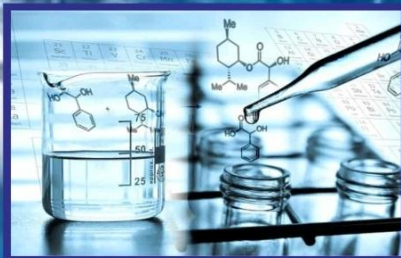
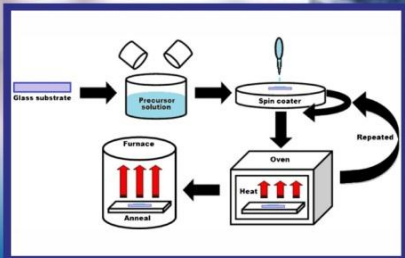
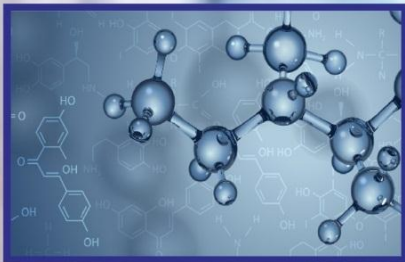


Dr.Budi Astuti, M.Sc. | Nur Hamid, S.Si.
Prof. Dr. Putut Marwoto, M.S.
Fianti, S.Si., M.Si., Ph.D. | Dr. Sugianto, M.Si.

SINTESIS FILM TIPIS ZnO:Cu DENGAN METODE SOL GEL SPIN COATING: PENGARUH SPINNING RATE & KONSENTRASI DOPING



Penerbit
LAKEISHA

SINTESIS FILM TIPIS ZnO:Cu
DENGAN METODE SOL GEL SPIN COATING:
PENGARUH SPINNING RATE & KONSENTRASI DOPING

Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta

Pasal 1:

1. Hak Cipta adalah hak eksklusif pencipta yang timbul secara otomatis berdasarkan prinsip deklaratif setelah suatu ciptaan diwujudkan dalam bentuk nyata tanpa mengurangi pembatasan sesuai dengan ketentuan peraturan perundang undangan.

Pasal 9:

2. Pencipta atau Pengarang Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam pasal 8 memiliki hak ekonomi untuk melakukan: a. Penerbitan Ciptaan; b. Penggandaan Ciptaan dalam segala bentuknya; c. Penerjemahan Ciptaan; d. Pengadaptasian, Pengaransemen, atau Pentransformasian Ciptaan; e. Pendistribusian Ciptaan atau salinan; f. Pertunjukan Ciptaan; g. Pengumuman Ciptaan; h. Komunikasi Ciptaan; dan i. Penyewaan Ciptaan.

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

1. Setiap orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000,00 (seratus juta rupiah).
2. Setiap orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

Dr. Budi Astuti, M.Sc.
Nur Hamid, S.Si.
Prof. Dr. Putut Marwoto, M.S.
Fianti, S.Si., M.Si., Ph.D.
Dr. Sugianto, M.Si.

SINTESIS FILM TIPIS ZnO:Cu

DENGAN METODE SOL GEL SPIN COATING:

PENGARUH SPINNING RATE & KONSENTRASI DOPING



Penerbit Lakeisha
2021

SINTESIS FILM TIPIS ZnO:Cu DENGAN METODE SOL GEL SPIN COATING: PENGARUH SPINNING RATE & KONSENTRASI DOPING

Penulis:

Dr. Budi Astuti, M.Sc.

Nur Hamid, S.Si.

Prof. Dr. Putut Marwoto, M.S.

Fianti, S.Si., M.Si., Ph.D.

Dr. Sugianto, M.Si.

Editor : Andriyanto, S.S., M.Pd.

Layout: Yusuf Deni Kristanto, S.Pd.

Desain Cover: Tim Lakeisha

Cetak I Juli 2021

15,5 cm × 23 cm, 91 Halaman

ISBN: 978-623-6322-48-2

Diterbitkan oleh Penerbit Lakeisha

(Anggota IKAPI No.181/JTE/2019)

Redaksi

Jl. Jatinom Boyolali, Srikaton, Rt.003, Rw.001,

Pucangmiliran, Tulung, Klaten, Jawa Tengah

Hp. 08989880852, Email: penerbit_lakeisha@yahoo.com

Website: www.penerbitlakeisha.com

Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan

dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.
Alhamdulillah rabbil 'alamin. Segala puji bagi Allah SWT atas segala nikmat, rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan buku monografi dengan judul Sintesis Film Tipis ZnO:Cu dengan Metode Sol Gel Spin Coating: Pengaruh Spinning rate & Konsentrasi Doping. Selama proses penyusunan buku monografi ini, penulis banyak sekali mendapat bantuan dari berbagai pihak, karena itu ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada segenap dosen Fisika FMIPA UNNES dan teman-teman di Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) Serpong Tangerang Selatan, Banten, INDONESIA.

Buku ini menyajikan secara praktis dan lengkap sehingga dapat membantu para siswa, mahasiswa, dosen, guru serta para praktisi industri. Cakupan dan penekanan materi yang disajikan dapat membantu memberi sumbangan pemikiran dalam mendukung pemecahan masalah yang muncul pada teknologi film tipis untuk aplikasi sel surya. Oleh karena itu, buku monografi ini disusun secara integratif antardisiplin ilmu, yaitu bahan semikonduktor, metode film tipis spin coating, deposisi film tipis dengan variasi spinning rate dan konsentrasi doping, hasil karakterisasi yang didasarkan struktur dan sifat optiknya sehingga diperoleh informasi

bahwa film tipis yang diperoleh dapat diaplikasikan sebagai lapisan absorber pada aplikasi sel surya.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dan jauh dari kesempurnaan pada buku monografi ini. Untuk itu, penulis sangat terbuka menerima kritik saran membangun sehingga secara bertahap penulis dapat memperbaikinya. Penulis mengucapkan selamat membaca dan memahami sintesis film tipis ZnO:Cu dengan metode spin coating yang dijelaskan dalam buku ini. Semoga bermanfaat dan dapat memberikan tambahan informasi bagi pembaca yang mengawali untuk memahami film tipis ZnO:Cu pada aplikasi sel surya. Akhir kata, penulis berharap semoga pembaca mendapatkan manfaat dari buku ini. Amin, ya Rabbal 'alamin.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Semarang, Juni 2021

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Permasalahan.....	4
1.3 Penelitian Film Tipis ZnO dengan Beberapa Jenis Dopan.....	4
1.4 Manfaat yang Diharapkan.....	7
BAB 2 MATERIAL SEMIKONDUKTOR.....	8
2.1 Bahan Semikonduktor.....	8
2.2 Semikonduktor Intrinsik (Murni).....	8
2.3 Semikonduktor Ekstrinsik (Tak Murni).....	11
2.4 Semikonduktor Senyawa II-VI dan III-V.....	14
BAB 3 MATERIAL SEMIKONDUKTOR ZnO.....	17
3.1 Material ZnO.....	17

3.2	Struktur Kristal ZnO.....	18
3.3	Material Cooper (Cu)	20
3.4	Material ZnO:Cu	20
BAB 4 METODE DEPOSISI FILM TIPIS		24
4.1	Metode Deposisi Film Tipis	24
4.2	Metode Sol-gel Spin Coating.....	25
BAB 5 SINTESIS FILM TIPIS ZnO:Cu DENGAN METODE SOL-GEL SPIN COATING.....		29
5.1	Persiapan Substrat	29
5.2	Pembuatan Larutan Sol-Gel ZnO:Cu	29
5.3	Deposisi Film Tipis ZnO:Cu.....	31
5.4	Proses Annealing Film Tipis ZnO:Cu	31
BAB 6 PENGARUH SPINNING RATE TERHADAP KULAITAS FILM TIPIS ZNO:CU.....		36
6.1	Teori Proses Spin Coating	36
6.2	Deskripsi proses spin coating.....	39
6.3	Proses Sintesis Film Tipis ZnO:Cu dengan variasi Spinning Rate.....	43
6.4	Struktur Film Tipis ZnO:Cu	44
6.5	Morfologi Film Tipis ZnO:Cu	49
BAB 7 PENGARUH KONSENTRASI DOPING TERHADAP PENURUNAN NILAI ENERGI BAND GAP FILM TIPIS ZnO:Cu		51
7.1	Pembuatan Film Tipis ZnO:Cu dengan variasi Konsentrasi Doping Cu	51
7.2	Sifat Optik Film Tipis ZnO:Cu	53

7.3	Morfologi dan Unsur Kimia Penyusun Film Tipis ZnO:Cu	60
7.4	Pengujian Struktur Film Tipis ZnO:Cu dengan XRD	64
BAB 8	PENUTUP	72
DAFTAR PUSTAKA		73
INDEKS		88
GLOSARIUM		90

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Energi gap ZnO dengan berbagai material dopan	4
Tabel 2.1	Tingkatan energi dari donor (Golongan V) dan aseptor (Golongan III) pada germanium (Ge) dan silikon (Si) (Solymer <i>et al.</i> , 2014).....	12
Tabel 2.2	Semikonduktor golongan IV, III-V dan II-VI (Solymer <i>et al.</i> , 2014).....	15
Tabel 5.1	Massa Cu dan Zn dalam gram.....	30
Tabel 6.1	Struktur dan konstanta kisi film tipis ZnO:Cu untuk variasi <i>spinning rate</i>	47
Tabel 7.1	Massa dari unsur Cu dan Zn	52
Tabel 7.2	Energi band gap film tipis ZnO:Cu	58
Tabel 7.3.	<i>Atomic dan Weight concentration</i> film tipis ZnO:Cu...	63
Tabel 7.4	Nilai TC untuk film tipis ZnO:Cu dengan variasi doping Cu.....	66
Tabel 7.5.	Parameter struktur film tipis ZnO:Cu dengan variasi doping Cu.....	68
Tabel 7.6.	Hasil perhitungan densitas kisi, tegangan dan dislokasi film tipis ZnO:Cu.....	70

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Diagram pita energi untuk material a) isolator, b) semikonduktor dan c) konduktor.	9
Gambar 2.2 Skematik (a) ikatan kovalen silikon dalam dua dimensi dan (b) Struktur kristal silikon memperlihatkan adanya sebuah ikatan kovalen yang terputus.....	10
Gambar 2.3 Bentuk dan susunan ikatan kovalen beserta energi gap semikonduktor (a) dan (b) tipe-n (donor), serta (c) dan (d) tipe-p (aseptor) (Solymar <i>et al.</i> , 2014).....	13
Gambar 2.4 Eksitasi elektron dari pita valensi menuju pita konduksi pada semikonduktor (i) intrinsik, (ii) donor, dan (iii) aseptor (Solymar <i>et al.</i> , 2014).....	14
Gambar 3.1 Struktur Kristal <i>zinc oxide</i>	18
Gambar 3.2. Struktur kristal ZnO: (a) strukturkubus <i>rocksalt</i> , (b)struktur <i>zinc blende</i> , dan (c) sturktur <i>wurtzite</i> (Qi., 2014).....	19
Gambar 3.3 Struktur atom (a) ZnO, dan (b) ZnO doping Cu (Ma <i>et al.</i> , 2019).....	22
Gambar 3.4 Struktur pita dari (a) ZnO, dan (b) ZnO doping Cu (Ma <i>et al.</i> , 2019)	23

Gambar 4.1 Transformasi sol menjadi gel (http://www.uk-finishing.org.uk/N-COAT70/sol_gel.htm)	26
Gambar 4.2 Penumbuhan film tipis dengan metode sol gel spin coating (Ng et al, 2012)	26
Gambar 5. 1 Hamburan sinar-X pada kristal	33
Gambar 5.2 Citra morfologi permukaan dari film tipis ZnO doping Mg 5 wt% yang diputar dengan 3000rpm pada perbesaran yang berbeda	35
Gambar 6.1 Empat tahap berbeda untuk spin coating (Hellstrom 2007)	41
Gambar 6.2. Spektra Difraksi Sinar-X untuk Film Tipis ZnO:Cu dengan variasi <i>spinning rate</i>	45
Gambar 6.3 Nilai FWHM dan ukuran kristal film tipis ZnO:Cu pada bidang orientasi (002) dengan variasi <i>spinning rate</i>	49
Gambar 6.4 Citra SEM untuk film tipis ZnO:Cu dengan perbedaan <i>spinning rate</i> , a) 2400 (b) 2600 (c) 3000 (d) 3200 dan (e) 3400 rpm	50
Gambar 7.1 Spektrum Absorbansi terhadap Panjang gelombang film tipis ZnO murni dan ZnO doping Cu	55
Gambar 7.2 grafik ekstrapolasi Tauc plot untuk memperoleh Energi gap film tipis (a) ZnO, (b) ZnO:Cu (1%), (c) ZnO:Cu (2%), (d) ZnO:Cu (3%), (e) ZnO:Cu (4%), dan (f) ZnO:Cu (5%)	57
Gambar 7.3 Ilustrasi pita energi (a) ZnO* (Smirnov <i>et al.</i> , 2010) dan (b) ZnO:Cu	59
Gambar 7.4. Morfologi Permukaan Film Tipis ZnO:Cu dengan variasi doping Cu a) ZnO, b) ZnO:Cu 1%, c) ZnO:Cu 2%, d) ZnO:Cu 3%, d) ZnO:Cu 3%, e) ZnO:Cu 4%, dan d) ZnO:Cu 5%	60

Gambar 7.5. Analisis unsur penyusun film tipis **(a)** ZnO, **(b)** ZnO:Cu (1%), **(c)** ZnO:Cu (2%), **(d)** ZnO:Cu (3%), **(e)** ZnO:Cu (4%), dan **(f)** ZnO:Cu (5%)..... 62

Gambar 7.6. Grafik “EDX” *weight concentration Cu* sebagai fungsi Nominal dopan Cu..... 64

Gambar 7.7 Spektrum XRD dari Film Tipis ZnO:Cu dengan variasi konsentrasi doping Cu..... 65

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perangkat semikonduktor yang dapat mengonversi cahaya matahari menjadi energi listrik dikenal dengan *solar cell* (sel surya). Sementara, teknologi yang digunakan untuk mengonversi cahaya matahari menjadi energi listrik secara langsung disebut dengan *photovoltaic*. Sel surya menjadi bahan yang sangat menjanjikan dalam penyediaan sumber energi listrik menggantikan fosil. Perkembangan sel surya sangat pesat. Bahkan, saat ini sudah masuk ke generasi sel surya ketiga. Generasi sel surya pertama dibuat dari bahan silikon kristal tunggal. Generasi sel surya pertama menghasilkan efisiensi yang sangat tinggi, namun permasalahan timbul dalam penyediaan bahan silikon kristal tunggal yang memerlukan biaya sangat mahal. Dengan demikian, para peneliti mencari alternatif lain dengan menggunakan wafer silikon polikristal.

Penggunaan wafer silikon polikristal ini, menjadikan sel surya banyak dikembangkan dan diproduksi secara masal, sehingga saat ini sebagian besar panel surya yang beredar adalah dibuat dengan *screen printing*. Namun demikian hasil efisiensi konversinya lebih rendah dari silikon kristal tunggal. Kemudian dikembangkan sel surya generasi kedua yang terbuat dari teknologi lapisan tipis (film tipis). Teknologi film tipis dikembangkan untuk mengurangi biaya produksi dimana dengan teknologi film tipis hanya memerlukan bahan baku sekitar 1% dari bahan baku silikon dengan menggunakan wafer silikon. Selain itu, dengan teknologi film tipis, sel surya yang dibuat bias lebih bervariasi dari bahan-bahan gabungan seperti Cadmium Telluride (CdTe), Copper Indium

Gallium Selenide (CIGS), dan lainnya. Untuk generasi ketiga sel surya adalah dibuat dari bahan polimer atau sel surya organik atau sel surya foto elektrokimia.

Sel surya banyak digunakan karena memiliki beberapa keunggulan seperti efisiensi konversi energi listrik yang cukup tinggi dengan biaya pembuatan yang relatif murah, bahkan dapat dibuat dari bahan organik seperti sel surya generasi ketiga tersebut (Kim *et al.*, 2019; Sharma *et al.*, 2015; Sun *et al.*, 2018; Zhao *et al.*, 2016). Selain itu, kelebihan yang lain seperti dapat dideposisi pada substrat yang lentur sehingga menghasilkan device solar sel yang fleksibel. Oleh karena itu, teknologi pada sel surya terus dikembangkan dan diperbarui baik dari segi teknik, maupun materialnya guna mendapatkan efisiensi yang lebih tinggi dengan harga yang lebih terjangkau.

Sel surya dengan teknologi film tipis memiliki beberapa lapisan seperti lapisan *windows*, *absorber*, *back contact*, dan substrat (Buwarda, 2019). Pada bagian *windows layer*, material yang digunakan dalam lampiran ini mensyaratkan mempunyai kemampuan untuk mentransmisikan cahaya matahari yang tinggi (Mia *et al.*, 2017). Selanjutnya, cahaya yang ditransmisikan akan ditangkap/disimpan pada lapisan berikutnya berupa lapisan absorber (Tumbul *et al.*, 2019). Sesuai fungsinya sebagai penyerap, maka lapisan absorber mensyaratkan bahan yang digunakan harus memiliki energi band gap yang kurang dari 3,10 eV. Dengan demikian, lapisan absorber dapat menyerap panjang gelombang cahaya tampak yang lebih besar.

Teknologi film tipis yang telah banyak dikembangkan sebagai lapisan absorber adalah, yaitu Cadmium Teluride (CdTe) (Bai *et al.*, 2011; Marwoto *et al.*, 2012), Copper Indium Galium Sulfide (CIGS) (Sim *et al.*, 2019), $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) (Tumbul *et al.*, 2019), CuInSe_2 (Fianti & Kim, 2015), Zinc Oxide (ZnO) (Kaviyarasu *et al.*, 2019), dan lain-lain. Bahan CdTe memiliki kekurangan dimana jika rumah yang atapnya dipasang sel surya

CdTe terbakar, unsur Cadmium ini akan menimbulkan polusi yang membahayakan bagi manusia. Sementara untuk bahan CIGS, bahan baku untuk Indium merupakan unsur tanah yang sangat sedikit ketersediaannya di bumi. Hal tersebut menyebabkan harga Indium menjadi mahal. Dengan demikian mempengaruhi harga produksi untuk pembuatan bahan CIGS menjadi mahal juga. Untuk itu, dikembangkan lapisan absorber berbasis film tipis ZnO.

