Kiriakidis, 2009)

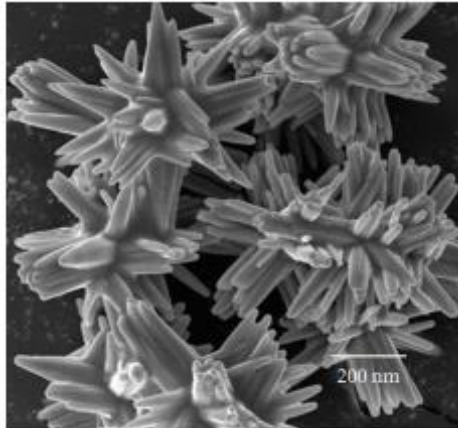
Berdasarkan Gambar 2.14, sensor menghasilkan sensitivitas tertinggi pada temperatur operasi 250°C dan setelah itu kemampuan sensor menurun ketika temperatur dinaikan sehingga dapat dikatakan bahwa sensor berbasis ZnO tersebut dapat bekerja pada temperatur 250°C sebagai temperatur optimum .

Zhou, *et al.*(2016), telah melakukan penelitian sintesis tstruktur nano ZnO berbentuk bunga hierarkis dengan metode hidrotermal yang sederhana untuk aplikasi sensor gas SO₂. Bahan yang digunakan pada penelitian ini antara lain seng nitrat heksahidrat Zn(NO₃)₂·6H₂O, NH₄OH, CTAB, etanol absolut dan air suling kemudian dicampur dsengan pengadukan magnetik intens, yang kemudian dipindahkan ke autoclave Teflon, disegel, dan dipanaskan pada 160°C selama 24 jam dalam tungku listrik. Hasil dari pengujian XRD seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.15, peak yang dominan di 2θ = 31,7; 34,4; dan 36,2° dengan masing orientasi (100), (002), dan (101) dari wurtzite ZnO heksagonal, Tidak ada puncak difraksi lain dari kotoran yang terdeteksi, menunjukkan kemurnian tinggi sampel yang disiapkan.



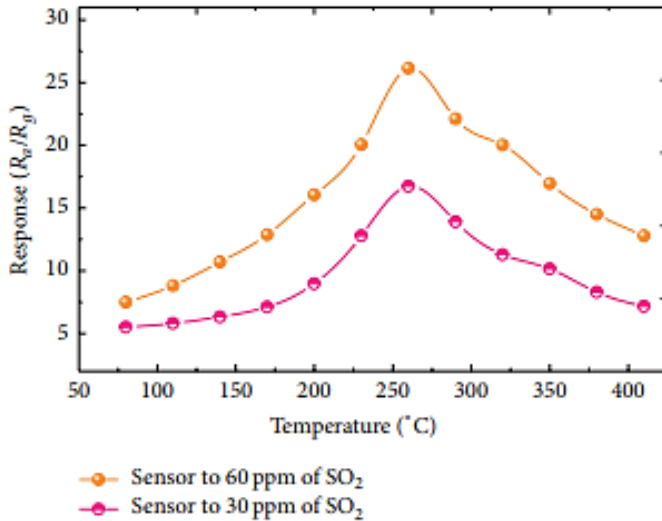
Gambar 2.15 Pola XRD *Hierarchical ZnO Nanoflowers*
(Zhou, *et al.*, 2016)

Hasil pengujian EDS dari struktur nano ZnO yang disintesis yaitu hanya terdapat puncak elemen Zn dan O yang diamati, yang mengkonfirmasi ketersediaan Zn dan O dalam sampel yang disintesis. Struktur nano ZnO hierarkis berbentuk bunga, yang terdiri dari sejumlah besar nanorod seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.16. Nanorod ini berbentuk persegi panjang dengan keseragaman bentuk dan ukuran yang tinggi. Tidak ada morfologi lain yang terdeteksi, menunjukkan hasil tinggi nanostruktur ZnO seperti bunga.



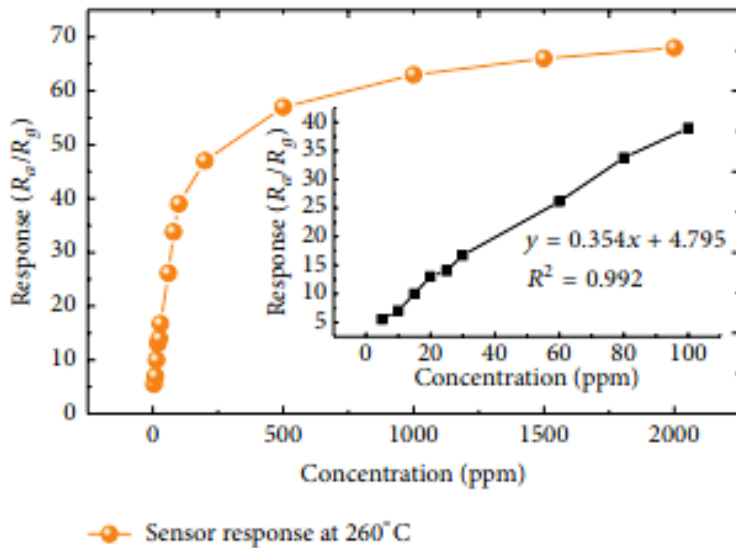
Gambar 2.16 Morfologi *Hierarchical ZnO Nanoflowers* (Zhou, *et al*, 2016)

Gambar 2.17 menunjukkan bahwa respon gas dari sensor fabrikasi yang diuji dengan konsentrasi gas uji SO_2 30 ppm dan 60 ppm pada berbagai temperatur kerja menghasilkan respon sensor meningkat dengan cepat dan mencapai nilai maksimum dan kemudian menurun dengan cepat seiring dengan meningkatnya temperatur. Temperatur operasi optimal dari sensor nanoflower ZnO hierarki buatan untuk gas SO_2 diukur pada 260°C , di mana sensor menunjukkan respons gas maksimum.



Gambar 2.17 Respon *Hierarchical ZnO Nanoflowers* dengan 30 ppm dan 60 ppm Gas SO₂ pada Berbagai Temperatur Kerja (Zhou, *et al*, 2016)

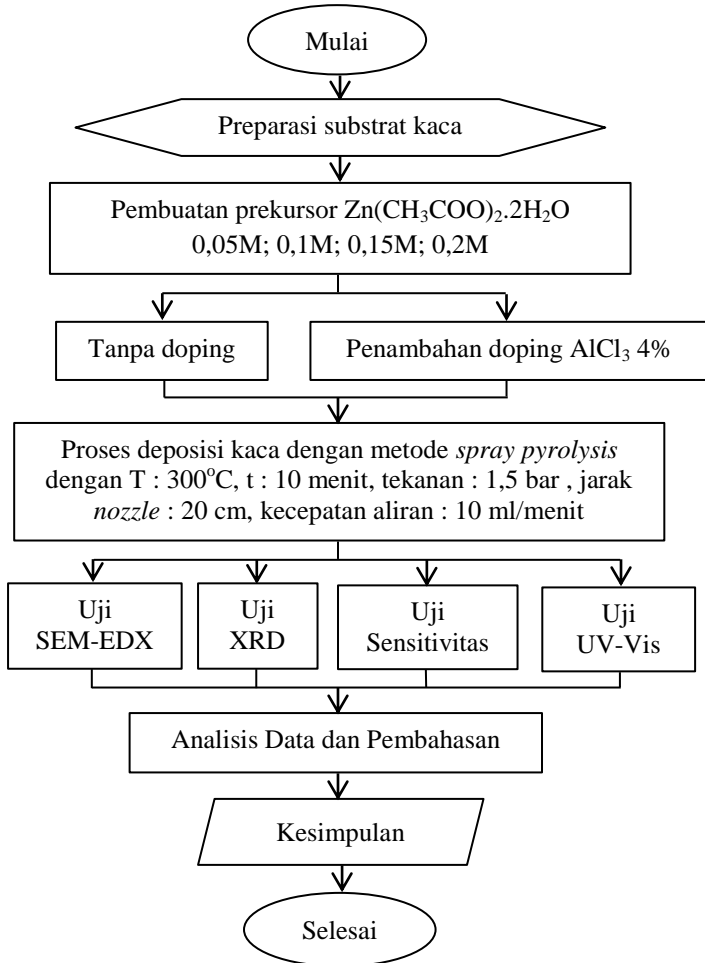
Gambar 2.18 menunjukkan respons gas dari sensor sebagai fungsi konsentrasi gas SO₂ dalam kisaran 5~2000 ppm, di mana sensor bekerja pada temperatur operasi optimal yaitu 260°C. Dapat dilihat bahwa respon sensor terhadap gas SO₂ meningkat pesat seiring dengan meningkatnya konsentrasi gas dalam kisaran 5-100 ppm dan mencapai saturasi ketika terpapar lebih dari 2000 ppm. Nilai respon gas jenuh sensor untuk SO₂



Gambar 2.18 Respon *Hierarchical ZnO Nanoflowers* dengan Temperatur Operasi Optimum pada Berbagai Konsentrasi Gas SO_2 (Zhou, *et al*, 2016)

BAB III METODOLOGI

3.1 Diagram Alir



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Metode Perancangan

Metode yang dilakukan pada perancangan ini antara lain :

1. Studi Literatur
Metode ini mengacu pada buku-buku, jurnal-jurnal terbaru, informasi dan penelitian mengenai sensor gas *Metal Oxide Semiconductor* (MOS) dan metode deposisi *spray pyrolysis*.
2. Diskusi
Tahapan ini dilakukan untuk menambah wawasan tambahan agar penulis dapat lebih memahami tentang masalah dan solusi penelitian yang dilakukan. Diskusi dilakukan dengan dosen pembimbing penelitian.
3. Eksperimental
Metode ini dilakukan dengan pengujian langsung sesuai dengan prosedur dan metode yang ada. Adapun pengujian yang diperlukan dalam eksperimen ini adalah: uji SEM, XRD, sensitivitas, dan *UV-visible*.

3.3 Prosedur Penelitian

Penelitian ini akan dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut :

1. Preparasi Substrat
Substrat yang digunakan adalah kaca borosilikat. Karakteristik kaca borosilikat dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Komposisi Kimia Kaca Borosilikat
(Hasanizzaman, *et al.* 2016).

Komposisi	Kadar (%)
SiO ₂	70-80
B ₂ O ₃	7-13
Na ₂ O	4-8
Al ₂ O ₃	2-8

Substrat kaca borosilikat yang berukuran 25 x 75 x 2 mm dibersihkan dengan aseton selama 30 menit menggunakan

ultrasonic cleaner untuk membersihkan kotoran yang menempel pada kaca seperti minyak, oli, dan lain sebagainya. Setelah itu, mengeringkan substrat.

2. Pembuatan film tipis ZnO:Al

Pembuatan larutan prekursor $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Merck, 99,5%) 0,05M; 0,1M; 0,15M; 0,2M dengan menimbang bubuk *zinc acetate dihydrate* sebanyak 1,09745 gram, 2,1949 gram, 3,29235 gram, dan 4,3898 gram dengan menggunakan timbangan digital, kemudian *zinc acetate* tersebut dimasukkan ke dalam *beaker glass* berbeda. Setelah itu, 100 ml metanol ditambahkan ke dalam masing-masing beaker glass. Kemudian dopan Al ditambahkan dengan kadar AlCl_3 (Merck, 99%) sebesar 0% dan 4% ke masing-masing wadah yang telah berisi *zinc acetate*. Kemudian dilakukan pencampuran dan pengadukan dengan magnetic stirrer selama 1 jam pada temperatur ruang. Setelah itu, campuran tersebut dimasukkan ke dalam botol lab pada rangkaian alat *spray pyrolysis*.

3. Pendeposisian ZnO:Al pada substrat

Peletakan substrat yang telah dibersihkan dengan menggunakan pinset pada *hot plate* yang telah diatur temperaturnya sebesar 300°C , substrat didiamkan 10 menit pada *hot plate* tersebut, kemudian mengatur tekanan udara pada kompresor sebesar 1,5 bar, mengatur jarak antara *nozzle* dengan permukaan substrat sejauh 20 cm, kecepatan aliran prekursor 10 ml/menit. Setelah itu, aktifkan tombol knop pada kompresor untuk mengalirkan prekursor ke *nozzle* droplet-droplet akan keluar dari *nozzle*. Proses deposisi dengan metode *spray pyrolysis* akan dilakukan selama 10 menit, rangkaian alat kerja *spray pyrolysis* dapat dilihat pada Gambar 3.2, dengan parameter konstan yang digunakan dalam penelitian ditunjukkan pada Tabel 3.2.