Lapisan absorber ini dapat dibuat dengan bahan semikonduktor senyawa paduan golongan II-VI, dimana ZnO mempunyai karakteristik seperti berstruktur kristal wurtzite dengan jarak antar ke kisi $a = 3,25 \text{ \AA}$ dan $c = 5,21 \text{ \AA}$ serta energi gap 3,25 eV dengan titik leleh yang relatif tinggi 2248 K (Arif et al., 2018; Astuti et al., 2020; Roguai & Djelloul, 2020; Smirnov et al., 2010). Material ZnO juga merupakan bahan semikonduktor tipe-n dan Transparent Conducting Oxide (TCO) (Acosta et al, 2018; Lung et al, 2017). Material ZnO yang telah dibuat menjadi film tipis memiliki kemampuan absorbansi yang rendah dan transmitansi yang tinggi sehingga banyak diaplikasikan sebagai *window layer* pada sel surya (Marwoto et al., 2015). Film tipis ZnO juga dapat diaplikasikan sebagai lapisan absorber pada sel surya ketika memiliki kemampuan absorbansi yang tinggi dan energi gap kurang dari 3,10 eV (Kaviyarasu et al., 2019). Oleh karena itu, material ZnO perlu diperbaiki nilai energi gapnya dengan cara menambahkan material lain sebagai pengotor atau dopan.

Tujuan menambahkan dopan pada film tipis ZnO adalah untuk mengubah jarak antara pita valensi dan pita konduksi atau yang dikenal dengan band gap. Ketika dopan dengan nilai band gap yang lebih tinggi diberikan pada film ZnO, maka jarak antarpita valensi ke pita konduksi menjadi lebih lebar (Lany, 2015; Zhang et al., 2012). Sebaliknya, ketika dopan yang ditambahkan berasal dari senyawa logam oksida dengan energi gap lebih kecil dari ZnO maka jarak antara pita valensi menjadi lebih pendek, sehingga memenuhi syarat sebagai lapisan absorber sel surya (Ma et al., 2019).

1.2 Permasalahan

Penelitian mengenai lapisan absorber terus dilakukan untuk memperoleh hasil yang baik dengan tingkat efisiensi yang tinggi. Pada penelitian ini berfokus pada permasalahan tentang: bagaimana pengaruh *spinning rate* pada kualitas film tipis yang dihasilkan dan bagaimana pengaruh doping Cu dalam memperbaiki struktur, morfologi dan sifat optik yang dimiliki oleh film tipis ZnO, sehingga dapat digunakan sebagai material absorber pada aplikasi sel surya. Penelitian ini dilakukan dengan batasan pada pengaruh konsentrasi doping Cu terhadap pembentukan (struktur dan morfologi) film tipis ZnO dan juga sifat optik seperti energi band gap. Dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat berupa informasi yang mendalam mengenai proses penumbuhan film tipis ZnO doping Cu dengan metode Sol-gel Spin Coating serta pengaruhnya terhadap struktur, morfologi dan sifat optik film tipis ZnO:Cu. Dengan demikian, akan didapatkan material yang sesuai untuk lapisan absorber pada aplikasi sel surya berbahan dasar film tipis ZnO:Cu.

1.3 Penelitian Film Tipis ZnO dengan Beberapa Jenis Dopan

Tabel 1.1 menunjukkan beberapa jenis material dopan yang telah ditambahkan pada film tipis ZnO.

Tabel 1.1 Energi gap ZnO dengan berbagai material dopan

Nama	Dopan	Metode Pembuatan	E_g (eV)
(Liu <i>et al.</i> , 2018)	Cu-N	<i>Magnetron cosputtering</i>	2,77
(Asikuzun <i>et al.</i> , 2018)	Cu	<i>Sol-gel</i>	3,24- 3,27
(Mia <i>et al.</i> , 2017)	Mg	<i>Sol-gel spin coating</i>	3,30

(Ganesh <i>et al.</i> , 2017)	Sn	<i>Sol-gel spin coating</i>	3,16
(Rherari <i>et al.</i> , 2017)	Sn/Li	<i>Spray pyrolysis</i>	3,28- 3,29
(Alamdari <i>et al.</i> , 2017)	In	<i>Dip coating</i>	3,27
(Boudjouan <i>et al.</i> , 2016)	Pb	<i>Sol-gel spin coating</i>	3,30
(Dejam <i>et al.</i> , 2016)	Al	<i>RF Magnetron sputtering</i>	3,4
(Poongodi <i>et al.</i> , 2015)	Nd	<i>Spin coating</i>	3,18
(Wang <i>et al.</i> , 2015)	Na	<i>Sol-gel</i>	3,293
(Rahmane <i>et al.</i> , 2015)	Al	<i>RF Magnetron sputtering</i>	3,32- 3,49
(Nurulhilmah, 2019)	Al	<i>DC Magnetron sputtering</i>	3,19- 3,80
(Mulyani, 2019)	Ga	<i>DC Magnetron sputtering</i>	3,86- 3,92

Material doping yang digunakan adalah Copper (II) Asetate Monohydrate ($\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{H}_2\text{O}$), dengan alasan bahwa atom Cu memiliki jejari elektron dan jumlah kulit elektron yang mirip dengan atom Zn (Liu *et al.*, 2018). Secara fisika dan kimia atom Cu memiliki fungsi untuk memperbaiki struktur dan sifat optik ZnO dengan cara substitusi atom Zn dengan atom Cu. Selain itu juga, atom Cu yang ditambahkan dalam material absorber CdTe, telah berhasil meningkatkan kualitas kristal dan menurunkan resistivitas film CdTe (Marwoto *et al.*, 2012). Konsentrasi dopan Cu yang meningkat juga dapat menurunkan energi gap ZnO menjadi 2,92 eV

(Chauban *et al.*, 2010) sekaligus meningkatkan nilai absorbansi dari film tipis ZnO.

Beberapa metode telah digunakan untuk penumbuhan film tipis ZnO seperti *chemical vapour deposition* (CVD), *radio frequency magnetron sputtering* (Samavati *et al.*, 2016; Purohit *et al.*, 2015), *direct current magnetron sputtering* (Zhu *et al.*, 2015), *spray pyrolysis* (Enigochitra *et al.*, 2016; Faraj *et al.*, 2017), dan *sol-gel spin coating* (Jacob *et al.*, 2017; Nimbalkar *et al.*, 2017). Metode *sol-gel spin coating* merupakan salah satu metode deposisi film tipis yang berorientasi pada biaya yang ekonomis (Atay dan Durmaz, 2020; Hasyim *et al.*, 2015).

Metode *sol-gel spin coating* digunakan dalam penelitian ini karena mudah dalam kontrol ketebalan, homogenitas, modifikasi komposisi, orientasi c-axis yang kuat, biaya rendah dan temperatur annealing yang rendah serta dapat diaplikasikan untuk produksi skala besar (Arif *et al.*, 2018). Kemudian, alat beberapa penelitian terdahulu telah menggunakan metode *sol-gel spin coating* untuk membuat film tipis Indium Dioxide (In_2O_3) yang menghasilkan bentuk morfologi permukaan yang homogen, seragam, dan padat tanpa lubang dan retakan (Yahia *et al.*, 2019). Hasil penelitian Hasyim *et al.* (2015) mendapatkan film tipis ZnO:Cu dengan permukaan yang halus, homogen, dan padat.

Metode *sol-gel spin coating* akan digunakan untuk membuat film tipis ZnO:Cu, di mana alat tersebut tersedia di laboratorium Jurusan Fisika Universitas Negeri Semarang. Sifat fisika film tipis ZnO:Cu akan diverifikasi dengan X-Ray Diffraction (XRD) untuk mengetahui struktur film terutama bidang orientasi kristal. Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersif X-Ray (SEM-EDX) untuk mengetahui morfologi permukaan. Dan komposisi atom penyusun film dan Spektrofotometer Ultra Violet-Visible-Near Infrared (UV-Vis-NIR) untuk mengetahui sifat optik film yang berupa absorbansi dan energi gap.

1.4 Manfaat yang Diharapkan

Informasi *spinning rate* dari *spin coater* yang digunakan akan membantu untuk proses sintesis selanjutnya untuk menghasilkan film tipis ZnO:Cu yang lebih homogen. Selanjutnya secara teoretis manfaat film tipis yang dihasilkan dapat dimanfaatkan pada beberapa bidang antara lain:

- a. Bidang fisika, khususnya zat padat/material akan memberikan harapan untuk dikembangkan lapisan absorber untuk aplikasi sel surya.
- b. Bidang industri, akan membarikan harapan komersial untuk memproduksi lapisan absorber pada aplikasi sel surya.
- c. Bidang elektronik, menjadi dasar dalam pengembangan teknologi sel surya berbasis film tipis ZnO.
- d. Bidang akademik, dapat memberikan kontribusi pemikiran tentang perkembangan lapisan absorber berbasis film tipis ZnO secara detail dari sisi struktur dan sifat optiknya.

BAB 2

MATERIAL SEMIKONDUKTOR

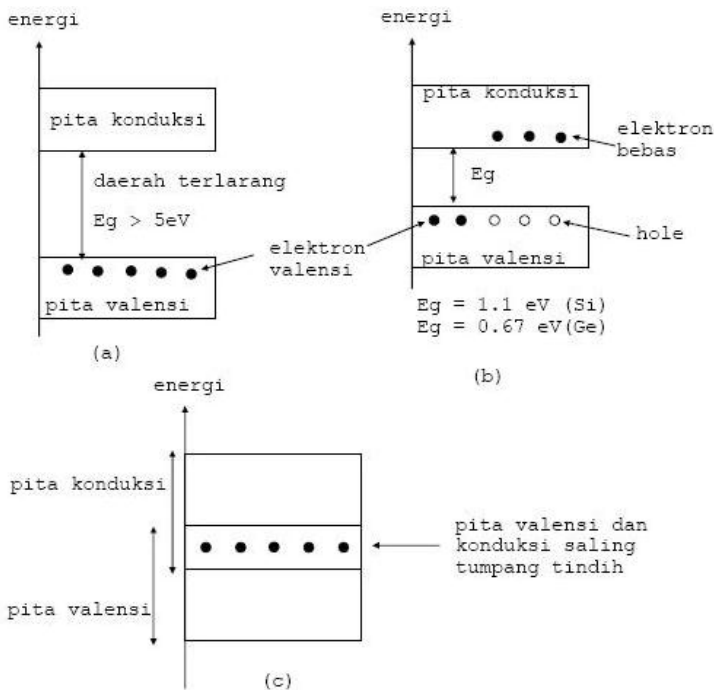
2.1 Bahan Semikonduktor

Semikonduktor merupakan material yang memiliki sifat konduktivitas di antara insulator dan konduktor ($10^{-8} - 10^3 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$), memiliki resistivitas $10^2 - 10^{-9} \Omega \text{m}$ dan energi gap mendekati $1,6 \text{ eV}$. Dengan demikian, material semikonduktor merupakan material yang sangat menarik untuk dipelajari didasarkan pada sifat yang dimiliki dapat diubah-ubah sesuai dengan tujuan yang ingin dicapai. Modifikasi terhadap sifat semikonduktor biasanya dilakukan dengan memberikan pengotor atau dopan pada semikonduktor intrinsik maupun ekstrinsik. Selain itu, material semikonduktor juga dapat dibuat dari gabungan unsur-unsur seperti unsur II-VI, III-V, dan IV-IV, serta semikonduktor amorf. Untuk semua jenis semikonduktor yang telah disebutkan akan dijelaskan secara lebih rinci sebagai berikut.

2.2 Semikonduktor Intrinsik (Murni)

Semikonduktor intrinsik atau biasa dikenal dengan semikonduktor murni merupakan semikonduktor yang tidak diberi dopan atau campuran unsur yang lain. Semikonduktor intrinsik yang banyak dikenal dan merupakan generasi pertama pada teknologi semikonduktor seperti piranti elektronik adalah silikon dan germanium. Pada temperatur OK, silikon dan germanium memiliki lebar pita terlarang (energi gap) sebesar $1,12 \text{ eV}$ dan $0,67 \text{ eV}$. Pada temperatur tersebut, pita valensi terisi penuh elektron sedangkan pita konduksi kosong sehingga material berubah menjadi bahan isolator. Ketika temperatur dinaikkan, sampai temperatur ruang (*ambient*

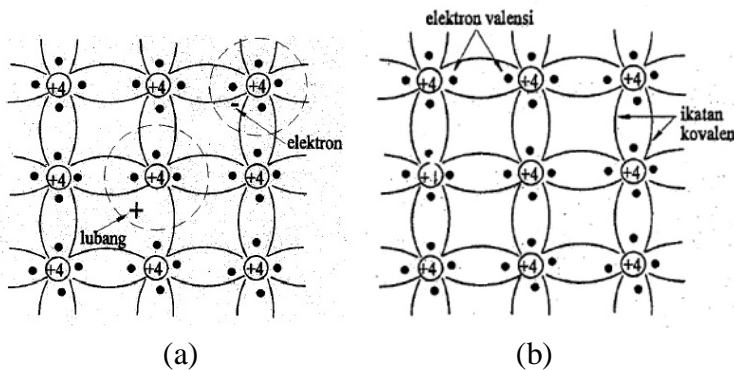
temperature) maka akan ada beberapa elektron yang memiliki energi lebih besar dari energi gap, sehingga elektron tersebut meninggalkan pita valensi menuju pita konduksi. Elektron yang terlepas tadi menjadi elektron bebas dan meninggalkan lubang (*hole*) pada pita valensi, dimana muatannya bersifat positif dan besarnya sama dengan besar muatan elektron. Gambar 2.1 menunjukkan skema pita energi untuk material semikonduktor intrinsik.



Gambar 2.1 Diagram pita energi untuk material a) isolator, b) semikonduktor dan c) konduktor.

Gambar 2.2a menunjukkan skematik ikatan kovalen untuk semikonduktor silikon (Si) dalam dua dimensi. Tiap atom terikat oleh ikatan kovalen dengan empat atom yang terikat lainnya. Ikatan kovalen dilukiskan dengan dua garis lengkung dengan dua elektron valensi di dalamnya yang digambarkan dengan titik hitam. Angka

+4 di dalam lingkaran di pusat ikatan kovalen melukiskan ion-ion yang merupakan inti atom beserta elektron-elektronnya kecuali empat elektron valensi. Selain itu, keadaan elektron yang berikatan valensi pada temperatur 0K ditunjukkan Gambar 2.2a dan Gambar 2.2b merupakan keadaan electron dalam suhu ruang. Terlihat jelas pada Gambar 2.2a, bahwa semua elektron valensi terikat kuat atau erat di dalam ikatan kovalen, dan tidak terlihat adanya elektron bebas. Hla tersebut sesuai dengan kondisi elektron pada Gambar 2.1a., yaitu pita valensi penuh dan pita konduksi kosong. Sementara itu, pada Gambar 2.2b, terlihat ada elektron yang keluar ikatan dan menjadi elektron bebas dengan meninggalkan lubang pada ikatan. Hal ini sesuai dengan keadaan pita energi pada Gambar 2.1b, dimana terdapat elektron yang berpindah ke pita konduksi dan meninggalkan lubang pada pita valensi, yang disebabkan adanya kenaikan temperatur.



Gambar 2.2 Skematik (a) ikatan kovalen silikon dalam dua dimensi dan (b) Struktur kristal silikon memperlihatkan adanya sebuah ikatan kovalen yang terputus.

Jadi berdasarkan Gambar 2.1 dapat dikatakan bahwa semikonduktor intrinsik pada temperatur 0K akan bersifat isolator dan pada suhu lebih tinggi akan bersifat sebagai konduktor karena adanya pembentukan pasangan-pasangan elektron bebas dan *hole*

yang keduanya berlaku sebagai pembawa muatan dan akan mempengaruhi sifat-sifat yang dimiliki semikonduktor tersebut.

2.3 Semikonduktor Ekstrinsik (Tak Murni)

Selanjutnya, semikonduktor ekstrinsik merupakan semikonduktor intrinsik yang telah ditambahkan pengotor, misalnya GeAs. Penambahan pengotor (*impurities*) mengubah struktur pita dan resistivitasnya. Ketidakmurnian semikonduktor juga akan mengubah lebar energi gap. Berdasarkan material pengotor pada semikonduktor murni, semikonduktor ekstrinsik dibagi menjadi 2, yaitu donor (tipe-n) dan aseptor (tipe-p).

Semikonduktor tipe-n memiliki sebuah elektron valensi ekstra yang tidak terikat oleh ikatan kovalen, misalnya GeAs, sehingga semikonduktor tipe-n menjadi lebih negatif. Germanium memiliki 4 elektron valensi sedangkan arsenik memiliki 5 elektron valensi sehingga gabungan dari GeAs memiliki kelebihan sebuah elektron. Di sisi yang lain, semikonduktor tipe-p memiliki kekurangan elektron pada sebuah ikatan kovalen sehingga semikonduktor tipe-p lebih bermuatan positif. Misalnya SiB₄, silikon memiliki 4 buah elektron valensi dan boron memiliki 3 buah elektron valensi sehingga ikatan kovalen dengan 4 lengan yang terbentuk memiliki kekurangan sebuah elektron. Informasi tentang pengaruh impuritas yang berupa donor dan aseptor pada germanium dan silikon disajikan pada Tabel 2.1.

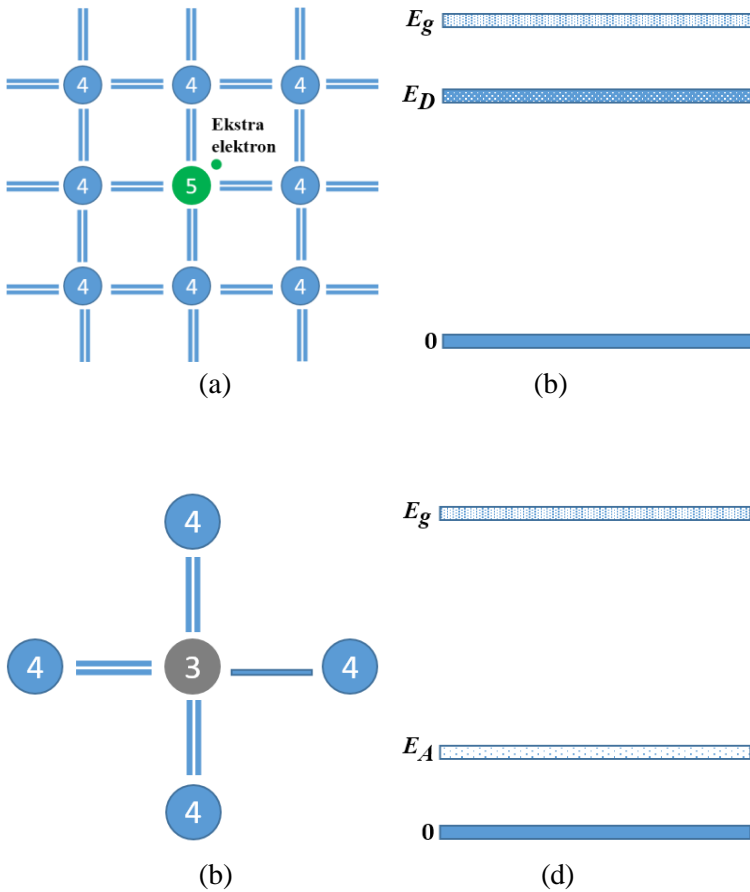
Tabel 2.1 Tingkatan energi dari donor (Golongan V) dan aseptor (Golongan III) pada germanium (Ge) dan silikon (Si) (Solymer *et al.*, 2014)

	Impuritas	Ge	Si
Donor	<i>antimony</i> (Sb)	0,0096	0,039
	<i>phosphorus</i> (P)	0,0120	0,045
	<i>arsenic</i> (As)	0,0127	0,049
Aseptor	<i>indium</i> (In)	0,0112	0,160
	<i>galium</i> (Ga)	0,0108	0,065
	<i>boron</i> (B)	0,0104	0,045
	<i>aluminium</i> (Al)	0,0102	0,057

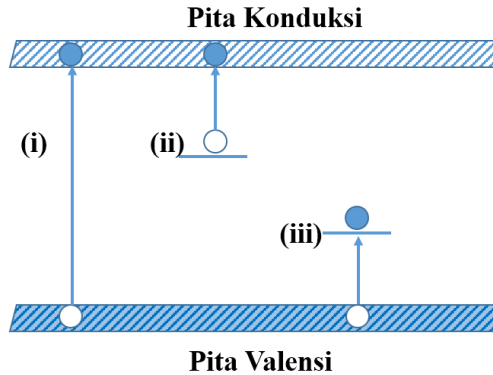
Gambar 2.3 menunjukkan susunan ikatan kovalen dan susunan pita pada semikonduktor tipe-n dan tipe-p. Penambahan material donor akan membuat kerapatan elektron meningkat. Hal tersebut mengakibatkan semikonduktor menjadi semikonduktor tipe-n. Celah energi gap menjadi semakin kecil dikarenakan kedudukan elektron donor mendekati dengan hole pada pita valensi, ditunjukkan pada Gambar 2.3b. Elektron donor memanipulasi energi gap dengan cara membuat pita valensi baru yang berada di atas pita valensi awal. Hal tersebut memudahkan eksitasi elektron menuju pita konduksi dengan energi yang lebih kecil.

Di sisi lain, semikonduktor tipe-p (aseptor) juga memiliki energi gap yang kecil. Hal ini disebabkan oleh bertambahnya kerapatan *hole*. Pada susunan pita, *hole* memanipulasi energi gap dengan membuat pita konduksi baru yang kedudukannya lebih dekat dengan pita valensi, ditunjukkan pada Gambar 2.3d. Kondisi tersebut menyebabkan elektron lebih mudah tereksitasi menuju dan

menempati hole pada pita konduksi. Dari uraian tersebut menunjukkan bahwa penambahan impuritas pada semikonduktor intrinsik menyebabkan celah pita menjadi lebih kecil, ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.1 Bentuk dan susunan ikatan kovalen beserta energi gap semikonduktor (a) dan (b) tipe-n (donor), serta (c) dan (d) tipe-p (aseptor) (Solymar *et al.*, 2014)



Gambar 2.2 Eksitasi elektron dari pita valensi menuju pita konduksi pada semikonduktor (i) intrinsik, (ii) donor, dan (iii) aseptor (Solymar *et al.*, 2014)

Dari Gambar 2.4 terlihat bahwa celah pita atau band gap menjadi lebih kecil karena kehadiran atom donor yang berada sedikit di bawah pita konduksi dan atom akseptor yang berada sedikit di atas pita valensi. Hal tersebut karena adanya perbedaan jumlah elektron valensi yang berbeda dari material host dan material dopannya. Struktur pita energi dan cara elektron menempati pita energi dapat mempengaruhi sifat-sifat yang dimiliki oleh sebuah material khususnya adalah sifat optik dan sifat listrik material tersebut.

2.4 Semikonduktor Senyawa II-VI dan III-V

Semikonduktor juga dapat dibuat dari paduan unsur golongan II-VI dan III-V. Tabel 2.2 menunjukkan beberapa contoh bahan semikonduktor dari golongan II-VI dan golongan III-V yang memiliki karakteristik seperti silikon dan germanium (golongan IV-IV). Pada temperatur rendah, golongan II-VI dan III-V bersifat sebagai insulator dikarenakan semua elektron terikat pada pita

valensi sehingga pada pita konduksi tidak terdapat elektron. Pada temperatur ruang, semikonduktor dapat bersifat sebagai penghantar arus listrik. Semakin besar temperaturnya maka akan semakin bagus pula sifatnya sebagai bahan konduktor. Hal ini disebabkan karena ketika temperatur dinaikkan maka jarak antarpita valensi dan pita konduksi (band gap) akan semakin kecil, sehingga makin banyak elektron yang berpindah dari pita valensi ke pita konduksi.

Tabel 2.2 Semikonduktor golongan IV, III-V dan II-VI (Solymar *et al*, 2014)

Semikonduktor	Energi Gap (eV)	Titik Leleh (K)	Ionic % of bond	Lattice spacing (Å)
Group IV				
C	5,4	382	0	3,56
Si	1,11	1680	0	5,43
Ge	0,67	1210	0	5,66
SiC	2,9		18	3,08 dan 5,05
Group III-V				
Al N	6,02	3070		3,11 dan 4,98
Al P	3,34	1770		5,45
Al As	2,2	1870		5,66
Al Sb	1,6	1330		6,15
Ga N	3,34	2770		3,19 dan 5,18
Ga P	2,24	1730		5,45
Ga As	1,42	1520	31	5,65
Ga Sb	0,67	980	26	6,10
In N	2,0	2475		3,54 dan 5,70

In P	1,27	1330	42	5,80
In As	0,36	1215	36	6,06
In Sb	0,17	798	32	6,48
Group II-VI				
Zn O	3,20	2248	62	4,63
Zn S	3,54	1925	62	5,41
Zn Se	2,58	1790	63	5,67
Zn Te	2,26	1658	61	6,10
Cd O	2,5	2020	79	
Cd S	2,42	1750	69	5,58
Cd Se	1,74	1512	70	6,05
Cd Te	1,44	1368	67	6,48

Berdasarkan Tabel 2.2 terlihat jelas bahwa golongan II-VI dan III-V memiliki perbedaan dengan silikon dan germanium dalam jenis ikatan yang dimiliki. Ditunjukkan bahwa ikatan ionik pada golongan II-VI dan III-V lebih kuat dibandingkan dengan silikon dan germanium, meskipun semuanya juga terikat secara kovalen.

BAB 3

MATERIAL SEMIKONDUKTOR ZnO

3.1 Material ZnO

ZnO adalah semikonduktor tipe-n celah pita langsung dengan energi ikat eksiton 60 meV dan celah pita energi sebesar 3,37 eV pada suhu kamar (Peng *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2013). Pengaruh butiran kristal halus, nano-ZnO mengubah struktur kristal dan struktur elektronik permukaannya, menghasilkan efek permukaan, volume, tunneling makroskopik dan ukuran kuantum, serta dispersi dan transparansi yang tinggi, yang tidak ditemukan pada partikel ZnO makroskopik (Acosta *et al.*, 2013; Zheng *et al.*, 2012). Dalam beberapa tahun terakhir, ZnO memiliki banyak kegunaan dan fungsi khusus dalam optik, magnet, dan mekanik, serta terdapat potensi digunakan sebagai fotokatalis dalam aplikasi energi surya, baterai, laser UV, dan bahan baterai lithium ion.

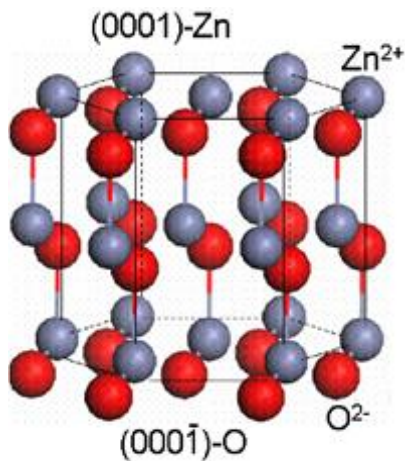
Konduktivitas listrik dalam ZnO dapat ditimbulkan karena *nonstoichiometric* yang disebabkan oleh kelebihan ion-ion *zinc* (Zn^{2+}). Kelebihan kation ini diimbangi oleh muatan negatif dengan jumlah yang sama, yaitu 2 elektron. Elektron-elektron ini bebas bergerak di dalam kristal di bawah pengaruh medan listrik luar. ZnO memiliki energi gap yang besar ~3,37 eV pada temperatur rendah dan 3,30 eV pada temperatur ruang.

Film tipis ZnO mempunyai struktur heksagonal dengan tipe kristal *wurtzite* dengan parameter kisi pada sumbu $a = 3,2495 \text{ \AA}$ dan sumbu $c = 5,2069 \text{ \AA}$. Sifat-sifat yang menarik dari material ZnO lainnya adalah anisotropi dalam struktur kristal, struktur cacat *nonstoichiometric*, transparansi optik dalam daerah cahaya tampak dan indeks bias yang cukup tinggi. Berdasarkan sifat-sifat tersebut, film

tipis ZnO dapat dimanfaatkan sebagai *window layer*, *absorber* dan elektroda depan yang sangat konduktif dan transparan pada sel surya.

3.2 Struktur Kristal ZnO

Kristal adalah zat padat yang susunan atom-atomnya atau molekulnya teratur. Partikel kristal tersusun secara berulang dan teratur serta perulangannya mempunyai rentang yang panjang. Struktur kristal terdapat pada hampir semua logam dan mineral. Suatu struktur kristal dibangun oleh sel unit, sekumpulan atom, tersusun secara khusus yang secara periodik berulang dalam tiga dimensi dalam suatu kisi. Jarak antarsel unit dalam segala arah disebut parameter kisi. Struktur dan simetri suatu zat padat mempunyai peran penting dalam menentukan sifat-sifatnya, seperti struktur pita energi dan sifat optiknya. Komposisi *nonstoichiometry* ZnO ditunjukkan pada Gambar 3.1.

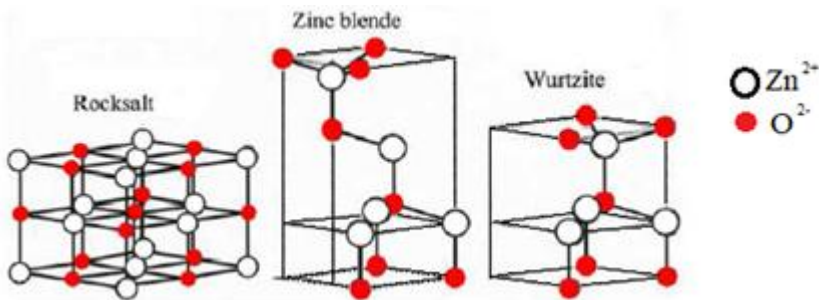


Gambar 3.1 Struktur Kristal *zinc oxide*

Film tipis ZnO merupakan material yang menarik untuk dikembangkan karena sifat fisis transparan yang tinggi pada daerah

spektrum *visible* dan *near-ultraviolet*, rentang konduktivitas yang lebar dan konduktivitas mengalami perubahan di bawah kondisi photoreduksi dan oksidasi.

Secara umum, ZnO mempunyai dua fase pembentukan struktur kristal, yaitu heksagonal dan kubus. Struktur heksagonal ZnO dikenal sebagai struktur *wurtzite* heksagonal, sedangkan struktur kubik terbagi menjadi dua, yaitu struktur kubus *zinc blende* dan kubus garam dapur (kubus *rocksalt*). Struktur yang paling stabil pada keadaan ruang, yaitu struktur *wurtzite*. Struktur *zinblend* hanya stabil jika ditumbuhkan pada medium yang memiliki struktur kubik, sedangkan struktur *rocksalt* kubik sangat jarang ditemukan kecuali pada tekanan sekitar 10 Gpa (Rahman, 2011). Jenis-jenis struktur kristal ZnO tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2. Struktur kristal ZnO: (a) strukturkubus *rocksalt*, (b)struktur *zinc blende*, dan (c) sturktur *wurtzite* (Qi., 2014)

Selain bergantung pada jenis material, struktur kristal dan ukuran butir partikel pada film tipis ZnO sangat mempengaruhi sifat optik dan elektriknya. Pada dasarnya orientasi dari nanokristal yang membentuk lapisan tipis sangat bergantung pada jenis substrat yang digunakan. Hal tersebut 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 (*preferred orientation*) dan seragam (Zakaria *et al.*, 2015).

3.3 Material Cooper (Cu)

Pada tabel periodik unsur, tembaga atau *copper* memiliki lambang Cu dan memiliki nomor atom 29 yang termasuk dalam logam transisi golongan IB dan periode 4. Bentuk struktur kristal Cu adalah kubus berpusat muka (*face centered cubic*, FCC). Unsur Cu memiliki jejari Van der Waals sebesar 140 pm dan energi gap sebesar 2,0 eV (Murali *et al.*, 2015). Selanjutnya, Dhaouadi *et al.* (2018) melaporkan bahwa energi gap film tipis *copper oxide* (CuO) sebesar 2,44 eV. Tembaga merupakan salah satu material yang memiliki konduktivitas listrik sebesar $59,6 \times 10^6 \Omega\text{m}^{-1}$ dan panas yang baik dengan nilai resistivitas listrik yang rendah, yaitu $16,78 \times 10^{-9} \Omega\text{m}$. Material Cu yang dijadikan sebagai dopan pada film tipis dapat menurunkan energi gap dari film tipis tersebut. Keunggulan dari material tembaga, yaitu harganya relatif murah dan ketersediaan di alam dalam bentuk konsentrat yang juga melimpah (Suherman, 2016).

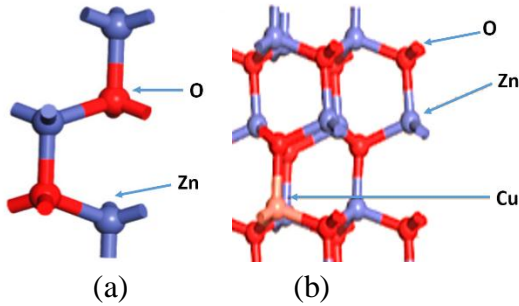
3.4 Material ZnO:Cu

ZnO merupakan semikonduktor yang memiliki energi gap cukup lebar, yaitu 3,25 eV (Smirnov *et al.*, 2010), memiliki tingkat absorbansi yang rendah (Shaikh *et al.*, 2016) dan mempunyai struktur hexagonal wurtzite. Karena keadaan setengah dari rongga tetrahedral dari struktur wurtzite ZnO tidak terisi menyebabkan struktur tersebut relatif terbuka. Keadaan yang demikian menyebabkan ZnO dapat memiliki cacat bawaan. Sebagai bahan elektronik, penting untuk mengontrol cacat bawaan yang dimiliki ZnO untuk mempermudah mengontrol sifat-sifatnya. Sifat ZnO yang didoping dengan atom logam transisi, seperti tembaga, dapat disesuaikan untuk memenuhi kebutuhan dan aplikasi tertentu. Untuk

memperbaiki energi gap dan absorpsi ZnO dengan cara penambahan material doping (Asikuzun *et al.*, 2018).

Doping dapat menyebabkan perubahan dramatis dalam sifat elektronik, optik, dan magnetik dengan mengubah struktur elektronik ZnO (Ahmed, 2017; Sarkar *et al.*, 2017; Tang *et al.*, 2018). Untuk doping tembaga, Chakraborty *et al.* (2015) menyatakan bahwa 5% - 10% ZnO yang didoping Cu memiliki nilai celah pita yang lebih rendah daripada ZnO yang tidak didoping. Konsentrasi doping yang lebih rendah menghasilkan pergeseran tepi serapan biru dibandingkan dengan ZnO yang tidak didoping. Doping tembaga mengurangi rekombinasi elektron dan *hole*, dan nilai celah pita menurun dari 3,21 eV (seng oksida) menjadi 3,07 eV. Kayani *et al.* (2018) menunjukkan bahwa ukuran kristal dari film meningkat sebagai rasio doping Cu meningkat dari 2wt% menjadi 10wt%.

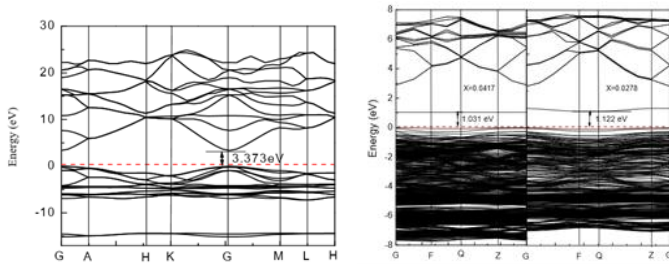
Peningkatan doping Cu menyebabkan penurunan yang tidak signifikan pada celah pita optik dari film tipis. Berbeda dengan hasil studi Liu *et al.*, (2018), menyatakan bahwa unsur Cu merupakan salah satu material yang dapat menurunkan energi gap yang dimiliki oleh ZnO. Ouidette *et al.* (2018) menemukan bahwa ukuran kristal ZnO dan nanopartikel ZnO yang didoping Cu berada dalam kisaran 32 - 38 nm dan posisi Zn yang disubstitusi secara seragam oleh dopan Cu seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.3. Hal tersebut dikarenakan jejari atom Cu (140 *pm*) hampir mirip dengan jejari atom Zn (139 *pm*) (Hanh *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2018).