Gambar 3. 2 Rangkaian Alat Kerja *Spray Pyrolysis*

Tabel 3. 2 Parameter Konstan pada Penelitian *Spray Pyrolysis*

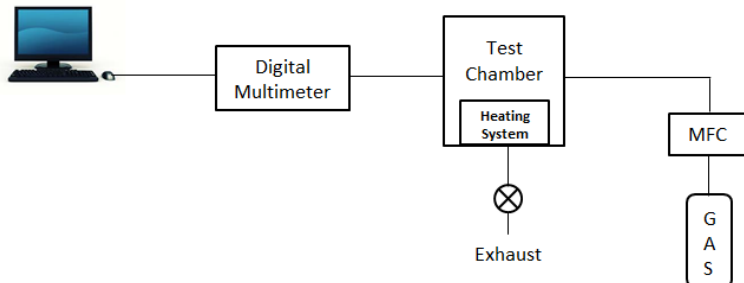
Parameter Spray	
Parameter konstan	Nilai
Material nozzle	Stainless steel
Diameter nozzle (mm)	0,016
Temperatur substrat (°C)	300
Jarak antara nozzle dengan substrat (cm)	20
Kecepatan spray (ml/menit)	10
Gas pembawa	Udara bertekanan
Waktu deposisi (menit)	10
Tekanan gas (bar)	1,5

3.4 Proses Pengujian

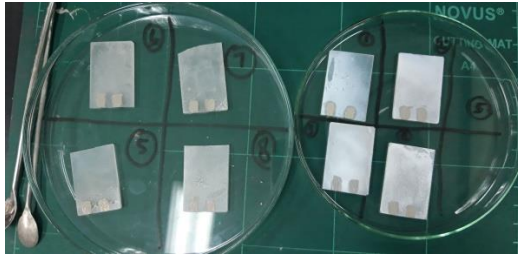
Pada penelitian ini akan dilakukan beberapa pengujian untuk mendapatkan data yang sesuai dengan tujuan penelitian. Pengujian yang dilakukan mencakup empat pengujian, yaitu :

1. Sensitivitas sensor gas

Pengukuran sensitivitas dengan menggunakan potensiostat. Pengujian ini akan dilakukan pada sebuah *chamber* (ruang) dengan tekanan dianggap konstan (1 atm). *Chamber* ini dirangkaikan dengan peralatan penunjang, rangkaian ini sering disebut *dynamic gas instalation* (rangkaian instalasi gas dinamika) seperti pada Gambar 3.3. Tahap pertama pada pengujian ini adalah sampel yang sudah dideposisi kemudian dilapisi pasta Ag yang berfungsi sebagai *elektrode*, dapat dilihat pada Gambar 3.4. Setelah itu persiapan *chamber*, terdapat 2 lubang pada sisi kanan dan bawah *chamber*. Lubang pada sisi kanan untuk mengalirkan gas yang telah diatur oleh alat Serinus cal 3000 dan lubang bawah untuk *exhaust*. Terdapat 2 kabel yang berasal dari sensor yang terhubung dengan *temperature controller* dan terhubung dengan digital multimeter. Kabel dari digital multimeter terhubung dengan komputer. Semua peralatan harus terhubung dengan baik untuk mendapatkan hasil yang diinginkan, rangkaian dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3. 3 Sistem *Dynamic Gas*



Gambar 3.4 Preparasi Sampel Uji Sensor Gas



Gambar 3.5 Rangkaian Peralatan Uji Sensor Gas

Tahap selanjutnya setelah rangkaian siap adalah peletakan sampel yang sudah siap kemudian dipanaskan dengan alat pemanas sampai temperatur target, setelah mencapai temperatur target, resistansi sensor akan berubah-ubah. Ketika resistansi stabil pada temperatur target yang dijadikan R_0 kemudian gas SO_2 dialirkan dari tabung gas ke dalam chamber. Aliran gas SO_2 akan melalui *Serinus cal* 3000 yang merupakan alat untuk mengontrol gas yang akan dialirkan ke dalam chamber. Selanjutnya chamber dialiri dengan gas SO_2 dengan konsentrasi 25 ppm, 50 ppm, 75 ppm, dan 90 ppm dan diukur resistansinya tiap konsentrasi gas SO_2 untuk mendapatkan R_g . Waktu pemaparan gas SO_2 dilakukan selama 15 menit. Percobaan dilakukan pada temperatur 150, 200, dan 250°C untuk sampel yang dideposisi ZnO sedangkan untuk sampel yang dideposisi ZnO:Al dilakukan pada temperatur 100, 150, 200, dan 250°C.

Kemudian chamber dialiri gas SO_2 dengan konsentrasi yang sama. Pengujian sensitivitas sensor gas ini dilakukan agar memenuhi spesifikasi sensor gas SO_2 dipasaran seperti pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Spesifikasi Sensor Gas SO_2
(Rüdiger, *et al.*, 2018)

Parameter	Spesifikasi
Tipe Sensor SO_2	<i>Electrochemical,</i> CiTiceL 3MST/F
Temperatur operasi ($^{\circ}\text{C}$)	(-2) – 50
Kelembaban operasi (%)	15-90, non condensing
Tekanan operasi (%)	<i>Atmospheric</i> ± 10
Waktu respon (s)	<20
Akurasi	$\pm 1 \text{ ppm} \pm 1\% \text{ signal}$
Range (ppm)	0-200 ppm
Voltase	9 V (<i>alkaline battery</i>)

2. UV-Vis Spectrophotometry

Spektrofotometri ultraviolet-visibel (UV-Vis) adalah suatu teknik analisis fisika-kimia yang mengamati tentang interaksi atom atau molekul dengan radiasi elektromagnetik pada daerah panjang gelombang daerah bagian ultraviolet (UV) 190-380 nm dan bagian sinar tampak (Vis) 380-780 nm. Prinsip kerja spektrofotometri UV-Vis berdasarkan interaksi antara radiasi elektromagnetik dengan atom, ion, atau molekul. Serapan atom menyebabkan peralihan atau transisi elektronik, yaitu peningkatan energi elektron dari keadaan dasar (*ground state*) ke satu atau lebih tingkat energi yang lebih tinggi atau tereksitasi (*excited state*). Transisi terjadi jika energi yang dihasilkan oleh radiasi sama dengan energi yang diperlukan untuk melakukan transisi (Watson, 2003). Dalam spektrofotometri UV-Vis, suatu radiasi dikenakan pada larutan (sampel kaca) dan intensitas sinar radiasi yang diteruskan diukur besarnya. Radiasi yang diserap oleh

sampel ditentukan dengan membandingkan intensitas sinar yang diteruskan dengan yang diserap. Serapan terjadi jika radiasi/foton yang mengenai sampel memiliki energi yang sama dengan energi yang diperlukan untuk perubahan tenaga. Kekuatan radiasi dapat mengalami penurunan dengan adanya penghamburan dan pemantulan cahaya (Rohman, 2012). Hasil UV-Vis juga dapat menentukan band gap dari suatu lapisan, dengan menggunakan Persamaan 3.1 yang kemudian di plot dengan metode *Tauc Plot*.

$$(\alpha h\nu)^2 = A (h\nu - E_g) \quad (3.1)$$

Di mana, α adalah koefisien absorpsi, A adalah konstanta, h adalah konstanta planck (Joule.sec), dan ν adalah frekuensi foton (sec^{-1}).

3. SEM-EDX(*Scanning Electron Microscope*)

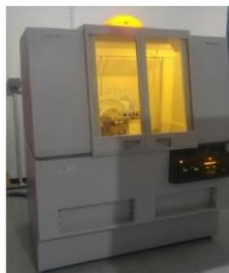
Analisis SEM merupakan metode yang dapat memberikan informasi mengenai komposisi dari permukaan benda secara kualitatif dan kuantitatif. Analisis SEM akan dilakukan untuk mengetahui morfologi dari substrat yang telah dilapisi ZnO dengan konsentrasi berbeda dan morfologi substrat yang telah dilakukan pendopongan Al. Mekanisme kerja analisis SEM ini yakni kaca borosilikat yang telah dilapisi dengan ZnO dan ZnO:Al yang berukuran 10 x 10 x 2 mm, diletakkan di atas *storage* kemudian ditembak elektron. Data hasil pemindaian sinar elektron berupa gambar dari permukaan spesimen. Pantulan sinar elektron akan menghasilkan sebuah gambar dari pemindaian permukaan. Dari gambar tersebut dianalisis melalui area gelap terang dari topografi permukaan spesimen. Tipe alat SEM yang digunakan adalah SEM *Inspect S50* seperti pada Gambar 3.6.



Gambar 3. 6 Alat Uji SEM *Inspect S50*

4. XRD

Analisis XRD merupakan metode yang dapat memberikan informasi mengenai struktur kristal pada suatu material. Mekanisme kerja analisis XRD ini yakni substrat yang telah dilapisi dengan lapisan tipis ZnO dan ZnO:Al dengan ukuran 10 x 10 x 2 mm, ditempatkan dalam *sample holder* yang terdapat dalam XRD kemudian ditembak sinar X. Data hasil penyinaran Sinar X berupa spektrum difraksi. Sinar X dideteksi oleh detektor dan kemudian data difraksi tersebut direkam dan dicatat oleh komputer dalam bentuk grafik *peak* intensitas. Kemudian dianalisis senyawa yang terbentuk dari grafik tersebut dengan cara melihat 3 *peak* tertinggi yang terdapat pada grafik dengan menggunakan *software* tertentu sehingga dapat menghasilkan suatu data. Tipe alat uji XRD yang digunakan adalah XRD *Panalytical x'pert pro* seperti yang ditunjukkan Gambar 3.7.



Gambar 3. 7 Alat Uji XRD *Panalytical X'pert Pro*

3.5 Rancangan Penelitian

Untuk memudahkan proses penelitian selama percobaan, disusun rancangan penelitian yang dilakukan meliputi pengamatan terhadap masing-masing spesimen seperti ditunjukkan Tabel 3.4.

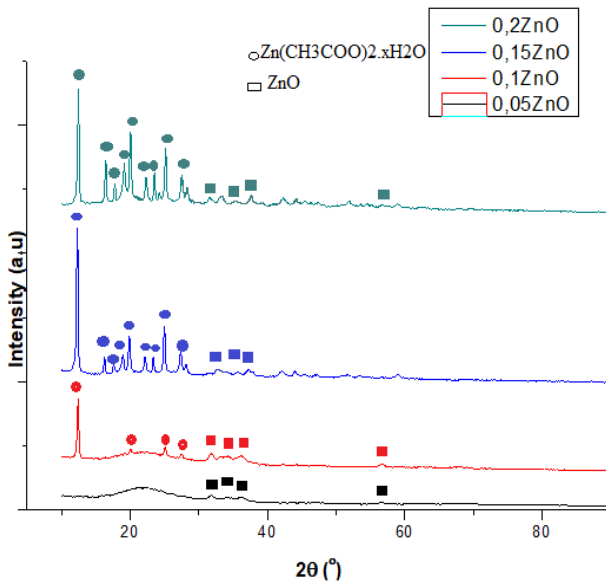
Tabel 3. 4 Tabel Perancangan

Material	Variabel	Uji XRD	Uji SEM	Uji UV-Vis	Uji Sensitivitas
	0,05ZnO	√	√	√	
	0,1ZnO	√	√	√	
	0,15ZnO	√	√	√	
	0,2ZnO	√	√	√	
Kaca Borosilikat	0,05ZnO-4Al	√	√	√	
	0,1ZnO-4Al	√	√	√	
	0,15ZnO-4Al	√	√	√	
	0,2ZnO-4Al	√	√	√	√

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Uji XRD

Pengujian *X-ray Diffraction* (XRD) dilakukan bertujuan untuk mengidentifikasi lapisan senyawa ZnO yang telah dideposisi pada kaca borosilikat dengan proses deposisi *spray pyrolysis*. Pola hasil pengujian XRD dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Pola XRD Lapisan ZnO dengan Variasi Konsentrasi Prekursor

Berdasarkan hasil pengujian XRD, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 bahwa proses deposisi lapisan ZnO dengan perbedaan konsentrasi prekursor ZnO yaitu 0,05; 0,1; 0,15; dan 0,2 M dihasilkan puncak ZnO yang kurang jelas, hal ini kemungkinan karena ZnO belum terbentuk secara sempurna,

sehingga puncak yang mendominasi dan sangat kristalin adalah *zinc acetate dihydrate* yang merupakan prekursor yang digunakan pada proses deposisi. Sedangkan puncak ZnO didapatkan 3 peak utama, yaitu pada $2\theta = 31, 34, \text{ dan } 36^\circ$, serta ada pula pada $2\theta = 56^\circ$. Hal ini dibuktikan dengan menggunakan aplikasi *highscore plus* untuk mencari peak dari senyawa-senyawa yang muncul dan dapat diketahui juga struktur kristal lapisan menunjukkan struktur wurtzit heksagonal dengan orientasi (100), (002), dan (101) sesuai dengan ICDD 01-080-0074. Berdasarkan Gambar 4.1, dapat dilihat bahwa dengan meningkatkan konsentrasi molar prekursor, intensitas orientasi meningkat yang menunjukkan kristalinitas lapisan meningkat, hal ini dapat dibuktikan dengan perhitungan ukuran kristalit pada Tabel 4.1.

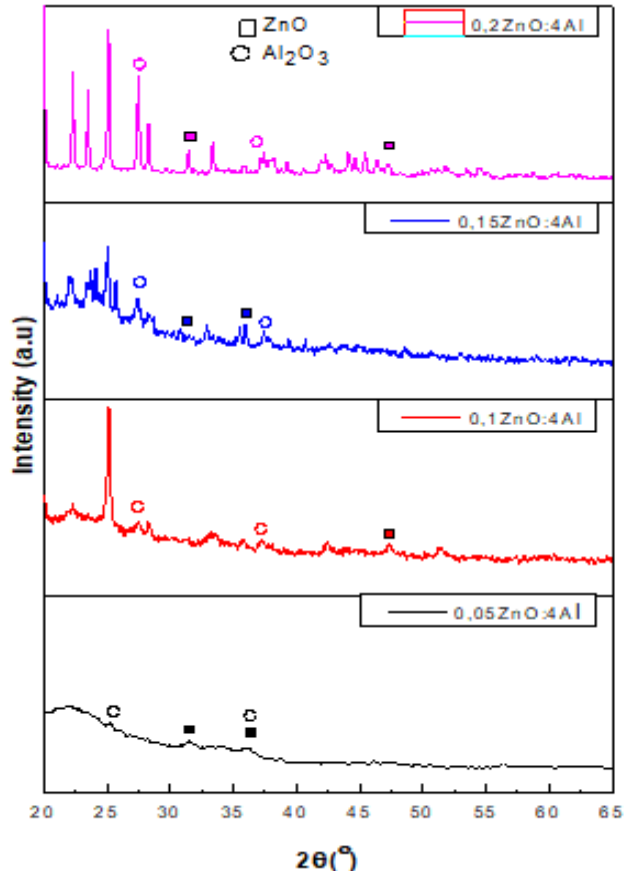
Tabel 4. 1 Ukuran Kristal pada Variasi Konsentrasi Prekursor

Konsentrasi (M)	2θ ($^\circ$)	FWHM ($^\circ$)	D (nm)
0,05	34,2857	0,8029	10,15
0,1	34,3228	0,6353	12,83
0,15	34,2505	0,5528	14,74
0,2	34,4061	0,2676	30,47

Dengan menggunakan formula Scherer didapatkan hasil ukuran kristal seperti pada Tabel 4.1. Hasil tersebut menunjukkan hubungan *Full Width at Half Maximum* (FWHM) dengan ukuran kristal. Peningkatan konsentrasi menyebabkan nilai FWHM menurun sehingga ukuran kristal meningkat. Hasil serupa dilaporkan pada efek konsentrasi asetat seng pada ukuran kristal oleh Alami, *et al.* (2005), adanya pengaruh variasi konsentrasi prekursor pada pola XRD lapisan ZnO, menghasilkan kristalinitas *film* semakin meningkat seiring meningkatnya konsentrasi prekursor dengan ukuran.