Gambar 3.3 Struktur atom (a) ZnO, dan (b) ZnO doping Cu (Ma *et al.*, 2019)

Spektrum serapan optik menunjukkan pergeseran merah dari tepi serapan karena penggabungan pita pengotor ke pita konduksi (CB). Dengan meningkatnya kandungan Cu, intensitas fotoluminesensi yang terlihat berkurang karena hamburan radiasi eksitasi oleh atom dopan yang diserap permukaan dan proses rekombinasi nonradiatif yang diperkenalkan oleh pengotor Cu. Hasil Fang *et al.*, (2018) menunjukkan bahwa doping Cu tidak mengarah pada pembentukan fase sekunder, tetapi sedikit mengurangi ukuran partikel. Keadaan valensi Cu dalam ZnO dikonfirmasi menjadi +2. Dengan meningkatnya konsentrasi Cu doping, intensitas fotoluminesensi menurun di bawah panjang gelombang eksitasi 325 nm. Das *et al.* (2017) menghitung bahwa celah pita energi (E_g) ZnO berkurang dengan doping Cu, yang dapat dikaitkan dengan interaksi pertukaran sp-d antara elektron pita ZnO dan elektron d terlokalisasi dari ion Cu^{2+} . Zheng *et al.*, (2013) menghitung densitas ZnO yang didoping Cu dengan metode Becke and Johnson potential (MBJ) – Coherent Potential Approximation (CPA) yang dimodifikasi. Ditemukan bahwa tingkat pengotor elemen tembaga 0,1% berada di atas tingkat Fermi, menunjukkan bahwa ZnO yang didoping Cu adalah semikonduktor tipe-p. Posisi atom Cu berada di antara pita valensi dan pita konduksi dari ZnO. Penyisipan atom Cu di antara

kedua pita valensi menyebabkan energi gap ZnO mengecil seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Struktur pita dari (a) ZnO, dan (b) ZnO doping Cu (Ma *et al.*, 2019)

Beberapa penelitian mengenai ZnO:Cu memiliki kecenderungan diperoleh energi gap yang lebih kecil dibandingkan dengan ZnO murni, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Nilai Energi gap ZnO:Cu yang dideposisi dengan metode yang berbeda

Peneliti	Metode Deposisi	Energi Gap (eV)
Liu <i>et al.</i> , 2018	<i>Sol-gel spin coating</i>	2,77
Asikuzun <i>et al.</i> , 2018	<i>Sol-gel</i>	3,24 – 3,27
Hanh <i>et al.</i> , 2019	<i>Photocatalysis</i>	3,03 – 2,84
Kumar <i>et al.</i> , 2019	<i>Co-precipitation</i>	3,07 – 2,88
Mahajan <i>et al.</i> , 2019	<i>Precipitation</i>	3,21 – 2,91

BAB 4

METODE DEPOSISI FILM TIPIS

4.1 Metode Deposisi Film Tipis

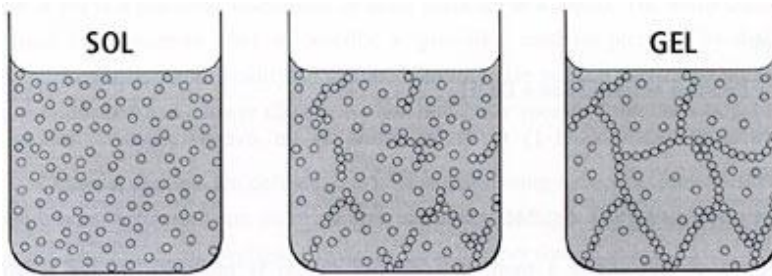
Untuk menumbuhkan film tipis ZnO dapat dilakukan dengan berbagai metode baik secara kimia maupun secara fisika. Penumbuhan film tipis secara kimia seperti *metal organic chemical vapor deposition (MOCVD)* (Xinliang *et al.*, 2014) dan *chemical vapor deposition (CVD)* (Jung *et al.*, 2015). Selanjutnya, teknik penumbuhan film tipis secara fisika diantaranya *physical-vapor deposition (PVD)* (Lee *et al.*, 2016); *molecular beam epitaxy (MBE)* (Guo *et al.*, 2014); *pulsed laser deposition* (Ogugua *et al.*, 2020). Selain metode yang telah disebutkan, teknik *sputtering* sering digunakan pada penumbuhan film tipis. Teknik *sputtering* yang banyak digunakan adalah *rf sputtering* (Lee *et al.*, 2020) dan *dc magnetron sputtering* (Astuti, 2019). Teknik *rf sputtering* merupakan teknik penumbuhan film tipis dengan memanfaatkan radio frekuensi sebesar 13,56 Hz sebagai sumber penghasil fase vapor, tapi metode ini lebih mahal dan membutuhkan alat pencocokan impedansi (Haus, 2016). Selanjutnya, metode *dc magnetron sputtering*, yaitu metode penumbuhan film tipis dengan memanfaatkan tegangan dc sebagai sumber penghasil vapor. Beberapa metode yang lain juga dapat digunakan untuk menumbuhkan film tipis ZnO seperti *sol-gel dip-coating* (Balakrishnan *et al.*, 2020), *screen printing* (Zargar *et al.*, 2019), dan *spray pyrolysis* (Dongale *et al.*, 2015). Metode-metode tersebut dapat menumbuhkan film tipis dengan kualitas film yang tinggi, tetapi teknik ini membutuhkan peralatan yang rumit (pada kontroling kestabilannya) dan mahal (Durri *et al.*, 2015). Pada buku ini dibahas lebih lengkap untuk metode *Sol-Gel spin coating*.

4.2 Metode *Sol-gel Spin Coating*

Pada metode deposisi menggunakan *sol-gel spin coating* memiliki beberapa tahapan sampai diperoleh sampel film tipis. Tahapan-tahapan tersebut meliputi pembuatan larutan sol-gel, kemudian proses dropping larutan di atas substrat pada spin coating atau yang dikenal dengan penumbuhan film tipis dan terakhir adalah tahapan annealing. Tahapan tersebut akan dibahas secara rinci sebagai berikut:

4.2.1 Larutan Sol Gel

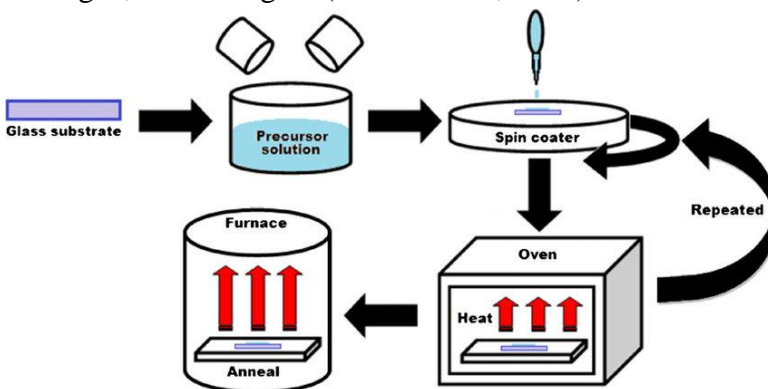
Metode *sol-gel spin coating* merupakan metode penumbuhan film tipis dengan cara meneteskan larutan (*sol-gel*) pada substrat yang kemudian diputar dengan kecepatan tinggi (Biswas *et al*, 2018). Metode ini terdiri dari proses *sol-gel* dan *spin coating*. Metode *sol-gel* dalam rekayasa material nanopartikel merupakan proses *wet-chemical* yang melibatkan pembentukan suspensi anorganik (sol) dan fase cair lanjutan (gel) (Asmatulu, 2012). Metode *sol gel* terdiri dari empat tahap, yaitu hidrolisis, kondensasi atau polimerasi dari monomer, pertumbuhan partikel dan pembentukan *gel* (Muresan, 2015). Agen dari sol berwujud cair dengan penambahan larutan yang bersifat reaktif. Pada proses pemanasan sol terjadi polimerisasi gel yang disebabkan oleh penguapan dan reaksi katalitik. Gel merupakan jaringan *solid state* dalam cairan. Skema perubahan sol menjadi gel dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Transformasi sol menjadi gel (http://www.uk-finishing.org.uk/N-COAT70/sol_gel.htm)

4.2.2 Penumbuhan Film tipis dengan *spin coating*

Adapun proses penumbuhan film tipis dengan metode *sol-gel spin coating* dapat dilihat pada Gambar 4.2. Proses ini terdiri dari penyiapan *glass substrat*, larutan *precursor*, *spin coater*, perlakuan panas, pengulangan dan *annealing*. Pada penelitian ini hanya membuat satu lapisan sehingga tidak menggunakan proses pengulangan (*repeated*). Metode *sol-gel* memiliki kelebihan dalam proses sintesis yang mudah dan sederhana, memerlukan temperatur yang rendah, menghasilkan produk dengan kemurnian tinggi dan homogen, serta seragam (Kumar *et al.*, 2013).



Gambar 4.2 Penumbuhan film tipis dengan metode *sol-gel spin coating* (Ng *et al.*, 2012)

Berdasarkan Gambar 4.2 terlihat bahwa penumbuhan film tipis dengan metode *sol-gel spin coating* dimulai dengan mempersiapkan substrat yang dapat berupa silikon substrat atau *corning glass substrat*. Hal tersebut bergantung pada tujuan dari penumbuhannya sendiri. Selanjutnya mempersiapkan larutan *precursor* untuk mendapatkan *sol-gel*, setelah itu larutan gel yang telah diperoleh kemudian dijatuhkan di atas substrat yang sudah diletakkan di atas *spin coater* dengan menggunakan mikropipet. Setelah itu, *spin coater* diputar dengan kecepatan tertentu untuk meratakan lapisan gel di atas substrat. Setelah rata, lapisan tipis di atas substrat tadi dipanaskan di dalam oven untuk menghilangkan kandungan air yang masih ada di atas substrat. Terakhir, sampel film tipis di *annealing* pada temperatur tertentu selama waktu yang sudah ditentukan, kemudian suhu diturunkan ke temperatur ruang dan sampel film tipis siap untuk dikarakterisasi.

4.2.3 Tahapan *Annealing*

Annealing merupakan proses pemanasan material pada temperatur dan waktu tertentu yang dilanjutkan dengan pendinginan secara perlahan (Singh, 2012). Proses *annealing* merupakan proses lanjutan dari *sintering*. Proses *sintering* berperan dalam perbaikan struktur material dengan cara dipanaskan pada temperatur di bawah titik leleh material. Proses *annealing* memiliki fungsi untuk membentuk arah orientasi struktur kristal material. Temperatur *annealing* yang digunakan berpengaruh pada struktur kristal (Sugianto *et al.*, 2016), morfologi permukaan (Sanjeev & Kekuda, 2015), sifat listrik (Murali *et al.*, 2015) dan sifat optik (Dejam *et al.*, 2016; Purohit *et al.*, 2015).

Tahapan dari *annealing* ada 3 yakni pemulihan (*recovery*), rekristalisasi (*recrystallization*) dan pertumbuhan butir (*grain growth*) (Haidemenopoulos, 2018). Pada tahap pemulihan, material penyusun akan terdislokasi ulang membentuk butir-butir poligon

tetapi memiliki bentuk dan orientasi butir yang tetap sama. Selanjutnya, tahap rekristalisasi yang ditandai dengan nukleasi dan pertumbuhan butiran yang bebas regangan dari matrik logam. Selama proses rekristalisasi, butiran yang cacat digantikan dengan butiran baru yang bebas regangan. Akibat dari rekristalisasi, yaitu kekuatannya berkurang dan daktilitas meningkat ke tingkat yang serupa dengan logam sebelum mengalami proses pendinginan. Proses rekristalisasi akan berhenti ketika sifat mekanik logam mendekati sifat logam sebelum dingin. Proses yang terakhir, yaitu pertumbuhan butir ditandai oleh pertumbuhan butiran rekristalisasi dengan cara mengeliminasi butir yang direkristalisasi lainnya.

BAB 5

SINTESIS FILM TIPIS ZnO:Cu DENGAN METODE *SOL-GEL SPIN COATING*

5.1 Persiapan Substrat

Substrat merupakan tempat yang digunakan untuk penumbuhan film tipis. *Corning glass* dijadikan sebagai substrat karena memiliki panjang kisi dan koefisien termal yang mirip dengan ZnO. Pada tahap persiapan terdiri dari pemotongan, perendaman, dan pengeringan substrat. Pada penelitian ini, substrat *corning glass* dipotong dengan ukuran 1 x 1,25 cm². Substrat dicuci dengan larutan *acetone* selama 15 menit dan *methanol* selama 5 menit dalam *ultrasonic bath*. Pencucian ini bertujuan untuk menghilangkan pengotor pada substrat, baik polar maupun nonpolar. Terakhir, substrat dikeringkan dengan disemprot menggunakan gas Nitrogen.

5.2 Pembuatan Larutan Sol-Gel ZnO:Cu

5.2.1 Perhitungan Massa Prekursor

Pembuatan larutan *sol-gel* diawali dengan perhitungan molaritas larutan (M) dan mol (n) dengan persamaan 3.1 dan 3.2 untuk mengetahui jumlah massa dan volume prekursor. Molaritas larutan yang digunakan, yaitu 0,5 M dengan volume pelarut isopropanol sebesar 15 mL.

$$M = \frac{m}{Mr} \frac{1}{V(mL)} \quad (5.1)$$

$$n = \frac{m}{Mr} = M \times V \quad (5.2)$$

dengan M adalah molaritas (M), m adalah massa (Kg), M_r adalah massa atom relatif (g/mol), V adalah volume larutan (mL), dan n adalah jumlah mol (mol).

Berdasarkan persamaan (5.1) dan (5.2), didapatkan perbandingan massa $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$ dan $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ seperti Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Massa Cu dan Zn dalam gram

Persentase Cu (%)	Massa Cu (g)	Massa Zn (g)
1	0,01	1,09
2	0,02	1,08
3	0,03	1,07
4	0,04	1,06
5	0,05	1,05

Selanjutnya, menghitung volume *ethanolamine* ($M_r = 61$ g/mol, $\rho = 1,012$ g/cm³) dengan persamaan (5.3)

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (5.3)$$

dengan ρ merupakan densitas *etanolamine* (g/cm³). Berdasarkan persamaan (5.3) didapatkan volume *etanolamine* sebesar 0,6027 mL sebagai penyetabil larutan *sol-gel*.

5.2.2 Pencampuran Prekursor *Sol-Gel*

Seluruh prekursor *sol-gel* yang terdiri dari *Zinc acetate dihidrat* ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), *copper acetate monohidrat* ($\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) dan *isopropanol* ($\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3$) dimasukkan ke dalam gelas beker. Prekursor *sol-gel* tersebut diaduk dan dipanaskan menggunakan *hot plate magnetic stirrer* pada temperatur 60 °C selama 15 menit. Setelah itu, larutan *sol-gel* ditambahkan *etanolamine* sebanyak 0,6027 mL sebagai penyetabil larutan. Selanjutnya, larutan dipanaskan sambil diaduk selama 60 menit pada temperatur 60 °C. Setelah proses pengadukan dan pemanasan, larutan *sol-gel* didiamkan selama 24 jam untuk mengetahui apakah terdapat endapan atau tidak (Patil *et al.*, 2018).

5.3 Deposisi Film Tipis ZnO:Cu

Substrat yang telah di cuci selanjutnya dipanaskan pada temperatur 110 °C selama 15 menit dan langsung diletakkan di atas *spin coater*. Larutan *sol-gel* sebanyak 0,1 mL ditetaskan di atas substrat *corning glass* dan diputar dengan kecepatan putar 3000 *rotation per minutes (rpm)* selama 15 detik. Setelah proses *spinning* selesai, sampel film tipis ZnO:Cu dimasukkan ke dalam *crucible* untuk proses *annealing*.

5.4 Proses *Annealing* Film Tipis ZnO:Cu

Pada tahap *annealing* dibagi menjadi tiga proses utama, yaitu *heating*, *holding*, dan *cooling* (Chen *et al.*, 2020; Durdán *et al.*, 2019). Proses *annealing* diawali dengan pre-heating, yaitu sampel film tipis ZnO:Cu diletakkan di dalam *furnace* dan dipanaskan pada temperatur 250 °C selama 15 menit. Kemudian, *heating dan holding*, yaitu proses memanaskan dan menahan sampel film tipis ZnO:Cu pada temperatur 350 °C selama 4 jam. Proses *annealing* diakhiri dengan *cooling*, yaitu proses mendinginkan sampel film tipis ZnO:Cu menuju temperatur ruang.

5.3 Karakterisasi Film Tipis ZnO:Cu

Sampel film tipis ZnO:Cu selanjutnya dikarakterisasi menggunakan X-Ray Diffraction (XRD) untuk mengetahui struktur film tipis yang diperoleh, Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDX) dengan merk Phenom pro-X dekstop SEM with EDX untuk mengetahui morfologi permukaan film serta verifikasi komponen penyusun film tipis. Terakhir, sampel dikarakterisasi menggunakan spektrofotometer UV-Vis-NIR dengan merk Shimadzu UV-2600 untuk mengetahui sifat optik film tipis seperti absorbansi dan energi band gap yang dimiliki sampel film tipis. Semua karakterisasi tersebut dilakukan di Laboratorium Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang dan Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) Serpong.

5.5.1 Spektrofotometer UV-Vis-NIR

Spektrofotometer UV-Vis-NIR merupakan sebuah perangkat yang digunakan untuk mengukur kemampuan materi dalam menyerap, mentransmisikan, dan memantulkan intensitas cahaya yang datang. Artinya, apabila suatu cahaya monokromatis dilewatkan suatu media, maka sebagian cahaya akan dipantulkan, diserap, dan ditransmisikan, seperti yang ditunjukkan pada persamaan 5.5.

$$I_0 = I_T + I_A + I_R \quad (5.5)$$

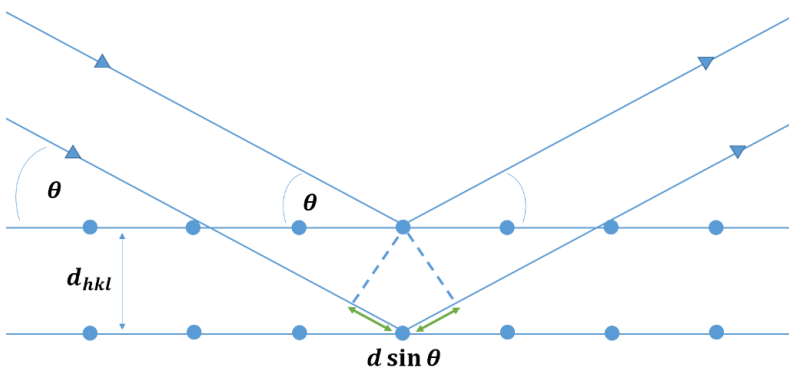
di mana I_0 merupakan intensitas cahaya datang (mula-mula), I_T merupakan intensitas cahaya yang ditransmisikan, I_A merupakan intensitas cahaya yang diserap, dan I_R merupakan intensitas cahaya yang dipantulkan.

Spektrofotometer UV-Vis-NIR menggunakan sumber radiasi gelombang elektromagnetik *ultraviolet*, cahaya tampak, *near infrared*. Spektrofotometer UV-Vis-NIR dapat mengamati interaksi

yang terjadi antara energi yang berupa sinar monokromatis dengan materi yang berupa molekul. Serapan gelombang UV, cahaya tampak, dan *near infrared* mengakibatkan peristiwa transisi elektronik, yaitu promosi elektron-elektron dari orbital keadaan dasar yang berenergi rendah ke orbital keadaan eksitasi berenergi lebih tinggi.

5.5.2 X-Ray Diffraction

XRD atau difraksi sinar-X merupakan perangkat yang digunakan untuk mengidentifikasi struktur kristal dan bidang orientasi kristal pada suatu material (Gould *et al.*, 2017). Sinar-X merupakan radiasi elektromagnetik yang berenergi tinggi yang memiliki rentang panjang gelombang 0,1–100 Å (Arunkumar *et al.*, 2015). Prinsip kerja XRD berdasarkan pada peristiwa hamburan atau difraksi yang terjadi antara sinar-X dan material. Interaksi tersebut ditunjukkan pada Gambar 5.1.



Gambar 5. 1 Hamburan sinar-X pada kristal

Gambar 5.1 menunjukkan seberkas sinar-X yang dipantulkan oleh bidang kristal yang berjarak d_{hkl} . Berkas sinar yang dipantulkan pada bidang kristal kedua menempuh jarak $2d\sin\theta$ lebih panjang

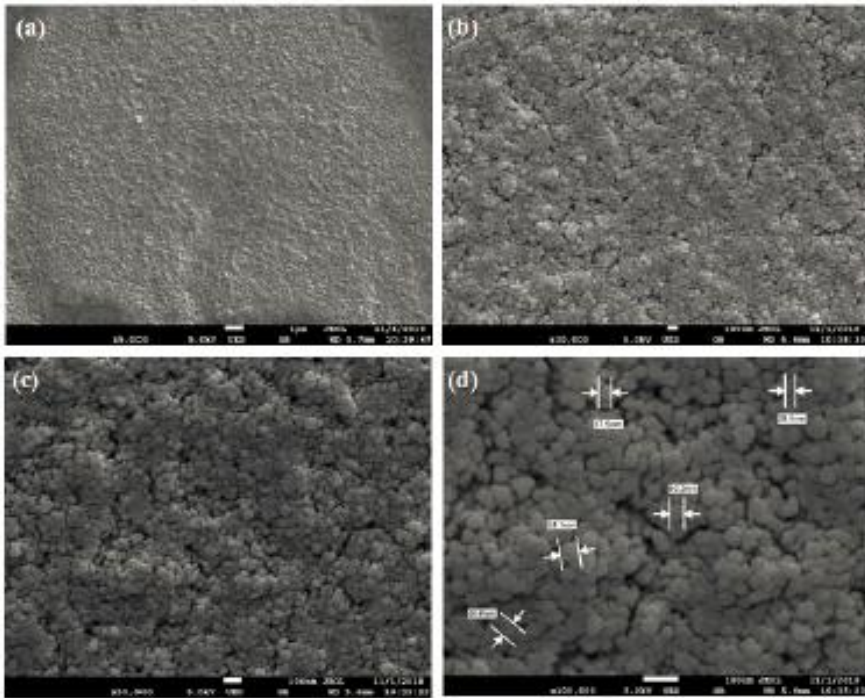
dibandingkan dengan jarak yang diempuh berkas sinar pada bidang kristal pertama. Berkas sinar pantul yang sefase dengan lintasan berbeda sebesar kelipatan bilangan bulat dari panjang gelombang akan menyebabkan perpaduan gelombang yang saling menguatkan (interferensi maksimum). Interferensi dan refleksi bergabung menjadi difraksi. Difraksi akan saling menguatkan jika memenuhi persamaan Bragg (5.6), dikenal juga dengan hukum Bragg.

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (5.6)$$

dengan d merupakan jarak antarbidang (hkl) pada kristal, θ merupakan sudut Bragg, λ merupakan panjang gelombang radiasi, dan bilangan $n = 1, 2, 3, \dots$ merupakan orde refleksi Bragg. Intensitas gelombang yang terdifraksi bergantung pada bidang orientasi kristal. Sebagian besar material tersusun dari bidang orientasi kristal yang berbeda sehingga terbentuk beberapa puncak difraksi. Kemudian, material ini disebut dengan material polikristalin. Puncak difraksi mewakili setiap bidang orientasi kristal yang menunjukkan senyawa penyusun film tipis.

5.5.3 SEM-EDX

SEM merupakan perangkat yang memiliki kemampuan untuk mencitrakan rincian topografi yang sangat kecil pada permukaan suatu material. SEM bekerja menggunakan prinsip scan sinar elektron pada permukaan sampel, selanjutnya informasi yang telah diperoleh dikonversi menjadi bentuk gambar. Gambar yang dihasilkan dibuat berdasarkan deteksi elektron sekunder (elektron pantul) dari permukaan sampel yang discan dengan berkas elektron. Sinyal elektron pantul yang terdeteksi diamplifikasi, kemudian besar kecilnya amplitudo ditampilkan dalam bentuk gradasi gelap terang pada layar monitor seperti ditunjukkan pada Gambar 5.2.



Gambar 5.2 Citra morfologi permukaan dari film tipis ZnO doping Mg 5 wt% yang diputar dengan 3000rpm pada perbesaran yang berbeda

BAB 6

PENGARUH *SPINNING RATE* TERHADAP KUALITAS FILM TIPIS ZnO:Cu

6.1 Teori Proses *Spin Coating*

S*pin coating* merupakan suatu prosedur yang digunakan untuk mengaplikasikan film tipis yang seragam ke bidang datar. Proses tipikal melibatkan pengendapan genangan kecil resin fluida ke tengah substrat dan kemudian memutar substrat dengan kecepatan tinggi (biasanya sekitar 3000 rpm) (Mitzi *et al.* 2004). Gaya sentrifugal akan menyebabkan resin menyebar keluar dan akhirnya lepas, tepi substrat meninggalkan lapisan tipis resin di permukaan. Ketebalan lapisan tipis akhir dan sifat lainnya akan tergantung pada sifat resin (viskositas, laju pengeringan, persen padatan, tegangan permukaan, dan lain-lain) Dan parameter yang dipilih untuk putaran proses. Faktor-faktor seperti kecepatan putaran akhir, percepatan, dan laju pengeringan berkontribusi pada bagaimana sifat-sifat lapisan film yang dilapisi didefinisikan (Hellstrom 2007, Mitzi *et al.* 2004). Mesin yang digunakan untuk *spin coating* disebut Spin Coater, atau hanya Spinner.

Rotasi dilanjutkan saat fluida berputar dari tepi substrat, hingga ketebalan film yang diinginkan tercapai. Pelarut yang digunakan biasanya mudah menguap, dan secara bersamaan menguap. Jadi, semakin tinggi kecepatan sudut pemintalan, semakin tipis filmnya. Ketebalan film juga tergantung pada konsentrasi larutan dan pelarut (Hellstrom, 2007).

Spin coating banyak digunakan dalam mikrofabrikasi, di mana ia dapat digunakan untuk membuat film tipis dengan ketebalan di bawah 10 nm. Ini digunakan secara intensif dalam fotolitografi,

untuk menyimpan lapisan fotoreซิส sekitar 1 mikrometer tebal (Hanaor *et al.* 2011). *Photoresist* biasanya berputar pada 20 hingga 80 putaran per detik selama 30 hingga 60 detik. Karena nilai ketebalan yang rendah yang dapat dicapai dengan menggunakan metode *spin coating*, metode ini sering digunakan dalam pembuatan bahan transparan.

Selanjutnya beberapa faktor yang mempengaruhi proses *spin coating* seperti kecepatan putar, percepatan substrat dan laju pengeringan dibahas lebih detail sebagai berikut.

a. Kecepatan Putar

Kecepatan putaran adalah salah satu faktor terpenting dalam putaran lapisan. Kecepatan substrat (rpm) mempengaruhi derajat gaya radial (sentrifugal) yang diterapkan pada resin cair serta kecepatan dan turbulensi udara tepat di atasnya. Secara khusus, langkah putaran kecepatan tinggi biasanya menentukan ketebalan film yang dihasilkan. Variasi yang relatif kecil, yaitu ± 50 rpm pada tahap ini dapat menyebabkan perubahan ketebalan sebesar 10%. Ketebalan film sebagian besar merupakan keseimbangan antara gaya yang diterapkan untuk menggeser resin fluida ke arah tepi substrat dan laju pengeringan yang mempengaruhi viskositas resin. Saat resin mengering, viskositas meningkat hingga gaya radial dari proses perputaran tidak dapat lagi menggerakkan resin di atas permukaan. Pada titik ini, ketebalan film tidak akan berkurang secara signifikan dengan bertambahnya waktu pemutaran.

b. Percepatan Substrat

Percepatan substrat menuju kecepatan putaran akhir juga dapat mempengaruhi sifat film berlapis. Karena resin mulai mengering selama bagian pertama siklus pemutaran, penting untuk mengontrol akselerasi secara akurat. Dalam beberapa proses, 50% pelarut masuk resin akan hilang karena penguapan dalam beberapa detik pertama proses. Akselerasi juga memainkan peran besar dalam sifat lapisan substrat berpola. Dalam banyak kasus, substrat akan

mempertahankan fitur topografi dari proses sebelumnya; oleh karena itu penting untuk melapisi resin secara seragam di atas dan melalui fitur-fitur ini.

Sementara proses putaran pada umumnya memberikan gaya radial (keluar) ke resin, percepatanlah yang memberikan gaya puntir ke resin. Pemutaran ini membantu penyebaran resin di sekitar topografi yang mungkin membayangi bagian substrat dari fluida. Percepatan pemintal dengan resolusi 1 rpm/detik. Dalam pengoperasiannya, putaran motor berakselerasi (atau melambat) dalam lerengan linier ke kecepatan putaran akhir.

a. Laju Pengerinan

Laju pengerinan cairan resin selama proses pemerasan ditentukan oleh sifat cairan itu sendiri (volatilitas sistem pelarut yang digunakan) serta udara yang mengelilingi substrat selama proses pemerasan. Sama seperti kain lembab yang akan lebih cepat kering pada hari yang kering dan berangin daripada saat cuaca lembab, resin akan mengering tergantung pada kondisi sekitar di sekitarnya. Diketahui dengan baik bahwa faktor-faktor seperti suhu udara dan kelembaban memainkan peran besar dalam menentukan sifat film berlapis. Juga sangat penting bahwa aliran udara dan turbulensi terkait di atas substrat itu sendiri diminimalkan, atau setidaknya dipertahankan konstan, selama proses pemerasan.

Semua Spin Coater Cee menggunakan desain "mangkuk tertutup". Meskipun sebenarnya bukan lingkungan yang kedap udara, tutup knalpot hanya memungkinkan pembuangan minimal selama proses putaran. Dikombinasikan dengan port knalpot bawah yang terletak di bawah spin chuck, tutup knalpot menjadi bagian dari sebuah sistem untuk meminimalkan turbulensi acak yang tidak diinginkan. Ada dua keuntungan berbeda untuk sistem ini: pengerinan resin fluida yang lambat dan kerentanan yang diminimalkan terhadap variasi kelembaban sekitar.

Laju pengeringan yang lebih lambat menawarkan keuntungan berupa peningkatan keseragaman ketebalan film di seluruh substrat. Cairan mengering saat bergerak menuju tepi media selama proses pemutaran. Hal ini dapat menyebabkan ketidakseragaman ketebalan radial karena viskositas fluida berubah dengan jarak dari pusat substrat. Dengan memperlambat laju pengeringan, viskositas dapat lebih konstan di seluruh substrat.

Laju pengeringan dan karenanya ketebalan lapisan akhir juga dipengaruhi oleh kelembaban sekitar. Variasi kelembapan relatif hanya beberapa persen dapat menyebabkan perubahan besar pada ketebalan film. Dengan berputar dalam mangkuk tertutup, uap pelarut dalam resin itu sendiri tertahan di lingkungan mangkuk dan cenderung menutupi pengaruh variasi kelembapan kecil. Di akhir proses putaran, saat tutupnya diangkat untuk menghilangkan substrat, knalpot penuh dipertahankan untuk menahan dan menghilangkan uap pelarut. Keuntungan lain dari desain "mangkuk tertutup" ini adalah berkurangnya kerentanan terhadap variasi aliran udara di sekitar substrat pemintalan. Dalam ruangan bersih biasa, misalnya, ada aliran udara ke bawah yang konstan sekitar 100 kaki per menit (30m/menit). Berbagai faktor mempengaruhi sifat lokal aliran udara ini. Turbulensi dan arus eddy adalah hasil umum dari aliran udara tingkat tinggi ini. Perubahan kecil pada sifat lingkungan dapat membuat perubahan drastis pada aliran udara ke bawah. Dengan menutup mangkuk dengan permukaan tutup yang halus, variasi dan turbulensi yang disebabkan oleh adanya operator dan peralatan lain dihilangkan dari proses pemerasan.

6.2 Deskripsi proses *spin coating*

Ada empat tahapan berbeda dalam proses pelapisan spin, sebagai berikut.

6.2.1 Tahap pengeluaran

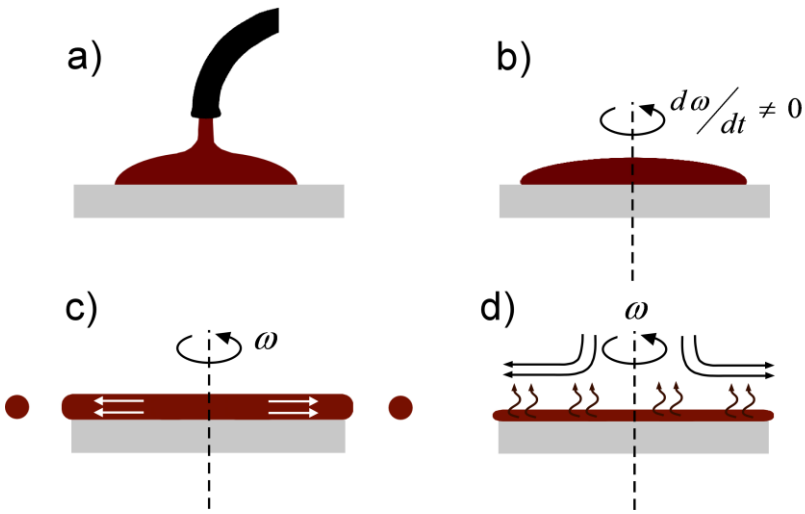
Proses *spin* tipikal terdiri dari langkah pengeluaran dimana cairan resin diendapkan ke permukaan substrat seperti pada Gambar. 6.1(a). Dua metode pengeluaran yang umum adalah pengeluaran statis, dan pengeluaran dinamis. Pengeluaran statis hanya mengendapkan genangan kecil cairan di atau dekat bagian tengah media. Ini dapat berkisar dari 1 sampai 10 cc tergantung pada viskositas fluida dan ukuran substrat yang akan dilapisi (Hellstrom 2007, Middleman dan Hochberg 1993). Viskositas yang lebih tinggi dan atau substrat yang lebih besar biasanya memerlukan genangan yang lebih besar untuk memastikan cakupan penuh dari substrat selama langkah putaran kecepatan tinggi. Pengeluaran dinamis adalah proses pengeluaran saat media berputar dengan kecepatan rendah, sekitar 500 rpm (Hellstrom 2007, Middleman dan Hochberg 1993). Ini berfungsi untuk menyebarkan fluida ke seluruh substrat dan dapat menghasilkan lebih sedikit limbah bahan resin karena biasanya tidak perlu mengendap sebanyak mungkin untuk membasahi seluruh permukaan substrat. Ini adalah metode yang sangat menguntungkan bila cairan atau substrat itu sendiri memiliki kemampuan pembasahan yang buruk dan dapat menghilangkan rongga yang mungkin terbentuk (Schubert dan Dunkel 2003).

6.2.2 Tahap percepatan substrat

Tahap ini biasanya ditandai dengan pengusiran fluida yang agresif dari permukaan wafer dengan gerakan rotasi (Meyerhofer 1978, Miiitzi *et al.* 2004). Karena kedalaman awal fluida pada permukaan wafer (Gambar 6.1(b)), pusaran spiral mungkin muncul sebentar selama tahap ini; ini akan terbentuk sebagai hasil dari gerakan memutar yang disebabkan oleh inersia yang diberikan bagian atas lapisan fluida sementara wafer di bawah berputar lebih cepat dan lebih cepat. Akhirnya, cairan menjadi cukup tipis untuk benar-benar berputar bersama dengan wafer dan bukti perbedaan

ketebalan cairan akan hilang. Akhirnya, wafer mencapai kecepatan yang diinginkan dan fluida cukup tipis sehingga gaya geser kental menyeimbangkan percepatan rotasi secara tepat (Meyerhofer 1978, Miitzi *et al.* 2004).

Kecepatan putaran tipikal untuk tahap ini berkisar antara 1500-6000 rpm, tergantung pada sifat fluida serta substrat. Langkah ini dapat berlangsung dari 10 detik hingga beberapa menit. Kombinasi kecepatan putaran dan waktu yang dipilih untuk tahap ini biasanya akan menentukan ketebalan film akhir (Meyerhofer 1978, Miitzi *et al.* 2004). Ketebalan film akhir dan sifat-sifat lainnya akan tergantung pada sifat lapisan (viskositas, laju pengeringan, persen padatan, tegangan permukaan, dan lain-lain). Secara umum, kecepatan putaran yang lebih tinggi dan waktu putaran yang lebih lama membuat film yang lebih tipis.