Penambahan doping Al mempengaruhi puncak dan orientasi *film* ZnO dapat dilihat pada Gambar 4.2, dimana dengan penambahan Al 4% pada *film* ZnO dengan konsentrasi 0,05; 0,15;

dan 0,2 M menunjukkan puncak ZnO yang muncul pada orientasi (100) dan (101) sedangkan puncak (002) menghilang. Penambahan Al 4% pada ZnO dengan konsentrasi 0,1M menyebabkan tidak adanya puncak yang jelas. Pada Gambar 4.2 dilakukan perbesaran dengan 2θ yang digunakan antara 20° hingga 65° .



Gambar 4. 2 Pola XRD Lapisan Tipis ZnO dengan Variasi Konsentrasi Prekursor dan Pemambahan Doping 4% Al

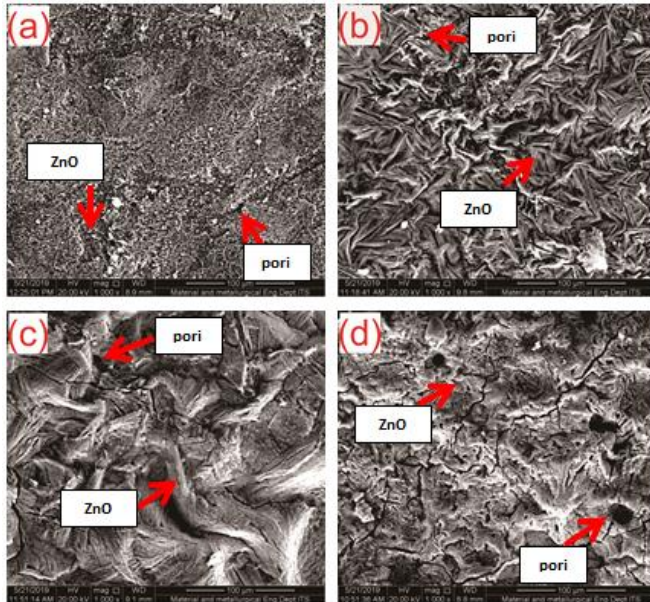
Dari hasil tersebut menunjukkan bahwa doping Al menyebabkan hilangnya orientasi *film* dan menyebabkan penurunan kristal *film*. Menurut Sahay, *et al.* (2008), pada penelitiannya dengan membandingkan antara *thin film* ZnO yang tidak didoping dengan didoping Al, pada penelitian tersebut dihasilkan ukuran kristal dalam *thin film* ZnO yang didoping Al mengalami penurunan. Hal ini disebabkan oleh penggantian ion Zn^{2+} dengan ion Al^{3+} selama pembentukan *thin film* ZnO yang didoping Al. Akibat dari jari-jari ion Al^{3+} yang lebih kecil dari jari-jari ion Zn^{2+} ($rAl^{3+} = 0,054$ nm dan $rZn^{2+} = 0,074$ nm), sehingga terjadi penurunan dalam ukuran kristalit.

Menurut Ayadi, *et al.* (2015), dalam penelitiannya terhadap *film* ZnO yang didoping Al dengan konsentrasi lebih dari 3% menyebabkan penurunan intensitas puncak difraksi (002) yang menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi doping menurunkan kristalinitas *film*, yang mungkin disebabkan oleh pembentukan tekanan oleh perbedaan ukuran ion antara seng dan dopan dan pemisahan dopan dalam batas butir untuk konsentrasi doping tinggi. Ketika sejumlah kecil Al dimasukkan ke dalam *film* ZnO, Al terionisasi menjadi Al^{3+} menyebabkan kisi terganggu dikarenakan perbedaan jari-jari ion Zn^{2+} dan ion Al^{3+} . Jari-jari ion Al^{3+} yang lebih kecil daripada Zn^{2+} , menyebabkan penurunan ukuran kristal pada ZnO yang didoping dengan Al.

Akibat penambahan doping Al, terbentuknya impuritas Al_2O_3 seperti yang terlihat pada Gambar 4.2. Kehadiran impuritas Al_2O_3 dapat merubah sifat dari *thin film*, misalnya meningkatkan sifat optik dan konduktivitas listrik.

4.2 Hasil Uji SEM-EDX

Dari pengujian SEM (*Scanning Electron Microscope*) didapatkan morfologi permukaan substrat yang telah dideposisi dengan variasi konsentrasi prekursor ZnO dan penambahan doping Al seperti pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4.

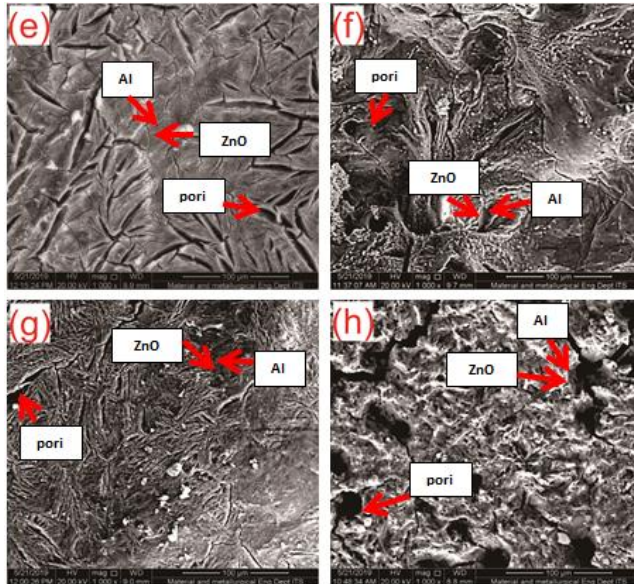


Gambar 4. 3 SEM *Micrograph* Lapisan ZnO pada Berbagai Konsentrasi Larutan Prekursor ZnO (a) 0,05 M (b) 0,1 M (c) 0,15 M (d) 0, 2 M

Berdasarkan Gambar 4.3 menunjukkan bahwa penambahan konsentrasi prekursor ZnO mempengaruhi morfologi permukaan lapisan tipis ZnO. Gambar 4.3 (a) menunjukkan lapisan yang tidak seragam dengan pembentukan kristal yang sangat kecil, hal tersebut dapat disebabkan oleh larutan prekursor yang tidak homogen selama proses pembuatan larutan. Pada konsentrasi yang lebih tinggi seperti pada Gambar 4.3 (b) dan (c)

menunjukkan butir yang terhubung satu sama lain dan membentuk jaringan (*network*). Bentuk dan morfologi butir terlihat tidak berbentuk bola, kemungkinan dikarenakan simetri kristalografi dari wurtzit ZnO dan arah pertumbuhan butirnya selama proses deposisi. Bentuk dan morfologi butir (c) lebih besar daripada (b) karena sebagian besar butir bergabung bersama sehingga umumnya membentuk pola segitiga. Sedangkan pada konsentrasi tertinggi pada penelitian ini seperti yang ditunjukkan Gambar 4.3 (d), terlihat struktur yang sangat berpori dan butir lebih banyak bergabung bersama dibanding yang lain, sehingga terlihat seperti menggumpal. Permukaan terdapat lubang pori dan sedikit retakan yang terjadi pada konsentrasi prekursor ZnO 0,2M, biasanya hal ini dapat disebabkan oleh hasil ketidakhomogenan larutan prekursor *thin film* ataupun ketidakhomogenan dalam pertumbuhan *film*. Banyaknya porositas pada *thin film* ZnO dapat dihitung dengan menggunakan aplikasi *Image-J*. Porositas yang terjadi pada *thin film* dengan konsentrasi 0,05; 0,1; 0,15; dan 0,2M secara berturut-turut sebesar 40,713; 41,488; 44,405; dan 46,581%. Adanya porositas menyebabkan laju difusi atau transportasi fluida ke dalam atau keluar lapisan akan meningkat.

Penambahan doping 4% Al menghasilkan morfologi yang berbeda pada setiap *film* ZnO seperti pada Gambar 4.4. Terlihat banyak retakan terjadi di setiap *film* ZnO yang telah didoping Al. Yamada, *et al.* (2000) menyebutkan bahwa perbedaan dalam ekspansi termal antara substrat dan *film* material adalah salah satu faktor terpenting yang bertanggung jawab atas fenomena retak. Pada Gambar 4.4 (e) – (g) menunjukkan bahwa permukaan *film* lebih halus dan padat tetapi terdapat banyak retakan, dan ada sedikit lubang pori di beberapa tempat seperti pada Gambar 4.4 (f).



Gambar 4. 4 SEM Micrograph Lapisan ZnO pada Berbagai Konsentrasi Larutan Prekursor ZnO yang Didoping 4% Al
(e) 0,05 M (f) 0,1 M (g) 0,15 M (h) 0,2 M

Pada *film* ZnO dengan konsentrasi 0,2M yang didoping 4% Al menghasilkan morfologi sangat berpori. Diskontinuitas lapisan dalam bentuk lubang terlihat jelas dan bentuk butirannya tidak beraturan. Selama proses deposisi *spray pyrolysis*, *droplet* larutan prekursor diangkut ke substrat. Setelah *droplet* mencapai permukaan substrat, beberapa proses dapat terjadi secara bersamaan termasuk penguapan pelarut residu, garam terurai menjadi ZnO dan deposisi pada substrat tetapi dapat terjadi juga selama proses pengangkutan larutan prekursor, *droplet* yang disemprotkan pada substrat menguap dan menyusut. Proses-proses ini dapat mempengaruhi nukleasi dan difusi untuk pertumbuhan *film* tipis, yang akibatnya mempengaruhi tekstur dan butiran *film* yang dihasilkan. Selain itu, permukaan *film* menunjukkan struktur jenis kerut di beberapa tempat, yang

membuatnya berpori. Permukaan *thin film* menunjukkan distribusi seragam dengan retakan. Tegangan penyusutan membesar ketika retak mengering yang dapat terjadi ketika tegangan melebihi kekuatan kombinasi. Porositas yang terjadi pada *thin film* ZnO 0,05M, 0,1M, 0,15M, dan 0,2M yang didoping Al 4% secara berturut-turut adalah 38,979; 39,854; 41,555; dan 46,627%.

Berdasarkan hasil dari EDX, didapatkan persentase unsur yang terdapat pada substrat yang telah dideposisi ZnO seperti yang pada Tabel 4.2 dan 4.3. Pada Tabel 4.2 ditunjukkan bahwa rasio antara atom Zn dan O beragam. Menurut Ayouchi, *et al.* (2003), rasio Zn/O lebih besar dari 1 menunjukkan bahwa *film* tersebut kekurangan O, hal ini mungkin disebabkan oleh proses oksidasi yang tidak sempurna. Proses oksidasi yang tidak sempurna dapat disebabkan oleh proses *stirring* yang terlalu singkat sehingga pelarut tidak cukup waktu untuk melarutkan prekursor sehingga ZnO tidak terbentuk secara sempurna. Proses oksidasi yang tidak sempurna dibuktikan juga pada peak ZnO yang terdapat banyak impuritas yang berupa *zinc acetate dihydrate*.

Tabel 4.2 Rasio Zn/O pada Perbedaan Konsentrasi Prekursor
Thin Film ZnO

	0,05ZnO	0,1ZnO	0,15ZnO	0,2ZnO
O (At%)	41,56	43,36	59,73	42,87
Zn (At%)	37,01	56,64	40,27	57,13
Zn/O	0,89	1,31	0,67	1,33

Pada Tabel 4.3 hasil EDX tersebut menunjukkan bahwa adanya penambahan Al pada *film* ZnO menyebabkan terjadinya penggantian ion Zn^{2+} dengan ion Al^{3+} selama pembentukan *film* ZnO. Pada saat penambahan doping Al, dorongan atom Al yang masuk pada ZnO akan mendesak atom Zn sehingga posisi atom Zn tergantikan oleh Al. Dapat dilihat pada Tabel 4.3 ini,

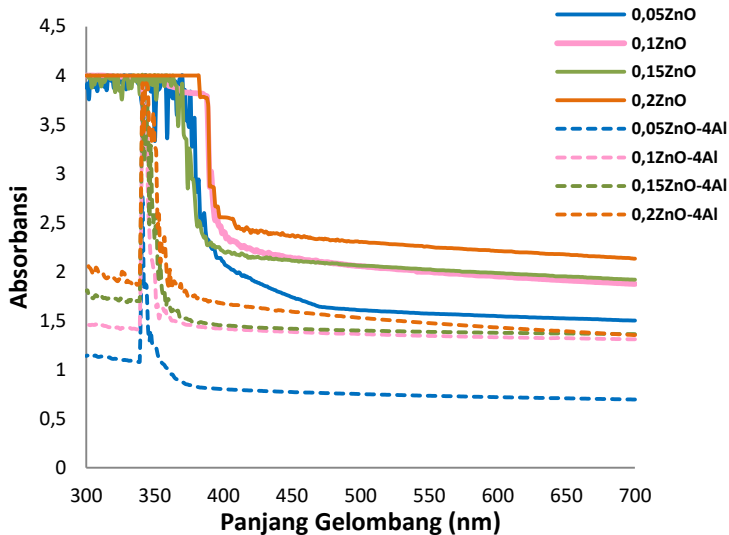
presentase atom Zn berkurang seiring penambahan doping Al, dengan ini dapat dipastikan bahwa Al berhasil menggantikan posisi atom Zn.