Gambar 6.1 Empat tahap berbeda untuk spin coating (Hellstrom 2007)

6.2.3 Tahap pemintalan substrat (*Substrate spinning*) dengan kecepatan konstan dan gaya kental fluida mendominasi perilaku penipisan fluida

Tahap ini ditandai dengan penipisan fluida secara bertahap. Penipisan fluida umumnya cukup seragam (seperti pada Gambar 6.1(c)), meskipun dengan larutan yang mengandung pelarut yang mudah menguap, seringkali dimungkinkan untuk melihat warna interferensi "berputar", dan dilakukan secara progresif lebih lambat karena ketebalan lapisan berkurang (Hanaor *et al.* 2011). Efek tepi sering terlihat karena fluida mengalir keluar secara seragam, tetapi harus membentuk tetesan di tepi yang akan dilemparkan. Jadi, tergantung pada tegangan permukaan, viskositas, laju rotasi, dan lain-lain. Mungkin ada sedikit perbedaan ketebalan lapisan di sekitar tepi wafer akhir (Hanaor *et al.* 2011, Meyerhofer 1978). Perlakuan matematis dari perilaku aliran menunjukkan bahwa jika cairan menunjukkan viskositas Newtonian (yaitu linier) dan jika ketebalan fluida awalnya seragam di seluruh wafer (meskipun agak tebal), maka profil ketebalan fluida pada waktu berikutnya juga akan seragam mengarah ke lapisan akhir yang seragam (dalam kondisi ideal) (Middleman dan Hochberg 1993; Emslie *et al.* 1958).

6.4.3 Tahap pemintalan substrat pada laju konstan dan penguapan pelarut mendominasi perilaku penipisan lapisan

Pada tahap sebelumnya, ketebalan fluida mencapai titik di mana efek viskositas menghasilkan hanya aliran fluida bersih yang agak kecil. Pada titik ini, penguapan dari setiap jenis pelarut yang mudah menguap akan mendominasi pada proses ini (Gambar. 6.1(d)). Faktanya, pada tahap ini pelapisan secara efektif "gel" karena pelarut ini dihilangkan, viskositas larutan yang tersisa kemungkinan akan meningkat secara efektif membekukan lapisan pada tempatnya (Peeters dan Remoortere 2008, Meyerhofer 1978).

Setelah pemintalan dihentikan, selanjutnya diperlukan proses annealing untuk menjaga lapisan film benar-benar kering dan tidak mengalami keretakan (*cracking*). Langkah pengeringan dapat ditambahkan dan dilakukan secara terpisah setelah langkah pemutaran kecepatan tinggi untuk mengeringkan film lebih lanjut tanpa benar-benar menipiskannya. Proses tersebut dikenal dengan nama *post annealing*. Hal ini dapat menguntungkan untuk film tebal karena waktu pengeringan yang lama mungkin diperlukan untuk meningkatkan stabilitas fisik film sebelum penanganan. Tanpa langkah pengeringan, masalah dapat terjadi selama penanganan, seperti menuangkan sisi media saat mengeluarkannya dari mangkuk pemerasan. Pada kasus ini kecepatan putaran sedang sekitar 25% dari putaran kecepatan tinggi umumnya akan cukup untuk membantu mengeringkan film tanpa mengubah ketebalan film secara signifikan.

Tahapan 6.4.2 dan 6.4.3 harus terjadi secara bersamaan sepanjang waktu (aliran kental dan penguapan). Namun, secara teknik, efek kekentalan aliran mendominasi sejak awal proses, sementara proses penguapan mendominasi kemudian (Meyerhofer 1978, Schubert dan Dunkel 2003).

6.3 Proses Sintesis Film Tipis ZnO:Cu dengan variasi Spinning Rate

Zinc acetate dihydrate $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, AZD dan copper (II) acetate monohydrate $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, CAM adalah analitik serbuk dengan kemurnian sekitar 99,99% dan digunakan sebagai prekursor. 2-Propanol $\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3$ dan monoethanolamine $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$, MEA masing-masing digunakan sebagai pelarut dan stabilizer. Semua bahan kimia diperoleh dari Merck KGaA, 64271 Darmstadt (Jerman). Larutan prekursor dibuat pada 0,5 M dengan mencampurkan 2,17 gr dari $\text{Zn}(\text{OAc})_2$ dan 0,02 gr dari $\text{Cu}(\text{OAc})_2$ dalam 20 mL 2-propanol dan diaduk menggunakan

magnetic stirrer. Setelah diaduk selama 15 menit pada suhu 60 °C, 0,62 mL larutan MEA ditambahkan ke dalam larutan sambil diaduk dengan kecepatan konstan. Larutan akhir diaduk pada suhu yang sama (60 °C) selama 60 menit lagi.

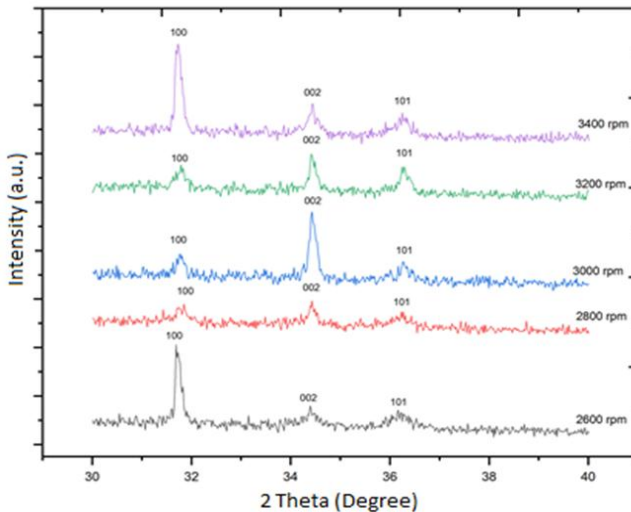
Larutan akhir berupa larutan warna biru yang sangat homogen dan transparan. Selanjutnya larutan dibiarkan selama 24 jam pada suhu kamar untuk memastikan tidak ada endapan dalam larutan. Bersamaan dengan itu dilakukan proses pembersihan substrat kaca dengan menggunakan aseton selama 15 menit dan metanol selama 5 menit dalam *ultrasonic bath*. Substrat kaca dikeringkan dengan mengalirkan gas nitrogen. Setelah itu, larutan dijatuhkan pada substrat kaca dan dipintal (*di-spinning*) pada berbagai kecepatan pemintalan, yaitu 2600, 2800, 3000, 3200, dan 3400 rpm selama 15 detik. Film tipis ZnO:Cu yang dihasilkan disinter termal pada suhu 250 °C selama 15 menit dan di-*annealing* pada suhu 350 °C selama 2 jam.

Untuk tahap setelah sintesis adalah karakterisasi untuk mengetahui struktur dan morfologi dari sampel film tipis ZnO:Cu yang dihasilkan. Sifat struktur dan orientasi lapisan tipis ZnO: Cu dipelajari menggunakan difraktometer sinar-X (XRD) menggunakan radiasi CuK_α ($\lambda = 1.542 \text{ \AA}$). Sementara untuk morfologi permukaan film yang dihasilkan dipelajari dengan menggunakan mikroskop elektron pemindai (*scanning electron microscope*, SEM) yang dilengkapi dengan sinar-X dispersif energi (*energy dispersive X-ray*, EDX) untuk menentukan komposisi unsur film tipis ZnO: Cu yang diperoleh.

6.4 Struktur Film Tipis ZnO:Cu

Arah orientasi kristal dan struktur kristal Film tipis ZnO:Cu diperiksa menggunakan XRD. Pola XRD film ZnO:Cu film tipis yang dibuat dengan metode *sol-gel spin coating* dengan kecepatan putar yang berbeda, yaitu 2400, 2600, 3000, 3200 dan 3400 rpm

ditunjukkan pada Gambar 1. Tiga puncak dominan yang berhubungan dengan bidang (100), (002), dan (101) diamati pada pola XRD. Pola-pola difraksi yang terhasil sangat cocok dengan data JCPDS dengan nomor 01-078-3315 dan 76-0704, dimana film tipis ZnO:Cu yang dibuat menunjukkan struktur polikristalin. Selain itu, kecocokan pola-pola difraksi tersebut juga mengkonfirmasi bahwa film tipis ZnO:Cu yang dihasilkan memiliki struktur wurtzit heksagonal (Astuti, *et al.*, 2019; Khosravi, *et al.*, 2019). Pola XRD pada Gambar 1, juga menunjukkan bahwa semua film tipis yang disiapkan tidak memiliki orientasi yang disukai (*preferred orientation*). Hal tersebut dimungkinkan karena *preferred orientation* melemah dan kecepatan rotasi pada proses pemintalan dimungkinkan tidak mempunyai pengaruh terhadap orientasi kristal yang terbentuk.



Gambar 6.2. Spektra Difraksi Sinar-X untuk Film Tipis ZnO:Cu dengan variasi *spinning rate*

Dari Gambar 6.2 terlihat bahwa penambahan *spinning rate* dari 2600 ke 3000 rpm meningkatkan intensitas dari bidang orientasi

(002), namun ketika *spinning rate* dinaikkan lagi sampai dengan 3400 rpm, intensitasnya menurun lagi. Hal tersebut dapat dikatakan bahwa film tipis yang diperoleh dengan menggunakan *spinning rate* 3000 rpm memiliki kualitas yang terbaik dibandingkan dengan nilai *spinning rate* yang lain. Kualitas yang dimaksud di sini adalah bagaimana penyebaran larutan ZnO:Cu di atas substrat kaca yang digunakan pada saat proses *spin coating*. Pada *spinning rate* 3000 rpm, gaya sentrifugal yang dihasilkan mampu menyebarkan larutan ZnO:Cu ke semua permukaan dengan merata, sehingga film tipis yang terbentuk uniform (Mitzi *et al.* 2004). Pada keadaan *spinning rate* tersebut, film tipis yang dihasilkan juga cukup tipis dan bersifat transparan, sehingga sesuai untuk diaplikasikan pada sel surya. Sementara itu, peningkatan intensitas difraksi sinar-X juga sering digunakan untuk mendefinisikan bahwa film tipis yang dihasilkan memiliki struktur yang lebih baik. Hal tersebut karena tingginya intensitas difraksi dipengaruhi oleh jumlah bidang-bidang pemantul pada susunan atom sampel terbentuk. Semakin banyak bidang-bidang pemantul maka interferensi dari gelombang terdifraksi akan saling menguatkan, sehingga menyebabkan intensitas difraksinya menjadi semakin tinggi. Dengan demikian, untuk *spinning rate* 3000 rpm akan digunakan pada studi lebih lanjut terhadap pengaruh konsentrasi doping Cu terhadap film tipis ZnO yang terbentuk dan akan dibahas secara rinci di bab berikutnya.

Untuk selanjutnya, pembahasan difokuskan pada pembahasan puncak difraksi (002). Hal tersebut dikarenakan, kristal ZnO mempunyai struktur heksagonal wurtzite pada sumbu-c (Hassan & Qassim, 2016). Struktur tersebut dapat mendukung film Tipis ZnO:Cu yang diaplikasikan sebagai lapisan jendela dan juga lapisan absorber pada teknologi sel surya. Bahan lapisan jendela harus memiliki transmisi tinggi dan energi celah pita yang lebar. Film tipis ZnO dengan orientasi bidang (002) menunjukkan hasil transferabilitas yang tinggi sekitar 80-90% (Bedia *et al.*, 2015; Rahmane *et al.*, 2015). Selanjutnya, berdasarkan data spektrum

difraksi sinar-X, dilakukan penghitungan konstanta kisi a dan c dari film tipis yang terbentuk dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$a = \frac{\lambda}{\sqrt{3} \sin \theta} \tag{6.1}$$

$$c = \frac{\lambda}{\cos \theta} \tag{6.2}$$

Hasil konstanta kisi a dan c berdasarkan perhitungan sesuai dengan nomor referensi JCPDS di atas. Ukuran kristal, D dari film tipis ZnO:Cu kemudian dihitung dengan menggunakan persamaan Debye-Scherrer seperti berikut:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \tag{6.3}$$

dimana K adalah konstanta Scherrer (0.89), λ (1.542 Å) adalah panjang gelombang radiasi sinar-X yang digunakan, β adalah *full weight at half maximum* (FWHM) dan θ adalah posisi puncak dari difraksi sinar-X. Sementara, untuk kerapatan dislokasi, δ film tipis ZnO:Cu diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\delta = \frac{1}{D^2} \tag{6.4}$$

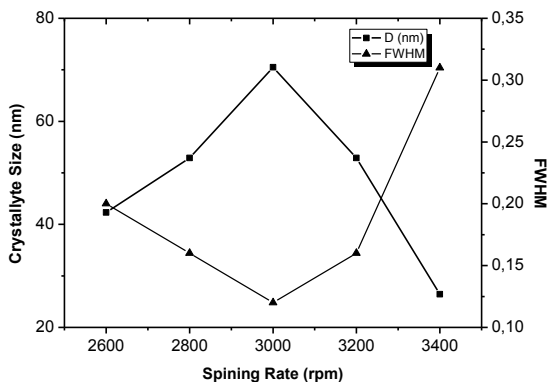
Konstanta kisi a dan c , ukuran kristal dan kerapatan dislokasi film tipis ZnO: Cu ditunjukkan pada Tabel 6.1.

Tabel 6.1 Struktur dan konstanta kisi film tipis ZnO:Cu untuk variasi *spinning rate*

Spinning rate	2θ	FWHM ($^{\circ}$)	Lattice constants (Å)		d (nm)	D (nm)	δ (nm ²)
(Rpm)	(002)	(002)	a (100)	c (002)	(002)	(002)	

2600	34.42	0.20	3.26	5.21	2.61	42.30	0.00056
2800	34.46	0.16	3.26	5.21	2.60	52.89	0.00036
3000	34.43	0.12	3.25	5.21	2.60	70.49	0.00020
3200	34.44	0.16	3.25	5.21	2.60	52.89	0.00036
3400	34.47	0.31	3.26	5.20	2.60	26.44	0.00143

Dari Tabel 6.1 terlihat bahwa sudut difraksi film tipis relatif dalam orde yang sama, hal ini menunjukkan bahwa *spinning rate* tidak signifikan mempengaruhi struktur yang dibentuk dari film tipis ZnO:Cu yang disintesis dengan menggunakan metode *spin coating*. Sementara itu, untuk nilai FWHM pada bidang orientasi (002) menurun dengan penambahan nilai *spinning rate*, sehingga meningkatkan nilai ukuran kristal dari film tipis yang terbentuk pada penambahan *spinning rate* 3000 rpm. Scott *et al.* (2011) menyatakan bahwa film tipis yang memiliki nilai FWHM kecil, menunjukkan bahwa film memiliki kualitas kristal yang baik. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa *spinning rate* 3000 rpm, mempunyai kualitas kristal yang lebih baik dibandingkan dengan *spinning rate* yang lain. Hal tersebut sesuai dengan pernyataan sebelumnya mengenai intensitas difraksi yang dihasilkan untuk *spinning rate* 3000 rpm memiliki kualitas yang baik. Hubungan antara nilai FWHM dan ukuran kristal ditunjukkan pada Gambar 6.3.

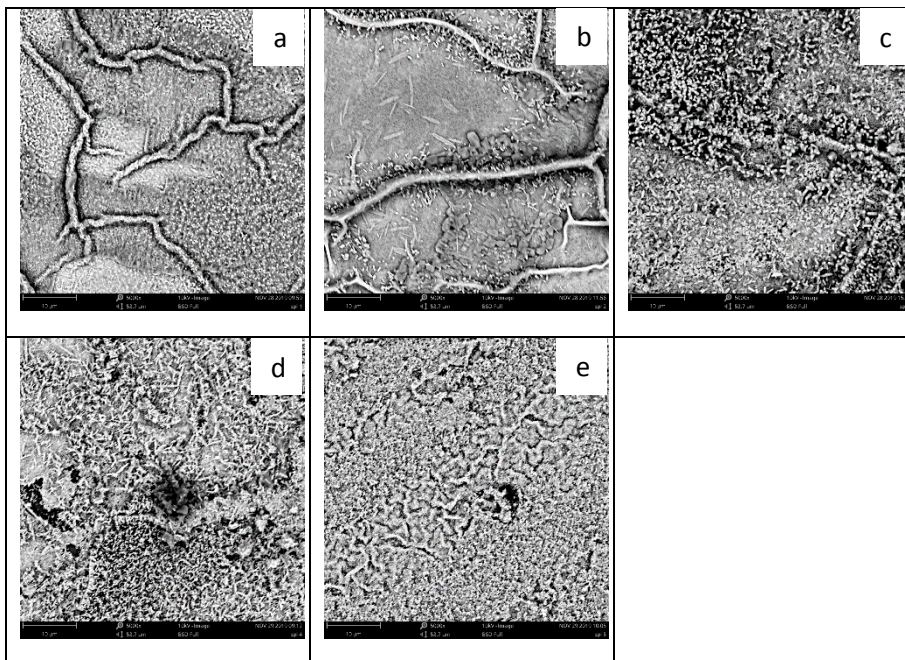


Gambar 6.3 Nilai FWHM dan ukuran kristal film tipis ZnO:Cu pada bidang orientasi (002) dengan variasi *spinning rate*

Berdasarkan Gambar 6.3 terlihat jelas hubungan antara nilai FWHM dan ukuran kristal berbanding terbalik sesuai persamaan yang dinyatakan oleh Debye Scherrer. Dari gambar tersebut terlihat bahwa untuk *spinning rate* 3000 rpm memiliki nilai nilai FWHM dan ukuran kristal/*crystallite size* yang optimum dibandingkan *spinning rate* yang lain. Hasil ini juga yang menjadikan alasan kenapa menggunakan *spinning rate* 3000 rpm pada penelitian untuk pengaruh konsentrasi doping Cu.

6.5 Morfologi Film Tipis ZnO:Cu

Morfologi permukaan pada film tipis ZnO:Cu telah dikarakterisasi menggunakan SEM yang ditunjukkan pada Gambar 6.5.



Gambar 6.4 Citra SEM untuk film tipis ZnO:Cu dengan perbedaan *spinning rate*, a) 2400 (b) 2600 (c) 3000 (d) 3200 dan (e) 3400 rpm

Pada Gambar 6.4 terlihat bahwa film tipis yang terbentuk menunjukkan morfologi yang semakin uniform ketika diputar dengan *spinning rate* yang semakin tinggi. Sesuai teori bahwa *spinning rate* di atas 3000 rpm, gaya sentrifugal yang terjadi mampu menyebarkan lapisan film yang lebih merata ke permukaan substrat. Hal tersebut ditunjukkan pada Gambar 6.5c hingga 6.5e. Namun berdasarkan hasil karakterisasi XRD, *spinning rate* 3000 rpm menghasilkan struktur yang paling baik, sehingga *spinning rate* 3000 rpm yang digunakan untuk mempelajari bagaimana pengaruh konsentrasi dopan Cu terhadap sifat optik film tipis ZnO:Cu yang dibahas pada bagian selanjutnya.

BAB 7

PENGARUH KONSENTRASI DOPING TERHADAP PENURUNAN NILAI ENERGI BAND GAP FILM TIPIS ZnO:Cu

Pada bagian ini akan dibahas mengenai pengaruh konsentrasi penambahan doping Cu dalam menurunkan nilai energi band gap film tipis ZnO. Hal tersebut dikarenakan bahwa tujuan dari penambahan Cu untuk menurunkan energi band gap sehingga film tipis ZnO:Cu dapat diaplikasikan sebagai material absorber dalam sel surya. Secara lengkap akan dibahas dalam sub bab sifat Optik, Morfologi dan unsur kimia penyusun film tipis ZnO:Cu serta bagaimana struktur film tipis ZnO:Cu yang terbentuk.

7.1 Pembuatan Film Tipis ZnO:Cu dengan variasi Konsentrasi Doping Cu

Penumbuhan film tipis ZnO doping Cu (ZnO:Cu) dengan metode *sol-gel spin coating* terdiri dari lima tahapan, yaitu pertama, tahap preparasi substrat terdiri dari proses pemotongan substrat *corning glass* dengan ukuran (1 x 1,25) cm². Substrat selanjutnya dicuci dalam larutan aseton selama 15 menit dan dilanjutkan methanol selama 5 menit dengan menggunakan *ultrasonic bath*. Proses ini bertujuan untuk menghilangkan pengotor polar atau nonpolar pada substrat. Selanjutnya, proses pengeringan substrat menggunakan gas nitrogen. Kedua, tahap pembuatan larutan *sol-gel* yang terdiri dari proses perhitungan massa prekursor dengan kondisi molaritas 0.5 M dan pelarut isopropanol 15ml menggunakan persamaan (5.1) dan

(5.2). Hasil perhitungan untuk massa Cu dan Zn dapat dilihat pada Tabel 7.1.

Tabel 7.1 Massa dari unsur Cu dan Zn

Persentase Cu (%)	Massa Cu (g)	Massa Zn (g)
1	0,01	1,09
2	0,02	1,08
3	0,03	1,07
4	0,04	1,06
5	0,05	1,05

Selanjutnya dilakukan penghitungan volume *etanolamine* dengan persamaan (5.3) dan diperoleh sebesar 0,603 mL sebagai penyetabil larutan sol gel. Pada proses penyampuran prekursor *sol-gel*, *zinc acetate dihidrat* (ZAD; $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) dan *copper acetate monohidrat* (CAM; $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) dicampur dengan *isopropanol* ($\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3$) sebagai pelarut ke dalam gelas beker. Selanjutnya, gelas beker ditutup dengan aluminium foil supaya tidak terjadi penguapan ke luar dari gelas beker yang diikuti dengan proses pengadukan dan pemanasan larutan menggunakan *hot plat magnetic stirrer* pada temperatur 60 °C selama 15 menit. Selanjutnya, *etanolamine* sebanyak 0,602 mL diteteskan pada larutan *sol-gel* tersebut dan didiamkan selama 24 jam untuk mengetahui apakah terjadi pengendapan atau tidak (Patil *et al.*, 2018). Ketiga, tahap deposisi film tipis ZnO:Cu yang diawali dengan pemanasan substrat pada temperature 110 °C selama 15 menit. Substrat diletakkan di atas *spin coater* dan diteteskan larutan *sol-gel* sebanyak 0,1 mL serta dilanjutkan dengan memutar substrat dengan kecepatan putar 3000 rpm selama 15 detik (Hamid *et al.*,

2020). Keempat, tahap *annealing* ZnO:Cu yang dibagi menjadi tiga proses, yaitu *pre-annealing*, *heating*, *holding* dan *cooling*. Pada proses *pre-annealing*, sampel dipanaskan di dalam *furnace* pada temperature 250 °C selama 15 menit. Kemudian proses *heating* dan *holding*, yaitu memanaskan substrat pada temperatur 350 °C selama 4 jam yang berfungsi untuk membentuk arah orientasi struktur kristal. Kemudian, *cooling*, yaitu proses pendinginan sampel film tipis ZnO:Cu menuju temperatur ruang. Kelima, tahap karakterisasi sampel film tipis ZnO:Cu menggunakan spektrofotometer UV-Vis-NIR untuk mengetahui sifat optik film tipis terutama absorbansi dan energi gap. Kemudian, *X-Ray Diffraction* (XRD), *Scanning Electron Michroscopy-Energy Dispersif X-Ray* (SEM-EDX) untuk mengetahui struktur kristal, morfologi dan komposisi atomik film.

7.2 Sifat Optik Film Tipis ZnO:Cu

Sifat optik merupakan sifat material yang berhubungan dengan interaksi cahaya dengan material. Sifat optik tersebut meliputi absorbansi, transmitansi dan refraksi. Pada film tipis, spektrum transmitansi merupakan fungsi transmisi terhadap panjang gelombang, sedangkan spektrum absorbansi merupakan fungsi koefisien absorpsi terhadap foton cahaya. Besarnya nilai transmitansi ditunjukkan dalam persamaan 7.1.

$$T = \frac{I}{I_0} \times 100\% \quad (7.1)$$

dengan T adalah transmitansi material semikonduktor (%), I adalah intensitas cahaya setelah melewati bahan dan I_0 adalah intensitas cahaya mula-mula. Intensitas radiasi berkurang secara eksponensial terhadap ketebalan film (Simmons & Potter, 2000), sehingga persamaan (7.1) dapat dinyatakan dalam persamaan (7.2).

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\alpha b} \quad (7.2)$$

dengan b adalah ketebalan film dan α adalah koefisien absorpsi optik. Berdasarkan substitusi persamaan (7.1) dan (7.2) diperoleh besarnya koefisien absorpsi optik dengan persamaan (7.3) sebagai berikut (Arif *et al.*, 2018; Bedia *et al.*, 2015).

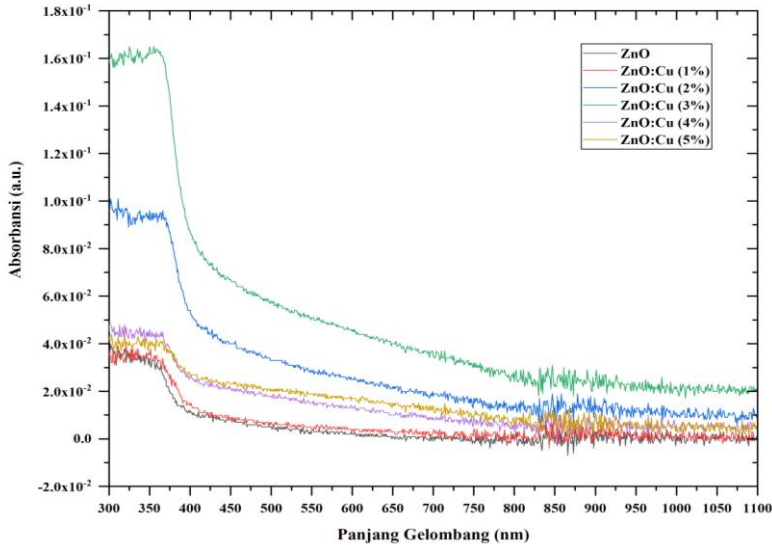
$$\alpha = \frac{-\ln I}{b} \quad (7.3)$$

$$\alpha = \frac{1}{b} \ln \left(\frac{I_0}{I} \right) \quad (7.4)$$

$$A = 2 - \text{Log}_{10} T\% \quad (7.5)$$

dengan A merupakan absorpsi film tipis. Setiap material memiliki daya serap optik tertentu. Perbedaan persentase material dopan (seperti Cu) pada film tipis ZnO juga mempengaruhi daya serap optik, ditunjukkan pada Gambar 7.1. Peningkatan persentase Cu menyebabkan terjadinya pergeseran gelombang menuju panjang gelombang merah atau *red-shift* (Hanh *et al.*, 2019).

Seperti yang telah diketahui bahwa film tipis ZnO murni memiliki nilai absorpsi yang rendah, sehingga perlu ditambahkan material dopan seperti Cu untuk meningkatkan nilai absorpsinya (Asikuzun *et al.*, 2018). Peningkatan nilai absorpsi merupakan faktor yang penting agar material tersebut dapat dijadikan sebagai material absorber dalam aplikasi sel surya. Spektrofotometer UV-Vis-NIR digunakan untuk mengetahui nilai absorpsi atau transmitansi film tipis. Hasil karakterisasi UV-Vis-NIR ditunjukkan pada Gambar 7.1.



Gambar 7.1 Spektrum Absorbansi terhadap Panjang gelombang film tipis ZnO murni dan ZnO doping Cu

Gambar 7.1 menunjukkan serapan optik atau absorbansi dari film tipis ZnO murni dan ZnO doping Cu dengan konsentrasi 1% sampai 5%. Pengukuran sifat absorbansi dilakukan pada panjang gelombang mulai dari 300 nm sampai dengan 1100 nm. Daerah dengan nilai absorbansi tertinggi dari film tipis ZnO:Cu berada pada panjang gelombang 300 nm sampai dengan 365 nm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.1. Rentang panjang gelombang tersebut merupakan bagian dari daerah UV (300 nm – 380 nm). Pada daerah dengan panjang gelombang lebih besar dari 365 nm, film tipis ZnO:Cu masih mengabsorpsi energi yang memiliki panjang gelombang kurang dari 400 nm. Hal tersebut membuktikan bahwa sebagian panjang gelombang cahaya tampak (warna ungu) terabsorpsi. Di sisi lain, film tipis ZnO:Cu dapat mentransmisikan energi dengan panjang gelombang yang lebih besar dari 400 nm. Nilai absorbansi mengalami penurunan secara perlahan dengan semakin tingginya panjang gelombang. Pada daerah *near infrared* (NIR), nilai absorbansi berada pada kondisi terendah sehingga

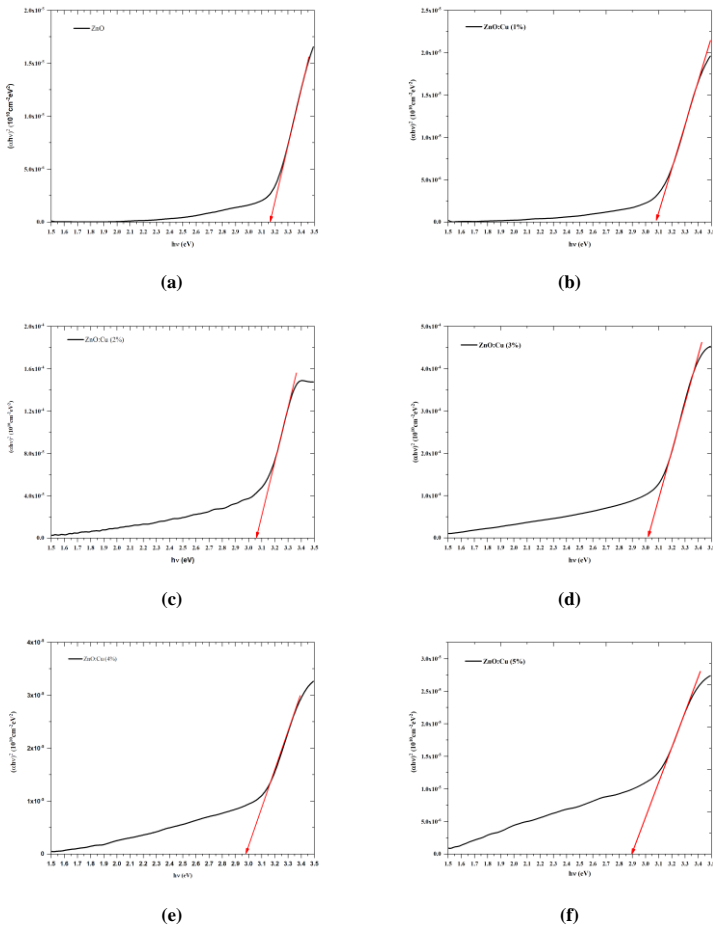
kemampuan film tipis ZnO:Cu untuk menyerap energi cahaya menjadi semakin rendah.

Dari Gambar 7.1 juga dapat terlihat tingkat kecuraman grafik absorbansi film tipis ZnO:Cu. Kecuraman ini berkaitan dengan arah pergeseran panjang gelombang dan nilai energi gap. Spektrum absorbansi dari film tipis ZnO:Cu mengalami pergeseran ke arah panjang gelombang yang lebih tinggi yang dikenal dengan *red shift*. Hal tersebut sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Hanh *et al.* (2019) yang menyebutkan bahwa terjadi peristiwa *red shift* yang disebabkan oleh bertambahnya persentase dopan Cu. Pergeseran panjang gelombang ini juga berkaitan dengan mengecil atau membesarnya energi gap suatu material seperti film tipis. Secara umum, penambahan material dopan Cu telah menyebabkan peningkatan nilai absorbansi (Roguai & Djelloul, 2020). Namun demikian, nilai absorbansi juga dipengaruhi oleh faktor seperti energi gap, kandungan oksigen, ukuran dan struktur dari material (Gaurav *et al.*, 2019).

Peristiwa absorpsi pada film tipis menghasilkan energi yang dapat digunakan untuk melepaskan elektron dari pita valensi ke pita konduksi. Jarak dari titik tertinggi pita valensi ke titik terendah pita konduksi disebut dengan energi gap (Ma *et al.*, 2019). Hal tersebut memiliki arti bahwa energi gap merupakan energi minimal atau energi ambang yang diperlukan untuk melepaskan elektron dari pita valensi menuju pita konduksi. Peristiwa tersebut dikenal dengan nama transisi elektronik. Keterkaitan antara energi gap dengan peristiwa absorpsi terletak pada daerah panjang gelombang yang diserap oleh material. Daerah tersebut memiliki energi yang lebih besar dibandingkan dengan energi gap material, sehingga energi yang diserap oleh film tipis pada peristiwa absorpsi digunakan untuk transisi elektronik.

Selanjutnya, dari data absorbansi tersebut dapat digunakan untuk menentukan nilai energi band gap dari film tipis yang dihasilkan dengan menggunakan metode *Touc Plot*. Metode tersebut

dilakukan dengan membuat grafik dengan besaran $h\nu$ sebagai sumbu x dan $\alpha h\nu$ sebagai sumbu y kemudian ditarik garis ekstrapolasi terhadap sumbu x untuk mendapatkan nilai energi band gap seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.2.



Gambar 7.2 Grafik ektrapolasi Tauc plot untuk memperoleh Energi gap film tipis (a) ZnO, (b) ZnO:Cu (1%), (c) ZnO:Cu (2%), (d) ZnO:Cu (3%), (e) ZnO:Cu (4%), dan (f) ZnO:Cu (5%)

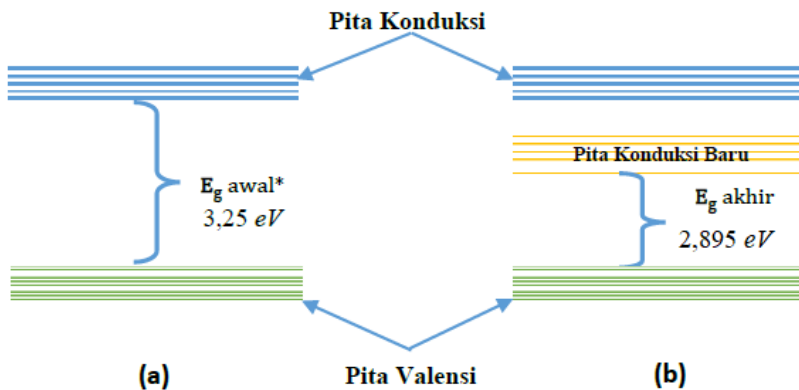
Berdasarkan ekstrapolasi pada Gambar 7.2, diperoleh nilai energi band gap untuk sampel film tipis ZnO:Cu seperti yang ditunjukkan pada Tabel 7.2.

Tabel 7.2 Energi band gap film tipis ZnO:Cu

Sampel	E_g (eV)
ZnO	3,165
ZnO:Cu (1%)	3,085
ZnO:Cu (2%)	3,059
ZnO:Cu (3%)	3,026
ZnO:Cu (4%)	2,980
ZnO:Cu (5%)	2,895

Didasarkan pada Tabel 7.2 terlihat bahwa penambahan doping Cu dapat menurunkan nilai energi band gap dari film tipis ZnO. Film tipis ZnO:Cu (5%) memiliki energi gap sebesar 2,895 eV sehingga dapat menyerap energi dengan panjang gelombang kurang dari 417 nm atau lebih besar dari 2,895 eV. Nilai energi gap cenderung turun dengan bertambahnya persentase material dopan Cu. Hal ini sesuai dengan penelitian Asikuzun et al (2018) yang mendapatkan nilai energi gap berbanding terbalik dengan persentase dopan. Beberapa penelitian juga mendapatkan bahwa penambahan persentase doping akan menurunkan energi gap ZnO:Cu (Gaurav *et al.*, 2019; Hanh *et al.*, 2019; Kumar *et al.*, 2019; Ma *et al.*, 2019). Penurunan energi gap disebabkan oleh material dopan Cu yang membuat ketakmurnian celah pita. Pada pita valensi, atom Cu memiliki 1 elektron dan *hole*, sedangkan atom Zn memiliki 2 elektron valensi. Oleh karena elektron valensi yang dimiliki oleh atom Cu lebih rendah dibandingkan dengan atom Zn, maka sebuah hole yang dimiliki oleh atom Cu digunakan untuk menangkap elektron yang terlepas dari pita valensi. *Hole* tersebut juga telah

membuat pita konduksi baru yang terletak lebih rendah dari pita konduksi awal, sehingga kehadiran pita konduksi baru tersebut memperpendek jarak dari pita valensi menuju pita konduksi. Selain itu, kehadiran atom Cu juga telah mengubah film tipis ZnO:Cu menjadi semikonduktor tipe-p (Ma *et al.*, 2019). Ilustrasi tentang letak pita konduksi dan pita valensi sebelum dan setelah diberi doping Cu dapat dilihat pada Gambar 7.3.