Tabel 4. 3 Rasio Zn/O dan Al/Zn pada *Thin Film* ZnO

	0,05ZnO	0,1ZnO	0,15ZnO	0,2ZnO
O (At%)	44,45	53,73	51,65	40,05
Zn (At%)	45,02	36,15	37,49	35,91
Al (At%)	2,66	2,17	2,62	7,92
Cl (At%)	7,87	7,94	8,24	14,35
Zn/O	1,01	0,67	0,73	0,90
Al/Zn	0,059	0,06	0,07	0,22

4.3 Hasil Uji UV-Visible Spectrophotometry

Pada pengujian optik ultra violet-*visible* spektrofotometri yang diukur pada temperatur kamar didapatkan nilai absorbansi. Spektrum absorbansi *thin film* ZnO yang ditunjukkan pada Gambar 4.5, spektrum absorbansi yang direkam pada panjang gelombang 300 nm hingga 700 nm, dapat dilihat bahwa pengaruh konsentrasi prekursor pada pita *thin film* dapat diamati dengan jelas.



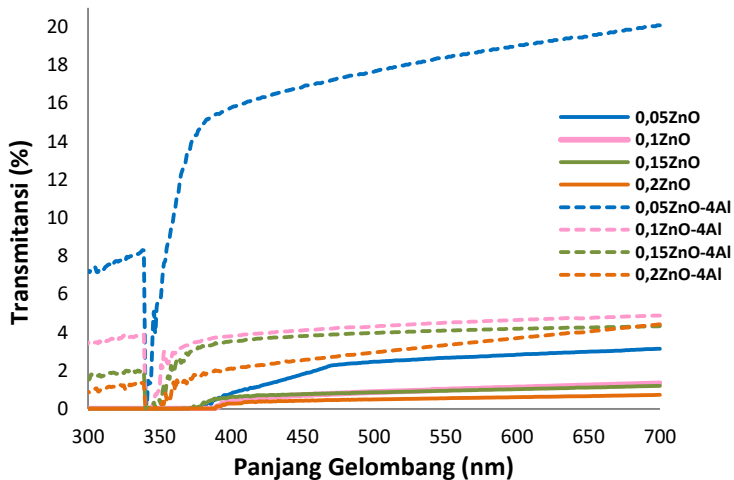
Gambar 4. 5 Spektrum Absorbansi *Thin Film* ZnO

Berdasarkan Gambar 4.5 Peningkatan tajam dalam absorbansi terjadi di bawah 380 nm adalah tipikal dari seng oksida dan nilai absorbansi akan meningkat dengan meningkatnya ukuran partikel (Goh & P.G. McCormick, 2014). Meningkatnya absorbansi pada daerah tersebut kemungkinan disebabkan oleh kekosongan oksigen yang terjadi selama pertumbuhan dengan peningkatan konsentrasi Zn atau keadaan cacat. Pengaruh peningkatan konsentrasi prekursor ZnO pada absorbansi optik meningkatkan absorbansi (Munirah, *et al*, 2017).

Menurut B. Jagadale, *et al.* (2017), variasi absorbansi disebabkan oleh ketebalan *thin film* ZnO dan pergeseran tepi absorbansi dianggap berasal dari perbedaan ukuran butir. Nilai absorbansi untuk semua sampel menurun untuk panjang gelombang yang lebih tinggi. Semakin tebal lapisan maka nilai absorbansi akan semakin tinggi. Hal ini dikarenakan banyaknya atom-atom yang terlibat dalam proses penyerapan berkas cahaya. Sedangkan spektrum absorbansi dari semua sampel menunjukkan

penurunan ketika didoping dengan Al. Dengan doping Al, absorbansi yang menurun bergeser ke panjang gelombang yang lebih pendek. Absorbansi optik pada tepi absorpsi berhubungan dengan transisi dari pita valensi ke pita konduksi, sedangkan tepi absorpsi yang bergeser ke energi yang lebih rendah berhubungan dengan beberapa tingkat energi lokal yang disebabkan oleh beberapa cacat intrinsik. Selain itu, atom Al berdifusi ke dalam lapisan ZnO dan mengganti sebagian ion Zn^{2+} .

Cahaya yang dikenai pada suatu benda, sebagian akan diserap (absorb) dan sebagian lagi akan diteruskan. Besarnya cahayanya yang diteruskan (transmit) pada sampel dapat dilihat pada Gambar 4.6.



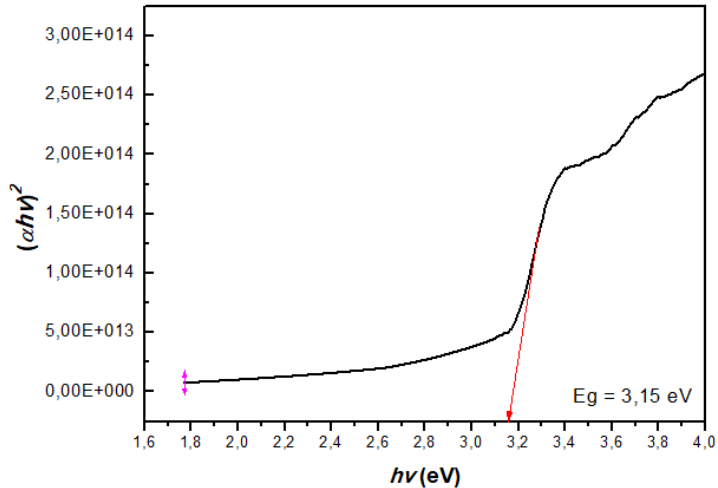
Gambar 4. 6 Spektrum Transmittansi *Thin Film* ZnO

Berdasarkan Gambar 4.6, semakin tinggi konsentrasi prekursor maka semakin rendah cahaya yang diteruskan oleh sampel tersebut. Transmittansi ini biasa dikaitkan dengan ketransparanan suatu sampel. Semakin rendah konsentrasi prekursor menyebabkan semakin transparan. Sedangkan penambahan doping Al menyebabkan nilai transmittansi lebih tinggi yang menyebabkan sampel menjadi lebih transparan.

Berdasarkan spektrum transmitansi dari thin film ZnO dapat diestimasi ketebalan lapisan ZnO yang terbentuk.

Ukuran ketebalan pada *thin film* ZnO tanpa doping dan didoping Al dapat diketahui dengan perhitungan metode *Swanepoel Envelope* dengan menggunakan grafik transmitansi yang merupakan hasil konversi dari data absorbansi. Dari perhitungan tersebut didapatkan bahwa dengan meningkatnya konsentrasi prekursor maka ketebalan semakin meningkat. Ketebalan *thin film* ZnO dengan konsentrasi 0,05; 0,1; 0,15; dan 0,2 M secara berturut-turut adalah sebesar 2210,185 nm, 3268,91 nm, 3871,846 nm, dan 5743,645 nm. Hal ini dikarenakan semakin tinggi konsentrasi prekursor maka semakin banyak atom-atom yang terdapat pada lapisan tersebut, sehingga ketebalan meningkat. Adanya penambahan doping Al menyebabkan ketebalan menurun, ketebalan lapisan ZnO 0,05; 0,1; 0,15 dan 0,2 M yang telah didoping Al secara berturut-turut sebesar 2014,21; 2683,62; 3172,97 dan 3344,29 nm. Hal ini disebabkan atom Al (jari-jari atom lebih kecil) menggantikan Zn. Ketebalan yang dihasilkan tidak menunjukkan bahwa lapisan yang terbentuk adalah *thin film*. Ketebalan lapisan dipengaruhi oleh jarak antara *nozzle* dengan substrat, konsentrasi larutan prekursor, dan temperatur substrat.

Nilai absorbansi suatu lapisan juga dapat menentukan energi gap lapisan tersebut. Dengan metode *Tauc Plot* yaitu memplotkan kuadrat dari koefisien penyerapan optik versus energi foton, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.7. Nilai *bandgap* untuk *film* tipis ZnO ditentukan oleh Persamaan 3.1.



Gambar 4.7 Variasi $(\alpha h\nu)^2$ vs Energi Foton ($h\nu$) pada Konsentrasi Prekursor 0,05M

Pengaruh variasi konsentrasi prekursor ZnO menghasilkan penurunan *bandgap* seiring meningkatnya konsentrasi prekursor dan penambahan doping Al menghasilkan band gap yang lebih besar dibanding *thin film* yang tidak didoping Al seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.4. Dapat dilihat bahwa semakin meingktanya konsentrasi prekursor, band gap yang dihasilkan mengalami penurunan yang kecil. Menurut Goh, *et al.* (2014), ukuran partikel mempengaruhi nilai *bandgap*, nilai *bandgap* dihasilkan dari plot *Tauc* dari nilai absorbansi. Semakin meningkatnya ukuran partikel, band gap semakin menurun tetapi penurunan yang sangat kecil dengan penambahan doping Al, nilai band gap meningkat dari *thin film* ZnO tanpa doping. Menurut (Kohle, *et al.*, 2018), penambahan *carrier* oleh atom Al sebagai donor, yang menyebabkan tingkat Fermi naik ke pita konduksi sehingga menghasilkan *bandgap* yang lebih besar pada *film* tipis ZnO yang didoping oleh Al. Pada Tabel 4.4 menunjukkan nilai *bandgap*. Peningkatan konsentrasi prekursor ZnO menghasilkan

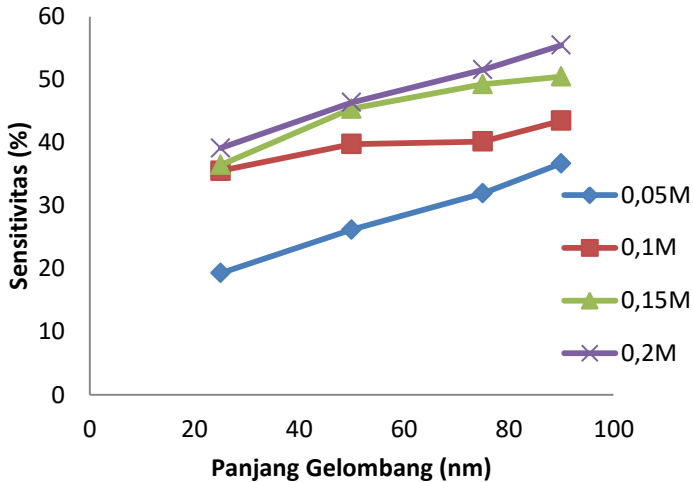
penurunan *bandgap*. Dari nilai-nilai tersebut, terlihat bahwa semua sampel memiliki celah pita yang sedikit lebih rendah dari pada pita ZnO pada umumnya (yaitu 3.37 eV).

Tabel 4.4 Energi *Bandgap* Thin Film ZnO

<i>Thin Film</i>	<i>Bandgap</i> (E_g) (eV)
0,05ZnO	3,15
0,1ZnO	3,11
0,15ZnO	3,02
0,2ZnO	3,00
0,05ZnO-4Al	3,40
0,1ZnO-4Al	3,41
0,15ZnO-4Al	3,41
0,2ZnO-4Al	3,42

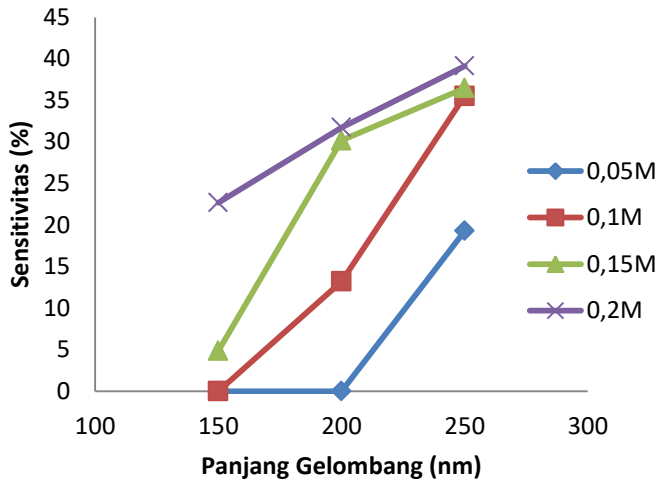
4.4 Hasil Uji Sensitivitas Gas

Pada pengujian sensitivitas sensor gas pada *thin film* ZnO dengan menggunakan gas uji yaitu SO₂. Konsentrasi gas SO₂ divariasikan antara lain 25 ppm, 50 ppm, 75 ppm, dan 90 ppm dan temperatur kerja sensor divariasikan antara lain 100, 150, 200, dan 250°C. Jika *thin film* ZnO diinjeksikan gas SO₂ maka akan terjadi perubahan resistansi sebelum dan sesudah penginjeksian gas SO₂. Ketika gas SO₂ diinjeksikan pada *thin film* ZnO maka resistansi akan menurun, hal ini disebabkan gas SO₂ merupakan gas pereduksi. Gas pereduksi bertindak sebagai donor elektron ketika berinteraksi dengan permukaan oksida logam. Selama interaksi ini, gas pereduksi akan mengikat ion oksigen dan diserap dari permukaan oksida logam (Shankar & John, 2015). Berdasarkan hasil pengukuran resistansi sebelum dan sesudah penginjeksian gas uji pada *thin film* ZnO berbagai konsentrasi prekursor terhadap konsentrasi gas uji SO₂, selanjutnya sensitivitas sensor dapat ditentukan dengan Persamaan (2.3) dan didapatkan hasil seperti Gambar 4.8.



Gambar 4. 8 Sensitivitas Sensor Gas pada Variasi Konsentrasi Prekursor *Thin Film* terhadap Konsentrasi Gas SO_2 ($T=250^\circ\text{C}$)

Pada Gambar 4. 8 terlihat bahwa sensor gas dari *thin film* ZnO yang dideposisi menggunakan metode *spray pyrolysis* dengan variasi konsentrasi prekursor mempunyai sensitivitas bervariasi. Pada semua *thin film* ZnO tanpa doping menunjukkan semakin tinggi konsentrasi gas uji yang diinjeksikan maka sensor semakin sensitif terhadap gas. Semakin sensitif yang dimaksud adalah penurunan yang drastis pada resistansi, sehingga perubahan resistansi sebelum dan sesudah diinjeksikan gas semakin besar. Hal ini dikarenakan semakin tinggi gas SO_2 yang diinjeksikan maka oksigen pada *thin film* ZnO semakin berkurang. Gas SO_2 mengikat oksigen dari permukaan oksida logam yang menyebabkan terjadinya kekosongan oksigen pada oksida logam.



Gambar 4. 9 Sensitivitas Sensor Gas *Film ZnO* pada Variasi Konsentrasi Prekursor terhadap Variasi Temperatur Operasi (gas =25 ppm)

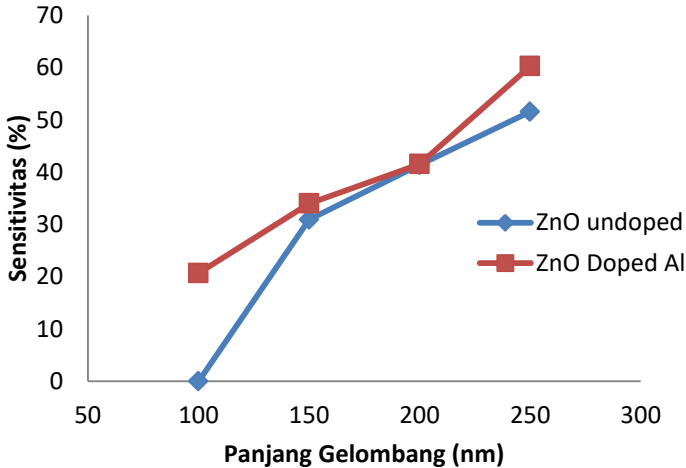
Pada Gambar 4. 9 dapat dilihat respon sensor ZnO terhadap temperatur pada jumlah konsentrasi gas uji tetap (25 ppm) dan hasil menunjukkan bahwa pada sensor dari *thin film ZnO* 0,05M pada temperatur 150 dan 200°C, resistansi sebelum diinjeksikan gas tidak terbaca oleh alat sehingga tidak dapat diinjeksikan gas SO₂, yang berarti sensor tersebut belum dapat merespon pada temperatur 150 dan 200°C. Tetapi pada temperatur 250°C, sensor dapat merespon. Pada sensor *thin film ZnO* 0,1M prekursor dapat merespon ketika dioperasikan pada temperatur 200 dan 250°C. Sedangkan pada sensor dari *thin film ZnO* konsentrasi prekursor 0,15 dan 0,2M dapat beroperasi pada temperatur 150°C. Dapat dilihat bahwa semakin tinggi temperatur maka semakin tinggi kemampuan sensor dalam merespon gas uji (sensitivitas semakin tinggi). Hal ini dikarenakan aktivasi atau energi termal yang rendah, molekul gas tidak dapat bereaksi dengan oksigen yang

akan diserap dari permukaan sensor, sehingga sensor menunjukkan respon yang rendah (Kohle, *et al*, 2018).

Pada Gambar 4.8 dan 4.9 menunjukkan sensor dari *thin film* dengan konsentrasi prekursor 0,2M memiliki sensitivitas tertinggi dibanding *thin film* dengan konsentrasi 0,05; 0,1; dan 0,15M. Menurut Dhas, *et al.* (2014), pada penelitiannya mengenai *thin film* CuO dengan variasi prekursor 0,1; 0,2; dan 0,3M untuk aplikasi sensor gas etanol. Dari penelitian tersebut, meningkatnya konsentrasi prekursor menyebabkan sensitivitas sensor. Interaksi gas dengan permukaan material dapat dipengaruhi beberapa faktor internal maupun eksternal, seperti kondisi alam dan kelembaban. Adapun faktor-faktor tambahan lain yang mempengaruhi respon terhadap banyaknya penyerapan oksigen pada permukaan *thin film* antara lain temperatur operasi, ukuran partikel, dan spesifik area. Ukuran butir dan pori pada *thin film* juga mempengaruhi kapabilitas merespon. Pada *thin film* dengan konsentrasi prekursor 0,3M memiliki ukuran butir paling besar dan lebih banyak dan besar pori pada morfologi *thin film* dibandingkan dengan 0,1 dan 0,2M.

Menurut Panwar, *et al.* (2017), mekanisme dimana gas berinteraksi dengan permukaan oksida logam, tidak mudah untuk menetapkan parameter tunggal yang tepat yang mempengaruhi sensitivitas. Porositas yang lebih tinggi dapat meningkatkan rasio permukaan terhadap volume dan meningkatkan laju difusi ke dalam atau ke luar struktur berpori, sehingga struktur yang memiliki pori yang tinggi dapat menyebabkan sensitivitas meningkat. Namun berbeda dengan penelitian Yadava, *et al.* (2015), hasil penelitian menunjukkan sensitivitas sensor gas meningkat dengan penurunan ketebalan lapisan dan menunjukkan respon dan waktu pemulihan yang paling pendek yang menunjukkan bahwa ukuran butiran yang lebih kecil memberikan area permukaan yang lebih besar untuk material, yang menyebabkan interaksi yang lebih kuat antara gas yang teradsorpsi dan permukaan sensor. Perbedaan hasil ini

kemungkinan disebabkan oleh faktor internal dan eksternal yang terjadi.



Gambar 4.10 Sensitivitas Sensor Gas pada *Thin Film* ZnO Tanpa Doping dan Didoping Al terhadap Temperatur (gas=75 ppm)

Respon sensor dari sensor ZnO yang tidak didoping dan didoping Al diukur pada jumlah konsentrasi SO_2 yang tetap (75 ppm) dan hasil yang sesuai ditunjukkan pada Gambar 4.10, dapat dilihat pada *thin film* ZnO tanpa doping, ketika sensor dioperasikan pada temperatur 100°C, sensor tidak merespon atau resistansi awal tidak terbaca oleh alat, sehingga pada temperatur 100°C sensor belum bisa bekerja (sensitivitas = 0), namun ketika temperatur dinaikan menjadi 150, 200, dan 250°C, sensor dari *thin film* ZnO tanpa doping tersebut merespon, sensitivitas pada temperatur tersebut berturut-turut adalah 30,931; 41,391; dan 51,572%. Sedangkan pada sensor dari *thin film* ZnO yang didoping Al menunjukkan respon ketika dioperasikan pada temperatur 100°C yaitu sebesar 19,682%, respon sensor ZnO yang didoping Al masih rendah tersebut dikarenakan respon gas dibatasi oleh energi aktivasi atau energi termal yang rendah pada

permukaan sensor. Karena aktivasi atau energi termal yang rendah, molekul gas tidak dapat bereaksi dengan oksigen yang akan diserap dari permukaan sensor, sehingga sensor menunjukkan respon yang rendah (Kohle, *et al.*, 2018). Tetapi respon semakin meningkat ketika temperatur 150, 200, dan 250°C yaitu sebesar 34,021; 41,569; dan 60,293%. Menurut Kolhe, *et al.* (2018), penambahan Al menimbulkan keuntungan, satu satunya dengan meningkatkan jumlah sisi aktif karena peningkatan jumlah elektron bebas, yang akibatnya meningkatkan karakteristik sensor. Selain itu, penambahan Al dalam ZnO juga menghasilkan penurunan temperatur optimal yaitu pada temperatur 200°C.

Menurut Sun, *et al.*(2012), konsep sederhana doping adalah untuk meningkatkan aktivitas katalitik dan menyesuaikan hambatan listrik dari oksida logam intrinsik. Dopan ini biasanya yang membuatnya bereaksi dengan molekul gas yang terserap. Dopan umumnya didispersikan pada matriks oksida logam sehingga mereka berada di dekat kontak intergranular. Di udara, molekul oksigen bereaksi dengan anion oksigen pembentuk dopan dan kemudian menuju matriks oksida logam. Ketika gas target diserap ke permukaan dopan dan kemudian bermigrasi ke permukaan oksida untuk bereaksi dengan oksigen permukaan sehingga meningkatkan konduktivitas permukaan. Namun, seiring perkembangan nanoteknologi, doping diberi banyak arti baru. Fenomena doping tipikal menyangkut fakta bahwa ukuran partikel oksida logam yang didoping menjadi lebih kecil daripada yang murni karena interaksi pada batas-batas antara host dan kristal dopan, gerakan kristal dibatasi. Dengan kata lain, peningkatan batas butir menyebabkan pertumbuhan kristal terhambat. Akibatnya, ukuran kristal berkurang oleh doping pengotor. Dengan adanya doping Al pada *thin film* ZnO menyebabkan sensitivitas meningkat dan menurunkan temperatur operasi sensor.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan, didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Peningkatan konsentrasi prekursor pada *thin film* ZnO dapat meningkatkan kristalinitas ZnO, ukuran kristal terbesar dimiliki oleh lapisan dengan konsentrasi prekursor 0,2M. Morfologi yang dihasilkan dengan meningkatnya konsentrasi yaitu ukuran butir semakin membesar, pada konsentrasi tertinggi terdapat pori dan terjadi aglomerasi. Absorbansi meningkat tetapi energi gap (E_g) menurun seiring bertambahnya konsentrasi. Sedangkan penambahan Al pada *thin film* ZnO menurunkan kristalinitas ZnO dengan morfologi yang dihasilkan lebih padat tetapi banyak retakan, doping Al pada konsentrasi prekursor 0,2M terdapat pori. Absorbansi menurun dibanding tanpa doping dan sehingga meningkatkan energi gap (E_g).
2. Peningkatan konsentrasi prekursor pada *thin film* ZnO dapat meningkatkan sensitivitas sensor *thin film* ZnO dan penambahan doping Al dapat meningkatkan sensitivitas sensor *thin film* ZnO dibanding tanpa didoping dan menurunkan temperatur operasi sensor.

5.2 Saran

Adapun hal-hal yang perlu dilakukan mengenai penelitian ini sebagai berikut :

1. Proses *stirring* dalam pembuatan prekursor dilakukan lebih lama agar menghasilkan homogenitas yang tinggi dan tidak terdapat impuritas
2. Penambahan zat aditif saat pembuatan prekursor
3. Laju larutan prekursor saat disemprotkan diturunkan agar tidak terjadi banyak retakan dan temperatur tidak terlalu *drop* saat penyemprotan

-
4. Penggunaan gas uji dengan konsentrasi yang lebih kecil
 5. *Recovery time* pada sensor diamati secara alami tanpa memompakan oksigen pada sensor
 6. Pengujian *response time* pada sensor

DAFTAR PUSTAKA

- Alami, Z., M.Salem, M.Gaidi, & J.Elkhamkhami. 2005. "Effect of Zn Concentration On Structural and Optical Proprieties Of ZNO Thin Films Deposited By Spray Pyrolysis". **Advanced Energy: An International Journal (AEIJ)** 2, 4: 11-24
- Ayadi, Z. B., L.ElMir, S.Alaya, K.Djessas, & E.Hernandez. 2015. "Effect of doping concentration on transparency and conductivity of ZnO:Al thin films". **Ceramics International** 37, 2:555-560.
- Ayouchi, R., F.Martin, D.Leinen, & J.R.Ramos-Barrado. 2003. "Growth of pure ZnO thin films prepared by chemical spraypyrolysis on silicon". **Journal of Crystal Growth** 247, 3-4:497-504.
- B. Jagadale, S., Vithoba L.Patilb, Sharadrao A.Vanalakarc, Pramod S.Patil, & Harish P.Deshmukh. 2017. "Preparation, characterization of 1D ZnO nanorods and their gas sensing properties". **Ceramics International** 44, 3: 3333–3340.
- Bayvel, L., & Z.Orzechowski. 1993. **Liquid atomization**. Washington, DC: Taylor & Francis.
- Debataraja, A. 2017. " Sintesis Nanokomposit SnO₂-Graphene-Pd Untuk Aplikasi Sensor Gas Karbon Monoksida Sensitivitas Tinggi". **Penelitian Disertasi Doktor**.
- Dedova, T. 2007. "Chemical Spray Pyrolysis Deposition of Zinc Sulfide Thin Films and Zinc Oxide Nanostructured Layers"
- Dengyuan, S. 2005. "Zinc Oxide TCOs (Transparent Conductive Oxides) And Polycrystalline Silicon Thin-Films For Photovoltaic Applications". **Penelitian Disertasi Doktor**.
- Dhas, C. R., Dinu Alexander, A.Jennifer Christy, K.Jeyadheepan, A.Moses Ezhil Raj, & C.Sanjeevi Raja. 2014. "Preparation and Characterization of CuO Thin Films Prepared by Spray Pyrolysis Technique for Ethanol Gas

-
- Sensing Application". **Asian Journal of Applied Sciences** 7, 8:671-684.
- Durgajanani, S., B. G. Jeyaprakash, & R. J. Bosco. 2011. "Influence of precursor concentration on structural, morphological and electrical properties of spray deposited ZnO thin films". **Crystal Research and Technology** 46, 7:685– 690.
- Filipovic, L., Selberherr, S., Mutinati, G. C., Brunet, E., Steinhauer, S., Kock, A., et al. 2013. "A Method for Simulating Spray Pyrolysis Deposition in the Level Set Framework". **Engineering Letters** 21, 4:224-240.
- Gadhi, T. A. 2017. "Evaluation of the photodiscoloration efficiency of β -Bi₂O₃ films deposited on different substrates by pneumatic spray pyrolysis". **Thin Solid Films** 638, 119–126.
- Gaspari, F. 2018. "Thin Films", **Comprehensive Energy Systems** (hal. 88-116).
- Goh, E. G., X.Xu, & P.G.McCormick. 2014. "Effect of particle size on the UV absorbance of zinc oxide nanoparticles". **Scripta Materialia** 78–79, 49-52.
- Hasanuzzaman, M., Rafferty, A., Sajjia, M., & Olabi, A.-G. 2016. Properties of Glass Materials. **Reference Module in Materials Science and Materials Engineering**.
- Hermida, I. D., Parlindungan Sinaga, & Gesi Soleha. 2013. "Karakterisasi Sensor Gas CO Berbasis Bahan SnO₂ dengan Metoda Solgel Menggunakan Teknologi Film Tebal". **Jurnal Elektronika Dan Telekomunikasi** 13, 2: 60-65.
- Jagadish , C., & Stephen Pearton. 2006. **Zinc oxide bulk, thin films and nanostructures : processing, properties and applications**. Amsterdam ; London : Elsevier,.
- Jiao, M. 2017. "Microfabricated Gas Sensors Based on Hydrothermally Grown 1-D ZnO Nanostructures." **Penelitian Disertasi Doktor**.
-

-
- Gonzalez, A., Jose A. Soto Urueta, & R. Sua´ rez-Parra. 1998. "Optical and Electrical Characteristic of Alumunium-doped ZnO Thin Films Prepared by Solgel Technique". **Journal of Crystal Growth** 192, 3–4: 430-438.
- Jung, D. S., Seung Bin Park, & Yun Chan Kang. 2010. "Design of particles by spray pyrolysis and recent progress in its application". **Korean Journal Chemical Engineering** 27, 6: 1621–164.
- Kal, S. 2002. **Basic Electronic : Devices, Circuits and IT Fundamentals**. New Delhi: Prentice-Hall of India Private Limited.
- Kalyamwar, V. S., Fulsingh C. Raghuwanshi, Narayan L. Jadhao, & Anil J. Gadewar. 2013. "Zinc Oxide Nanostructure Thick Films as H₂S Gas Sensors at Room Temperature". **Journal of Sensor Technology** 3, 3:31-35.
- Khatami, Seyed Mohammad Navid. 2014. Modeling and Spray Pyrolysis Processing of Mixed Metal Oxide Nano-Composite Gas Sensor Films
- Kolhe, P., Alpna B. Shinde, S.G. Kulkarni, Namita Maiti, Pankaj M. Koinkar, & Kishor M. Sonawane. 2018. "Gas sensing performance of Al doped ZnO thin film for H₂S detection". 6-11.
- Korotcenkov , G., V.Brinzari , A.Cerneavschi, M.Ivanov , V.Golovanov , & A.Cornet . 2004. "The influence of film structure on In₂O₃ gas response". **Thin Solid Films** , 315–323.
- Kozhukharov, S., & S. Tchaoushev. 2011. "Perspectives for development and industrial application of spray pyrolysis method". **Scientific Journal**, 46-50.
- Kristanto, P. 2002. **Ekologi Industri**. Edisi Pertama, cetakan pertama.
- Kuo , S., Chen WC, Lai FI, Cheng CP , Kuo HC, & Wang SC. 2006. "Effects of Doping Concentration and Annealing Temperatur on Properties of Highly-Oriented Al-Doped ZnO Films". **Journal of Crystal Growth**, 78-84.
-

-
- Mahmoud, F. A., & G.Kiriakidis. 2009. "Nanocrystalline ZnO Thin Film For Gas Sensor Application". **Journal of Ovonic Research** 5, 1.
- Munirah, Ziaul Raza Khan, Anver Aziz, Mohd.Shahid, & M.U.Khandaker. 2017. "Influence of zinc concentration on band gap and sub-band gap absorption on ZnO nanocrystalline thin films sol-gel grown". **Materials Science-Poland**, 35(1), 246-253.
- Okuyama, K., & I.Wuled. 2003. "Preparation of nanoparticles via spray route". **Chemical Engineering Science**, 537 – 547.
- Panwar, A., Narendra Kumar Pandey, & Suneet Kumar Misra. 2017. "Investigations On Undoped Zinc Oxide Nanomaterials As Humidity And Gas Sensor". **International Journal Of Engineering Sciences & Research Technology**, 2277-9655.
- Patil, G., D. D. Kajale, V. B. Gaikwad , & G. H. Jain. 2012. "Spray Pyrolysis Deposition of Nanostructured Tin Oxide Thin Films". Vol.5
- Perednis, D., & Ludwig J.Gauckler. 2005. "Thin Film Deposition Using Spray Pyrolysis". **Journal of Electroceramics**, 103–111.
- Ristiana, R. 2013. "Sistem Monitoring Gas SO₂ pada Proses Pengolahan Bijih Gelena". **Prosiding Semirata FMIPA Universitas Lampung**, 141-145.
- Rohman. 2012. **Spektroskopi Inframerah dan Kemometrika untuk Analisis Farmasi**. Yogyakarta: Pustaka Pelajar.
- Roy, S., & Chandan Kumar Sarkar. 2016. **MEMS and Nanotechnology for Gas Sensors**. Boca Raton: CRC Press.
- Rudiger, J., Tirpitz, J.M. Moor., N. Bobrowski, "Implementation of electrochemical, optical, and denuder-based sensors and sampling techniques on UAV for volcanic gas measurements: examples from Mayasa, Turrialba and Sreomboli volcanoes". **Copernicua Publications on**
-

-
- behalf of the European Geosciences Union**, (2018): 2441-2457.
- Safeera , T. d. 2015. "Low temperature fabrication and characterization of wurtzite structured ZnS quantum dots by chemical spray pyrolysis". **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, 96–102.
- Sahay, P., & Nath, R. 2008. "Al-Doped Zinc Oxide Thin Films For Liquid Petroleum Gas (LPG) Sensors". **Sensors and Actuator B**, 222-227.
- Sahraei, O. A., A. Khodadadi, & Y. Mortazavi. 2009. "Low Temperature Ethanol Gas Sensor based on SnO₂/MWNTs Nanocomposite". **World Academy of Science, Engineering and Technology**, 49.
- Sayono, Tjipto Sujitno, & Lely Susita RM. 2008." Efek Doping Indium Terhadap Sensitivitas Sensor Gas ZnO". **Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya**, 139 - 147.
- Shankar, P., & John Bosco Balaguru Rayappan. 2015. "Gas sensing mechanism of metal oxides: The role of ambient atmosphere, type of semiconductor and gases - A review". **ScienceJet**, 126.
- Singh, V. K. 2017. "Thin Film Deposition By Spray Pyrolysis Technique". **Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)**, 910-918.
- Sripanem, W. d. 2018. "Effect of aluminium doping concentration on microstructures, optical and electrical properties of ZnO thin films by spray pyrolysis technique". **The 10th Thailand International Metallurgy Conference (The 10th TIMETC)**, 9519–9524.
- Suchea , M., Christoulakis S, Katsarakis N, & Kitsopoulo. 2007. "Comparative study of zinc oxide and aluminum doped zinc oxide transparent thin films grown by direct current magnetron sputtering". 6562-6566
-

-
- Sudalmaa, S., P.Purwantoa, & Santoso, L. W. 2015. "The Effect of SO₂ and NO₂ from Transportation and Stationary Emissions Sources to SO₄²⁻ and NO₃⁻ in Rain Water in Semarang". **International Conference on Tropical and Coastal Region Eco-Development 2014(ICTCRED 2014)**, 247 – 252.
- Sung, Y.F., S.B. Liu., F.L. Meng., J.Y. Liu, Z.Jin., L.Y.Kong., J.H.Liu. 2012. "Metal Oxide Nanostructures and Their Gas Sensing Properties: A Review" **Sensors**, 2610-2631
- Suyono. (2014). **Pencemaran Kesehatan**. Jakarta: Kedokteran EGC.
- Tyassena, F. Y. 2015. *Analisis Pembentukan Partikel Makropori pada Spray Pyrolysis*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Umar, S., & Mahendra Kumar. 2018. "Effect of Fe doping on optical and structural properties of ZnO film prepared by spray pyrolysis method". **6th National Conference On Nanomaterials**, 9173–9176.
- Watson, D. 2003. **Pharmaceutical Analysis : A Textbook for Pharmacy Students and Pharmaceutical Chemists**. USA: Churchill Livingstone.
- Witjaksono, Ari. 2011. "Karakterisasi Nanokristalin ZnO Hasil Presipitasi dengan Perlakuan Pengeringan, Anil, dan Pasca Hidrotermal", Depok: Universitas Indonesia
- Yadava, S. C., B.B.Kaleb , & M.D.Uplanea. 2015. "Effect of Film Thickness on H₂S Gas Sensing Properties of Boron Doped Zinc oxide Nanocrystalline Films". Volume 2 No. 41 .
- Yamada, Y., Kawashima, J, Wen, J., Niiori, Y., & Hirabayashi, I. 2000. "Evaluation of thermal expansion coefficient of twinned YBa₂Cu₃O_{7-δ} film for prediction of crack formation on various substrates", Vol.39, 1111-1115.
- Wilson, Alphus D dan Manuela Baietto. 2009. Applications and advances in electronic-nose technologies. **Materials Science and Processing**. Vol. 9, 5099-5148
-

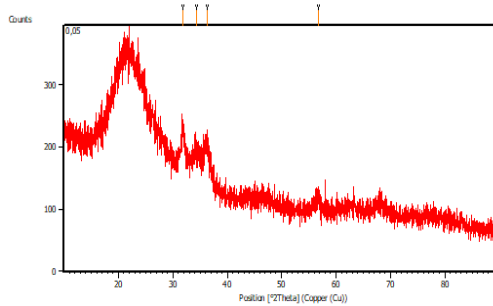
-
- Yamamoto, Y., Saito, K., Takashi, K., Konagai, M. 2001.
"Preparation of Boron -doped ZnO Thin Film By Photo -
atomic Layer Deposition".
- Zhou, Qu., Bo Xie., Lingfeng Jin., Weigen Chen., dan Jian Li.
2016. "Hydrothermal Synthesis and Responsive
Characteristics of Hierarchical Zinc Oxide Nanoflowers
to Sulfur Dioxide". **Journal of Nanotechnology**. Volume
2016.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

Lampiran 1: Data Pengujian XRD

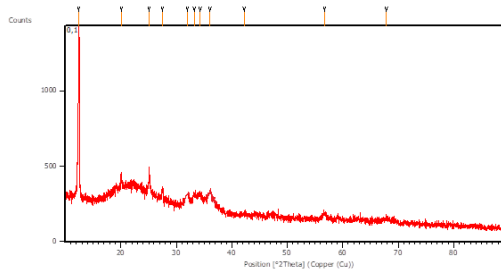
a) 0,05ZnO



Peak List: (Bookmark 3)

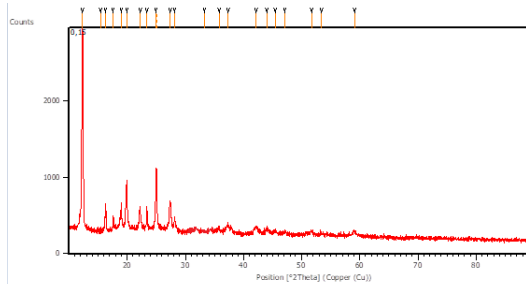
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
31.7931	58.55	0.6691	2.81465	95.11
34.2857	41.94	0.8029	2.61552	68.14
36.2817	61.56	0.6691	2.47608	100.00
56.7921	21.57	0.5353	1.62110	35.05

b) 0,1ZnO



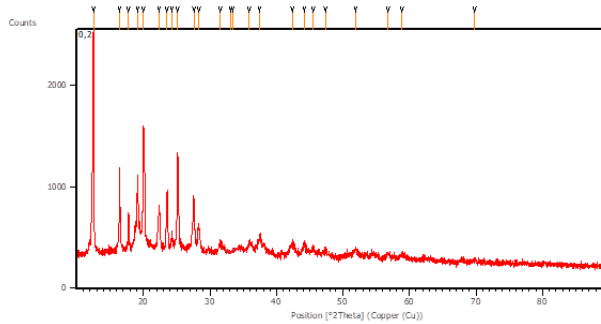
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
12.4698	1135.85	0.1171	7.09855	100.00
20.0968	85.30	0.2007	4.41849	7.51
25.1169	156.77	0.1673	3.54559	13.80
27.5219	56.99	0.3346	3.24098	5.02
31.9711	84.68	0.3346	2.79939	7.46
33.2287	63.32	0.4015	2.69626	5.57
34.3228	74.70	0.6353	2.61278	6.58
36.3282	104.42	0.3029	2.49291	9.19
42.1816	12.36	0.8029	2.14240	1.09
56.7454	44.61	0.5353	1.62232	3.93
67.9157	16.83	0.8029	1.38017	1.48

c) **0,15ZnO**



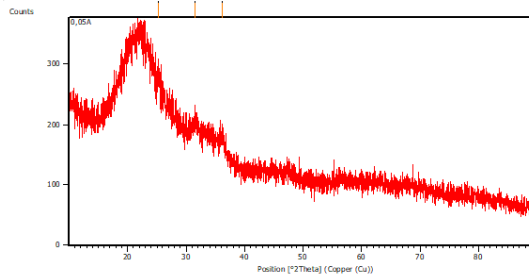
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
12.3389	2627.44	0.1673	7.17358	100.00
15.4085	36.20	0.1004	5.75071	1.38
16.3108	349.49	0.1004	5.43456	13.30
17.5625	149.42	0.1004	5.04995	5.69
19.0019	367.82	0.1171	4.67053	14.00
19.9516	669.02	0.1338	4.45031	25.46
22.2491	280.27	0.1171	3.99568	10.67
23.3889	322.54	0.1171	3.80349	12.28
24.9631	819.55	0.1020	3.56413	31.19
25.0665	707.62	0.0816	3.55848	26.93
27.3703	378.56	0.3264	3.25589	14.41
28.1234	173.35	0.1632	3.17040	6.60
31.2505	100.9	0.3448	2.69231	3.84
34.2505	46.64	0.5528	2.50926	1.78
36.3500	138.095	0.3264	2.40568	5.26
42.1688	89.97	0.3264	2.14125	3.42
43.9437	88.36	0.3264	2.05879	3.36
45.3977	39.87	0.4896	1.99617	1.52
47.1770	37.62	0.6528	1.92495	1.43
51.7270	45.99	0.4896	1.76582	1.75
53.4159	19.58	0.4896	1.71390	0.75
59.0969	49.79	0.6528	1.56197	1.89

d) **0,2ZnO**



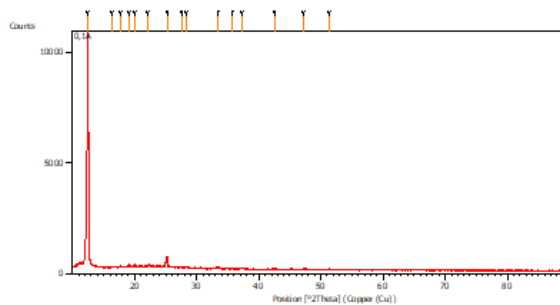
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
12.5169	2067.62	0.1506	7.07195	100.00
16.4530	819.51	0.1506	5.38790	39.64
17.8123	369.42	0.1004	4.97967	17.87
19.1603	743.50	0.1004	4.63227	35.96
20.0551	1232.91	0.1338	4.42758	59.63
22.3669	422.14	0.1338	3.97491	20.42
23.5598	558.90	0.1506	3.77627	27.03
24.2619	187.64	0.1338	3.66857	9.08
25.1848	975.05	0.2007	3.53619	47.16
27.5650	503.26	0.0669	3.23601	24.34
28.3145	263.27	0.2676	3.15203	12.73
31.6098	153.02	0.2353	2.83055	7.40
34.4061	87.93	0.2676	2.68235	4.25
36.2013	182.31	0.2007	2.39831	8.82
37.5974	252.27	0.2572	2.21878	9.94
42.3386	117.87	0.2676	2.13482	5.70
44.1777	99.51	0.4684	2.05013	4.81
45.5044	69.87	0.3346	1.99339	3.38
47.3850	57.77	0.5353	1.91858	2.79
51.9566	72.83	0.2007	1.76001	3.52
56.7954	45.43	0.4015	1.62102	2.20
58.9102	53.27	0.3346	1.56777	2.58
69.7880	14.98	0.6691	1.34765	0.72

e) **0,05ZnO-4Al**



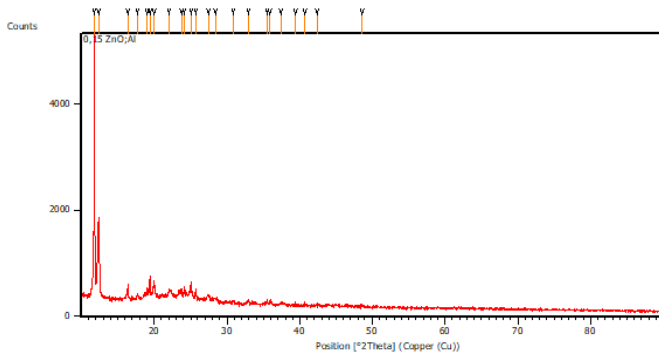
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
25.3302	19.50	0.4015	3.51621	76.58
31.6111	22.32	0.8029	2.83044	87.67
36.2016	25.46	0.8029	2.48137	100.00

f) **0,1ZnO-4Al**



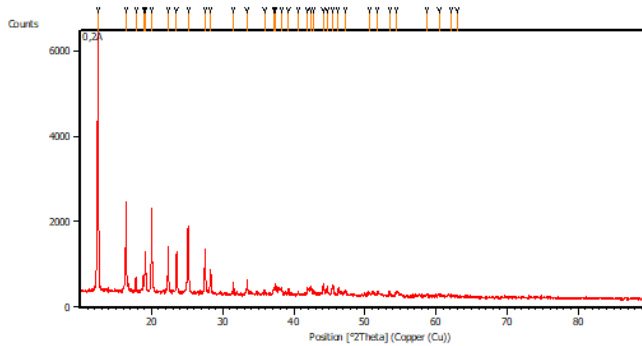
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
12.4906	10296.41	0.1338	7.08675	100.00
16.4069	30.83	0.2007	5.40294	0.30
17.7862	51.17	0.2007	4.98693	0.50
19.1635	123.84	0.1338	4.63152	1.20
20.0724	118.66	0.1338	4.42380	1.15
22.1752	42.88	0.5353	4.00883	0.42
25.2044	457.59	0.1171	3.53348	4.44
27.5424	48.34	0.3346	3.23862	0.47
28.3297	52.92	0.2007	3.15038	0.51
33.4629	39.61	0.5353	2.67792	0.38
35.7549	29.00	0.4015	2.51134	0.28
37.2057	35.42	0.4015	2.41668	0.34
42.4640	36.30	0.3346	2.12881	0.35
47.3096	40.71	0.2676	1.92146	0.40
51.3312	36.72	0.3346	1.77997	0.36

g) **0,15ZnO-4Al**



Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
11.8026	4892.42	0.0836	7.49830	100.00
12.3909	1461.64	0.1673	7.14355	29.88
16.3810	290.38	0.0502	5.41141	5.94
17.7010	97.51	0.2007	5.01074	1.99
19.0972	219.41	0.1004	4.64745	4.48
19.4024	453.81	0.0836	4.57503	9.28
20.0009	329.95	0.2007	4.43946	6.74
22.0362	208.08	0.1673	4.03380	4.25
23.7375	246.50	0.1338	3.74841	5.04
24.1226	275.94	0.0669	3.68943	5.64
25.1056	343.41	0.0836	3.54716	7.02
25.7230	231.32	0.1338	3.46340	4.73
27.4522	151.11	0.2007	3.24905	3.09
28.4038	83.13	0.4015	3.14233	1.70
31.7815	44.37	0.2007	2.90159	0.91
32.9352	76.56	0.1673	2.71961	1.56
35.5337	71.52	0.1004	2.52647	1.46
35.9370	87.58	0.2007	2.49903	1.79
36.4358	61.89	0.2007	2.40236	1.26
39.4238	33.57	0.2007	2.28567	0.69
40.6856	31.24	0.2007	2.21765	0.64
42.3459	15.01	0.5353	2.13447	0.31
48.6385	22.72	0.4015	1.87202	0.46

h) 0,2ZnO-4Al



Pos. [°2 Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2 Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
12.4784	5984.01	0.1004	7.09369	100.00
16.4074	2076.07	0.0836	5.40279	34.69
17.7564	334.93	0.1004	4.99523	5.60
18.8464	397.36	0.0669	4.70872	6.64
19.1256	925.84	0.1004	4.64060	15.47
20.0303	1979.98	0.1171	4.43299	33.09
22.3146	1070.80	0.1004	3.98411	17.89
23.5031	958.80	0.0836	3.78526	16.02
25.1381	1551.25	0.1338	3.54265	25.92
27.4794	1024.31	0.0836	3.24589	17.12
28.2795	544.15	0.0669	3.15585	9.09
31.4511	270.04	0.0836	2.84448	4.51
33.3703	351.13	0.1004	2.68514	5.87
35.8805	74.71	0.2007	2.50284	1.25
37.1405	151.42	0.1673	2.42077	2.53
37.4268	265.35	0.0502	2.40291	4.43
38.2178	162.42	0.2007	2.35498	2.71
39.2448	151.01	0.0502	2.29569	2.52
40.5503	48.09	0.2007	2.22474	0.80
41.9207	142.47	0.1171	2.15513	2.38
42.3327	218.23	0.1004	2.13510	3.65
42.7502	122.26	0.1673	2.11522	2.04
44.0996	271.92	0.0669	2.05357	4.54
44.6317	217.57	0.0612	2.02864	3.64
45.4341	239.07	0.1004	1.99631	4.00
46.2790	163.36	0.1004	1.96181	2.73
47.2624	129.50	0.2676	1.92326	2.16

Lampiran 2: ICDD ZnO

Name and formula

Reference code:	01-080-0074
Compound name:	Zinc Oxide
ICSD name:	Zinc Oxide
Empirical formula:	OZn
Chemical formula:	ZnO

Crystallographic parameters

Crystal system:	Hexagonal
Space group:	P63mc
Space group number:	186
a (Å):	3, 2535
b (Å):	3, 2535
c (Å):	5, 2151
Alpha (°):	90, 0000
Beta (°):	90, 0000
Gamma (°):	120, 0000
Calculated density (g/cm ³):	5, 65
Volume of cell (10 ⁶ pm ³):	47, 81
Z:	2, 00
RIR:	5, 44

Subfiles and quality

Subfiles:	Alloy, metal or intermetallic Corrosion ICSD Pattern Inorganic Pharmaceutical
Quality:	Calculated (C)

Comments

ICSD collection code:	067848
Creation Date:	01/01/1970
Modification Date:	01/01/1970
ICSD Collection Code:	067848. Rietveld profile refinement applied
Calculated Pattern Original Remarks:	REM K ZnO obtained from beta-Zn(OH)Cl
Temperature Factor:	ITF. Microstructural characterization of nanocrystals of ZnO and CuO obtained from basic

salts. b2 (P63MC). AX.

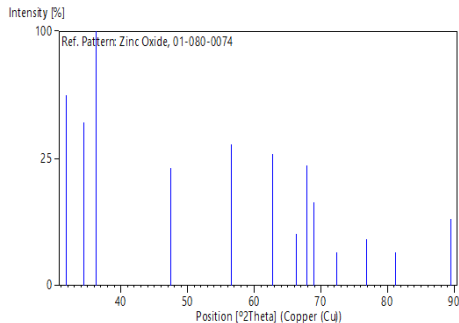
References

Primary reference: *Calculated from ICSD using POWD-12+ +, (1997)*
Structure: Garcia-Martinez, O., Rojas, R.M., Vila, E., Martin de Vidales, J.L., *Solid State Ionics*, **63**, 442, (1993)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	0	0	2,81761	31,732	56,4
2	0	0	2	2,60755	34,364	41,4
3	1	0	1	2,47894	36,207	100,0
4	1	0	2	1,91378	47,469	21,6
5	1	1	0	1,62675	56,526	30,7
6	1	0	3	1,47945	62,754	27,0
7	2	0	0	1,40881	66,292	4,1
8	1	1	2	1,38019	67,851	22,2
9	2	0	1	1,36006	68,995	10,7
10	0	0	4	1,30378	72,431	1,7
11	2	0	2	1,23947	76,848	3,4
12	1	0	4	1,18324	81,235	1,7
13	2	0	3	1,09451	89,463	6,9

Stick Pattern



Lampiran 3: ICDD Zinc Acetate Hydrate

Name and formula

Reference code:	00-033-1464
Compound name:	Zinc Acetate Hydrate
PDF index name:	Zinc Acetate Hydrate
Empirical formula:	$C_4H_{10}O_6Zn$
Chemical formula:	$C_4H_6O_4Zn \cdot 2H_2O$
Second chemical formula:	$Zn (C_2H_3O_2)_2 \cdot 2H_2O$

Crystallographic parameters

Crystal system:	Monoclinic
Space group:	C2/c
Space group number:	15

a (Å):	14,4310
b (Å):	5,3400
c (Å):	10,9810
Alpha (°):	90,0000
Beta (°):	99,8800
Gamma (°):	90,0000
Calculated density (g/cm ³):	1,75
Volume of cell (10 ⁶ pm ³):	833,66
Z:	4,00
RIR:	-

Subfiles and quality

Subfiles:	Common Phase Forensic Inorganic NBS pattern Organic Star (S)
Quality:	

Comments

Color:	Colorless
Creation Date:	01/01/1970
Modification Date:	01/01/1970
Color:	Colorless
Sample Source or Locality:	The sample was obtained from J.T.

Baker Chemical Company,
Phillipsburg, New Jersey, USA

Temperature of Data Collection:

Pattern at 25 C

Additional Patterns:

To replace 00-014-0902.

References

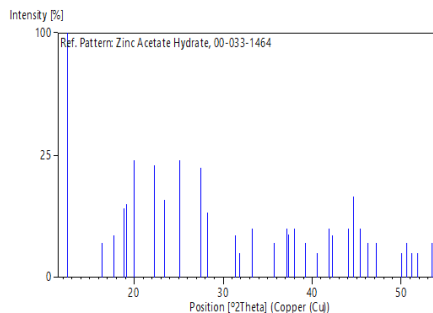
Primary reference:

Natl. Bur. Stand. (U.S.) Monogr.
25, 18, 78, (1981)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	2	0	0	7,10000	12,457	100,0
2	0	0	2	5,41100	16,369	2,0
3	1	1	0	5,00400	17,710	3,0
4	-2	0	2	4,71400	18,809	8,0
5	-1	1	1	4,64500	19,091	9,0
6	1	1	1	4,43600	20,000	23,0
7	2	0	2	3,98700	22,280	21,0
8	-1	1	2	3,78900	23,460	10,0
9	3	1	0	3,54500	25,100	23,0
10	3	1	1	3,24500	27,464	20,0
11	-3	1	2	3,15800	28,236	7,0
12	1	1	3	2,84600	31,407	3,0
13	3	1	2	2,80500	31,878	1,0
14	-2	0	4	2,68800	33,305	4,0
15	5	1	0	2,50900	35,759	2,0
16	-5	1	2	2,42100	37,105	4,0
17	2	2	1	2,40300	37,393	3,0
18	5	1	1	2,36600	38,000	4,0
19	-3	1	4	2,29600	39,205	4,0
20	-5	1	3	2,22300	40,548	1,0
21	5	1	2	2,15500	41,887	4,0
22	-4	2	1	2,13700	42,257	3,0
23	4	2	1	2,05400	44,052	4,0
24	-1	1	5	2,03000	44,600	11,0
25	2	2	3	1,99700	45,378	4,0
26	-3	1	5	1,96100	46,259	2,0
27	-7	1	1	1,92400	47,202	2,0
28	7	1	1	1,82030	50,070	1,0
29	-7	1	3	1,80380	50,560	2,0
30	2	2	4	1,78270	51,201	1,0
31	4	2	3	1,76000	51,911	1,0
32	6	2	1	1,71350	53,429	2,0

Stick Pattern



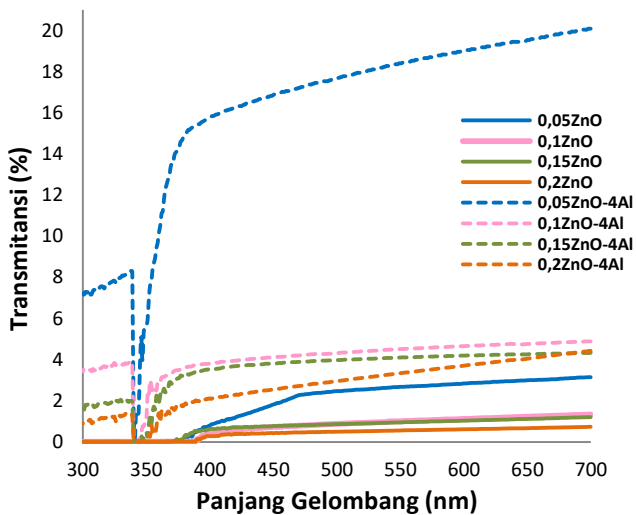
Lampiran 4: Perhitungan *Thickness Thin Film*

Metode yang digunakan untuk menghitung thickness (ketebalan) *thin film* dengan menggunakan Metode *Swanepoel's Envelope* untuk mengestimasi ketebalan dari *thin film* dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$d = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_1 n_2 - \lambda_2 n_1)}$$

Dimana :

- d = ketebalan *thin film* (nm)
- λ_1, λ_2 = panjang gelombang (nm)
- n_1, n_2 = indeks bias pada panjang gelombang tertentu



Berikut adalah hasil perhitungan ketebalan *thin film* dengan metode *Swanepoel's Envelope* menggunakan spektrum transmittansi.

a) Tanpa Doping

Sampel	λ_1	λ_2	n_1	n_2	d (nm)	$d_{rata-rata}$ (nm)
0,05ZnO	407	449	1,83481	1,86908	1447,782	2210,185
	470	521	2,07003	2,21448	3249,519	
	609	651	2,20492	2,18861	1933,254	
0,1ZnO	422	438	1,67872	1,67777	3390,234	3268,91
	448	464	1,62843	1,62707	3898,404	
	603	617	2,96981	2,91625	2518,092	
0,15ZnO	394	400	1,67156	1,65052	4301,265	3871,846
	401	418	1,67072	1,68871	3955,514	
	604	619	2,95491	2,93615	3358,761	
0,2ZnO	435	445	1,81592	1,81149	4818,651	5743,645
	447	461	1,75593	1,76843	5424,681	
	558	609	1,48689	1,57922	6987,604	

b) Doping Al

Sampel	λ_1	λ_2	n_1	n_2	d (nm)	$d_{rata-rata}$ (nm)
0,05ZnO- 4Al	386	431	1,48547	1,48701	1255,498	2014,214
	446	446	1,51817	1,59266	2428,819	
	576	626	1,63475	1,64393	2358,324	
0,1ZnO- 4Al	364	395	1,25757	1,24092	1595,9	2683,617
	441	479	1,40935	1,46983	3928,617	
	548	592	1,52947	1,53511	2526,334	
0,15ZnO- 4Al	443	471	2,00246	2,04663	2857,888	3172,967
	490	509	2,05275	2,05312	3212,423	
	558	580	2,04762	2,04426	3448,59	
0,2ZnO- 4Al	404	425	1,53550	1,53598	2678,275	3344,288
	446	465	1,54571	1,55746	4297,771	
	657	667	2,39473	2,32208	3056,819	

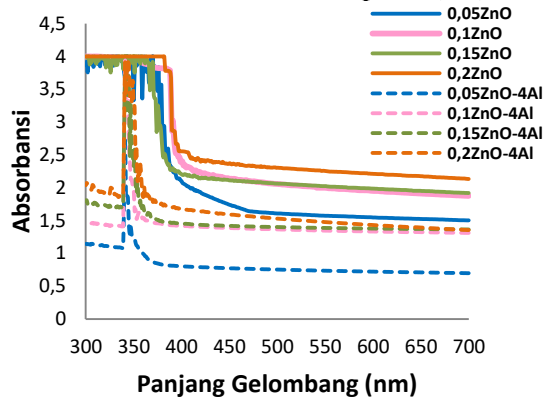
Lampiran 5: Perhitungan Bandgap

Energi gap (band gap) dapat dihitung dengan *metode Tauc Plot* atau menggunakan persamaan,

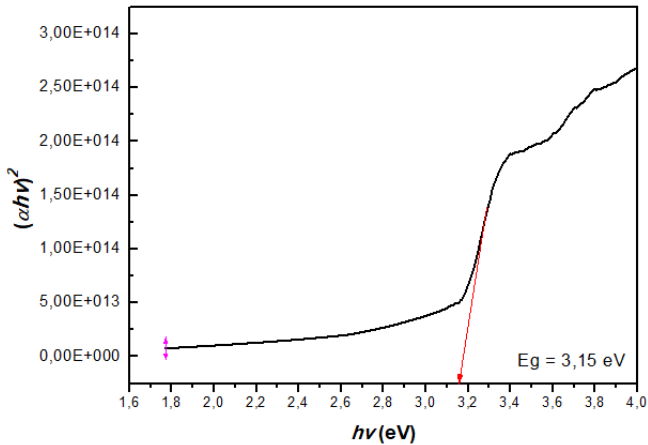
$$(\alpha h\nu)^2 = A (h\nu - E_g), \quad \alpha = \frac{2,303 A}{d}$$

Dimana :

- α = koefisien absorptansi
- $h\nu$ = energi foton
- A = konstanta absorptansi
- E_g = Energi gap (eV)
- d = ketebalan lapisan (nm)



Panjang Gelombang (nm)	Absorbansi (0,05ZnO)
395	2,143
394	2,198
393	2,247
392	2,231
391	2,248
390	2,285
389	2,326



Panjang gelombang yang digunakan adalah 392 nm

$$hv = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240}{\lambda} = \frac{1240}{392} = 3,15521628$$

Konstanta absorptansi (A) pada panjang gelombang 392 nm sebesar 2,231

$$\alpha = \frac{2,303 A}{d} = \frac{2,303 \times (2,231)}{2210,185 \times 10^{-9}} = 2341557,014$$

Didapatkan

$$\begin{aligned} (\alpha hv)^2 &= (2341557,014 \times 3,15521628)^2 \\ &= 3,40486E+1 \end{aligned}$$

Perhitungan dilakukan untuk setiap panjang gelombang (300-700 nm) sehingga dapat menghasilkan grafik $(\alpha hv)^2$ vs energi foton, kemudian ditarik garis lurus untuk mendapatkan E_g (Tauc Plot).

Lampiran 6: Perhitungan Sensitivitas Sensor Gas

$$\% S = \frac{R_o - R_g}{R_o} \times 100\%$$

a) Pengujian Sensitivitas 0,05ZnO

Temperatur (°C)	ppm	R _o (MΩ)	R _g (MΩ)	Sensitivitas (%)
100	25	0	0	0,00
	50	0	0	0,00
	75	0	0	0,00
	90	0	0	0,00
150	25	0	0	0,00
	50	0	0	0,00
	75	0	0	0,00
	90	0	0	0,00
200	25	0	0	0,00
	50	0	0	0,00
	75	0	0	0,00
	90	0	0	0,00
250	25	29,658	23,931	19,310
	50	30,172	22,270	26,189
	75	33,711	22,939	31,956
	90	31,397	19,869	36,717

b) Pengujian Sensitivitas 0,1ZnO

Temperatur (°C)	ppm	Ro (MΩ)	Rg (MΩ)	Sensitivitas (%)
100	25	0	0	0
	50	0	0	0
	75	0	0	0
	90	0	0	0
150	25	0	0	0
	50	0	0	0
	75	0	0	0
	90	0	0	0
200	25	43,471	37,724	13,220
	50	45,810	34,581	24,511
	75	57,209	37,904	33,744
	90	62,949	39,738	36,873
250	25	27,217	17,546	35,533
	50	27,205	16,384	39,777
	75	23,146	13,847	40,178
	90	24,139	13,638	43,501

c) Pengujian Sensitivitas 0,15ZnO

Temperatur (°C)	ppm	Ro (MΩ)	Rg (MΩ)	Sensitivitas (%)
100	25	0	0	0
	50	0	0	0
	75	0	0	0
	90	0	0	0
150	25	62,814	56,263	10,429
	50	79,762	59,581	25,301
	75	85,685	61,431	28,306
	90	97,307	62,775	35,488
200	25	43,657	30,482	30,179
	50	37,036	23,893	35,486
	75	39,268	23,068	41,256
	90	38,297	21,849	42,947
250	25	17,745	11,272	36,479
	50	16,995	9,281	45,390
	75	16,546	8,394	49,269
	90	15,464	7,654	50,507

d) Pengujian Sensitivitas 0,2ZnO

Temperatur (°C)	ppm	R _o (MΩ)	R _g (MΩ)	Sensitivitas (%)
100	25	0	0	0
	50	0	0	0
	75	0	0	0
	90	0	0	0
150	25	35,095	27,133	22,688
	50	41,579	30,893	25,702
	75	43,058	29,740	30,931
	90	69,650	40,519	41,824
200	25	35,011	23,895	31,750
	50	36,843	22,922	37,785
	75	49,127	28,793	41,391
	90	50,670	25,503	49,669
250	25	6,583	4,006	39,144
	50	6,400	3,431	46,396
	75	3,886	1,882	51,572
	90	3,721	1,656	55,482

e) Pengujian Sensitivitas 0,2ZnO-4Al

Temperatur (°C)	ppm	R _o (MΩ)	R _g (MΩ)	Sensitivitas (%)
100	25	57,997	46,785	19,331
	50	73,342	58,907	19,682
	75	89,127	70,691	20,685
	90	92,547	72,765	21,375
150	25	5,599	4,259	23,930
	50	7,252	5,368	25,982
	75	8,917	5,883	34,021
	90	6,495	3,695	43,109
200	25	1,570	1,009	35,747
	50	1,722	1,030	40,153
	75	1,668	0,974	41,569
	90	1,434	0,626	56,377
250	25	0,526	0,320	39,221
	50	0,546	0,247	54,688
	75	0,551	0,219	60,293
	90	0,416	0,160	61,582

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Penulis yang bernama lengkap Firdos Nur Fadillah, dilahirkan di Cirebon, 14 Oktober 1996. Merupakan putri dari Bapak Sundoro dan Ibu Mimin Mintarsih. Penulis anak ke-1 dari 2 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu TK Merpati, SDN 1 Susukan Agung (2003-2009), SMPN 1 Lemahabang (2009-2012), SMA Negeri 2 Cirebon (2012-2015) dan penulis diterima menjadi mahasiswa di Departemen Teknik

Material, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember melalui jalur SBMPTN pada tahun 2015. Selama berkuliah di Departemen Teknik Material FTI-ITS, penulis mengikuti organisasi HMMT FTI-ITS, LDJ Ash-Haabul Kahfi, dan NACE SC-ITS. Di Departemen Teknik Material FTI-ITS, penulis mengambil Tugas Akhir dalam Bidang Studi Metalurgi Manufaktur dengan judul **“Analisis Pengaruh Konsentrasi Prekursor dan Doping Aluminium terhadap Karakteristik Thin Film ZnO Sebagai Aplikasi Sensor Gas SO₂ dengan Metode Deposisi Spray Pyrolysis”**. Alamat penulis saat ini adalah Keputih Perintis 1A no.9, Sukolilo, Surabaya. Nomor telepon penulis 089676646586 dan e-mail : firdosnurfadillah96@gmail.com.