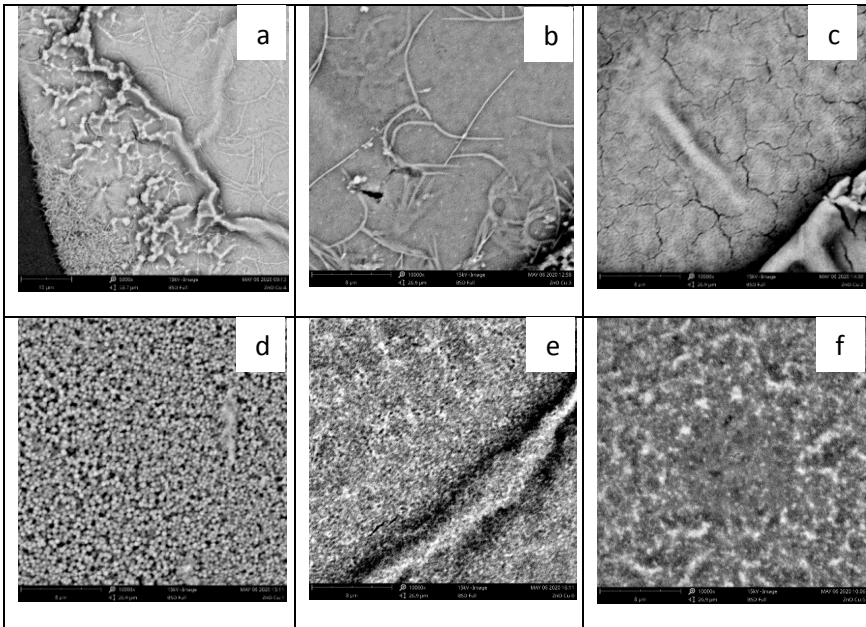
Gambar 7.3 Ilustrasi pita energi (a) ZnO* (Smirnov *et al.*, 2010) dan (b) ZnO:Cu

Pada Gambar 7.3 terlihat bahwa celah pita film tipis ZnO setelah diberi doping lebih sempit dibandingkan sebelum didoping. Dengan kata lain, energi band gap film tipis ZnO:Cu lebih kecil dibandingkan dengan energi band gap film tipis ZnO tanpa doping. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Ma *et al* (2019), menyatakan celah pita menjadi semakin sempit dengan bertambahnya persentase dopan Cu. Film tipis ZnO:Cu (5%) memiliki energi gap yang paling kecil dibandingkan dengan sampel lainnya. Hal ini disebabkan oleh film tipis memiliki persentase Cu tertinggi yang telah dikonfirmasi oleh analisis EDX. Dengan demikian, film tipis ZnO:Cu (5%) dapat menyerap panjang gelombang cahaya tampak yang lebih lebar sehingga

memungkinkan untuk diaplikasikan sebagai lapisan absorber sel surya yang berbasis film tipis.

7.3 Morfologi dan Unsur Kimia Penyusun Film Tipis ZnO:Cu

Untuk morfologi film tipis ZnO:Cu dipelajari dengan menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM). Morfologi permukaan film tipis ZnO:Cu dengan konsentrasi doping Cu ditunjukkan pada Gambar 7.4.

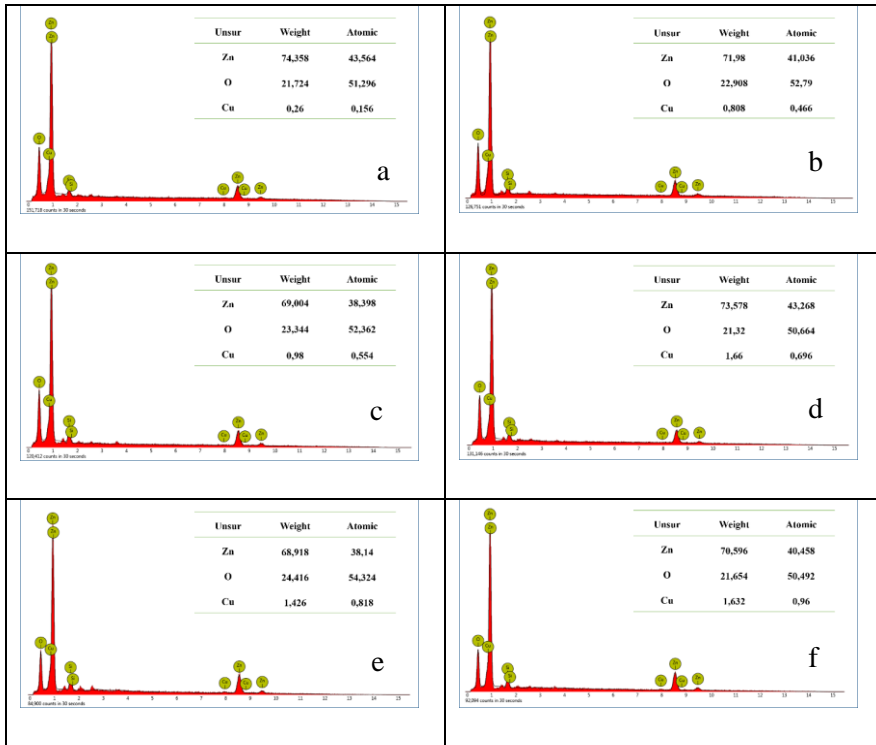


Gambar 7.4. Morfologi Permukaan Film Tipis ZnO:Cu dengan variasi doping Cu a) ZnO, b) ZnO:Cu 1%, c) ZnO:Cu 2%, d) ZnO:Cu 3%, d) ZnO:Cu 3%, e) ZnO:Cu 4%, dan d) ZnO:Cu 5%.

Berdasarkan Gambar 7.4.a, terlihat jelas bahwa film tipis ZnO tanpa doping ditunjukkan dengan morfologi yang padat dan menutupi substrat dengan baik, dimana masih terdapat penggumpalan memanjang pada permukaan film yang dihasilkan.

Penambahan doping Cu pada film tipis ZnO menunjukkan perubahan yang cukup drastis pada morfologi film tipis ZnO. Misalnya pada sampel film tipis ZnO yang didoping 1% konsentrasi Cu, terlihat bahwa film lebih merata dan halus dengan penggumpalan yang lebih kecil ukurannya (lihat Gambar 7.4.b). Pada penambahan konsentrasi doping Cu 2% sampai 5% terlihat bahwa film yang terbentuk menunjukkan distribusi butiran bola yang seragam dan kompak (Gambar 7.4.c-e). Meskipun pada sampel 3% terlihat ada *cracking* diantara butiran bola yang membentuk *grain boundary* (Gambar 7.4.c). Ukuran *grain boundary* semakin kecil dengan penambahan konsentrasi Cu pada film ZnO. Ditunjukkan bahwa film tipis ZnO yang didoping dengan Cu 3% memiliki butiran kristal dengan ukuran yang lebih kecil dan terdistribusi secara merata dengan dikelilingi pori yang berukuran cukup homogen (Gambar 7.4.d). Sementara itu, untuk penambahan konsentrasi 4% dan 5%, terlihat bahwa butiran kristal lebih padat dan seragam dengan ukuran butiran kristal yang lebih kecil (gambar 7.4.e dan 7.4.f). Berdasarkan penelitian sebelumnya, diungkapkan bahwa struktur berpori pada film tipis ZnO yang diberikan doping akan dapat melakukan lebih banyak proses penyerapan (Rajasekaran *et al.*, 2020). Hal tersebut menunjukkan bahwa perubahan morfologi permukaan pada film tipis ZnO dipengaruhi oleh konsentrasi doping Cu yang diberikan. Sebagaimana telah diketahui, morfologi dari film tipis ZnO juga dipengaruhi oleh kondisi fabrikasi, dan pada penelitian ini, terlihat jelas ion dopan Cu dapat mengurangi penggumpalan dan mengubah morfologi film tipis yang dihasilkan (Pourrahimi *et al.*, 2014; Vallejo *et al.*, 2020).

Selanjutnya, untuk mengetahui unsur kimia penyusun film tipis ZnO:Cu dikarakterisasi dengan menggunakan Energy Dispersive X-Ray (EDX). Gambar 7.5 menunjukkan spektrum EDX dari film tipis ZnO murni dan ZnO doping Cu.



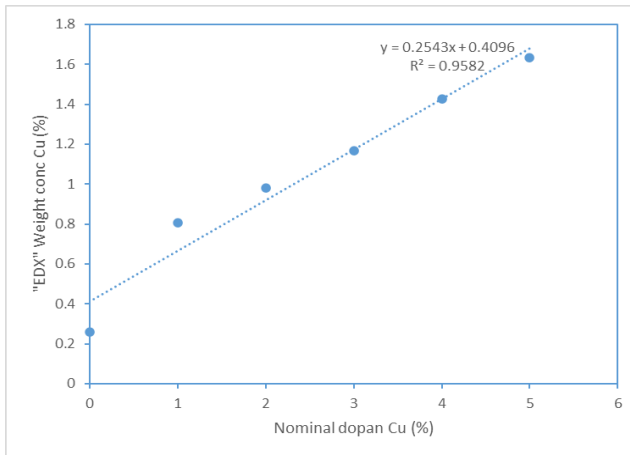
Gambar 7.5. Analisis unsur penyusun film tipis (a) ZnO, (b) ZnO:Cu (1%), (c) ZnO:Cu (2%), (d) ZnO:Cu (3%), (e) ZnO:Cu (4%), dan (f) ZnO:Cu (5%)

Gambar 7.5a. merupakan spektrum EDX untuk film tipis ZnO murni. Dari gambar terlihat bahwa pada film tipis yang dihasilkan terdapat pengotor dari unsur Cu yang merupakan unsur doping pada film tipis ZnO:Cu. Hal tersebut dimungkinkan karena pembuatan sampel ZnO murni dilakukan terakhir setelah proses pembuatan sampel ZnO doping Cu. Pengotor tersebut bergabung pada saat pembuatan, dimana krusibel yang digunakan adalah sama pada saat *annealing*. Spektrum EDX menunjukkan elemen Zn dan O yang ada pada film tipis dengan rasio stoikiometri sekitar 43, 56 dan 51,30 serta Cu 0,16. Pada Gambar 7.5b sampai 7.5f menunjukkan bahwa persentase atom untuk unsur Cu terus mengalami

peningkatan sebagaimana jumlah doping Cu kedalam film tipis ZnO juga terus meningkat seperti yang ditunjukkan pada Tabel 7.3. Hal tersebut menunjukkan bahwa atom Cu secara efektif dapat bercampur dengan film tipis ZnO. Penggabungan atom Cu pada matriks ZnO diasumsikan melalui cara menempati atau mengganti beberapa atom Zn (Liu *et al.*, 2018), karena adanya kesamaan jejari atom antara Zn dan Cu. Pengaruh doping material Cu terhadap film tipis ZnO dapat dilihat pada Gambar 7.6.

Tabel 7.3. *Atomic dan Weight concentration* film tipis ZnO:Cu

Sampel	O		Zn		Cu	
	Atomic (%)	Weight (%)	Atomic (%)	Weight (%)	Atomic (%)	Weight (%)
ZnO	51,296	21,724	43,564	74,358	0,156	0,260
ZnO:Cu (1%)	52,790	22,908	41,036	71,980	0,466	0,808
ZnO:Cu (2%)	52,362	23,344	38,398	69,004	0,554	0,980
ZnO:Cu (3%)	50,664	21,320	43,268	73,578	0,696	1,166
ZnO:Cu (4%)	54,324	24,416	38,140	68,918	0,818	1,426
ZnO:Cu (5%)	50,492	21,654	40,458	70,596	0,960	1,632



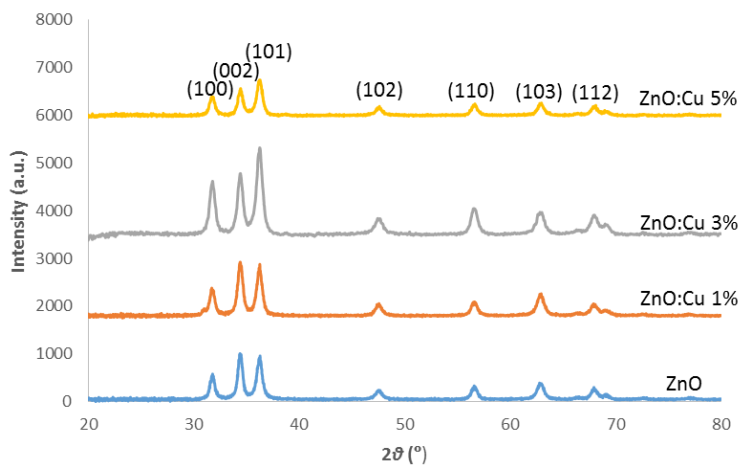
Gambar 7.6. Grafik “EDX” *weight concentration* Cu sebagai fungsi Nominal dopan Cu

Gambar 7.6 menunjukkan bahwa nilai *weight concentration* unsur Cu meningkat secara linear dengan persamaan $y = 0,2543x + 0,4096$. Hal tersebut memiliki arti bahwa bertambahnya persentase dopan Cu berbanding lurus terhadap nilai *atomic and weight concentration* (Roguai & Djelloul, 2020). Hubungan linier juga dapat dilihat dari koefisien determinasi atau nilai r^2 . Dari hasil analisis didapatkan bahwa r^2 sebesar 0,9582 atau sekitar 0,96. Itu artinya variabel penambahan doping Cu mampu menjelaskan sebesar 96% terhadap variabel perubahan morfologi permukaan yang terjadi pada film tipis ZnO:Cu. Sementara 4% sisanya dijelaskan oleh pengaruh yang lain.

7.4 Pengujian Struktur Film Tipis ZnO:Cu dengan XRD

Pengujian XRD menyediakan data difraksi dan kuantisasi intensitas difraksi di sudut-sudut tertentu material. Data yang diperoleh dari XRD berupa intensitas difraksi sinar-X dan sudut 2θ . Setiap pola yang muncul pada pola XRD mewakili satu bidang kristal yang memiliki orientasi tertentu. Sinar yang mengenai sampel akan dihamburkan oleh partikel yang membentuk film tipis. Ada

sinar hamburan yang saling menghilangkan (interferensi destruktif) dan ada pula yang saling menguatkan (interferensi konstruktif). Semakin banyak sinar yang saling menguatkan maka puncak-puncak intensitas yang terbentuk juga semakin tajam. Spektrum XRD untuk film tipis ZnO:Cu dengan variasi konsentrasi Cu ditunjukkan pada Gambar 7.7, terlihat bahwa film tipis ZnO: Cu memiliki puncak-puncak difraksi yang sama dengan film tipis ZnO. Hal tersebut menunjukkan bahwa penambahan konsentrasi Cu tidak mempengaruhi struktur dari film tipis yang dihasilkan.



Gambar 7.7 Spektrum XRD dari Film Tipis ZnO:Cu dengan variasi konsentrasi doping Cu

Spektrum XRD dari film tipis ZnO doping Cu yang diperoleh, kemudian dicocokkan dengan data ICDD (International Center for Diffraction Data) no. 00-005-0664. Dari spektrum XRD pada Gambar 1 terlihat bahwa terdapat tiga puncak difraksi yang dominan pada $2\theta = 31,7$; $34,5$; dan $36,3$; yang merupakan bidang Kristal (100), (002) dan (101). Hasil tersebut menunjukkan bahwa film tipis yang terbentuk memiliki struktur polikristalin tipe wurtzite heksagonal (Abed *et al.*, 2015). Berdasarkan hasil spektrum XRD tidak menunjukkan adanya orientasi yang disukai dari kristalisasi

yang terbentuk. Hal ini terlihat dari intensitas puncak difraksi (100), (002) dan (101) yang hampir sama. Rendahnya intensitas puncak difraksi yang dihasilkan disebabkan ketebalan lapisan tipis yang terbentuk cukup tipis. Selanjutnya untuk menentukan orientasi yang disukai dari film tipis yang dihasilkan dapat ditentukan dengan menghitung nilai koefisien tekstur (TC) yang ditunjukkan pada persamaan (1) (Romero et al., 2006). Nilai TC menunjukkan orientasi yang disukai dari film tipis sepanjang arah bidang kristal. Sebuah film dikatakan memiliki orientasi yang disukai jika nilai $TC > 1$ (Aryanto et al., 2017).

$$TC = \left(\frac{I_{(hkl)} / I_{r(hkl)}}{1/n \sum I_{(hkl)} / I_{r(hkl)}} \right) \quad (7.6)$$

dimana $I(hkl)$ adalah intensitas XRD dari film tipis, n adalah jumlah pantulan yang diamati pada pola XRD, dan $I_r(hkl)$ adalah intensitas referensi. Hasil perhitungan TC selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 7.4.

Tabel 7.4 Nilai TC untuk film tipis ZnO:Cu dengan variasi doping Cu

Variation of Cu concentration	<i>hkl</i>		
	(100)	(002)	(101)
0	0.784457	1.840593	0.763366
1	0.683254	1.910785	0.778267
3	1.000456	1.486962	0.923553
5	0.861052	1.501359	0.937357

Berdasarkan Tabel 7.4 dapat dilihat bahwa semua lapisan tipis ZnO tanpa dan Cu yang didoping memiliki nilai $TC > 1$, untuk bidang kristal (002). Dengan demikian dapat dikatakan bahwa film tipis ZnO yang telah ditumbuhkan memiliki orientasi yang disukai di seluruh bidang (002). Dengan kata lain, film tipis ZnO:Cu yang dihasilkan tumbuh di sepanjang sumbu c . Pembahasan mendalam selanjutnya akan fokus pada bidang kristal (002). Hal ini dikarenakan untuk aplikasi lapisan jendela maupun absorber pada sel surya digunakan bidang kristal (002) (Husna *et al.*, 2012). Untuk nilai rata-rata ukuran kristal film tipis ZnO:Cu dapat dihitung dari *full width at half maximum* (FWHM) menggunakan rumus Scherrer (Sugihartono *et al.*, 2018):

$$D = \frac{0.89 \lambda}{\beta \cos \theta} \quad (7.7)$$

dimana D adalah ukuran kristal, k adalah faktor bentuk, adalah panjang gelombang sinar-X Cu $K\alpha$ (0,154 nm), β adalah lebar penuh pada puncak maksimum (FWHM) dan θ adalah sudut Bragg. Hasil perhitungan ukuran kristal dapat dilihat pada Tabel 7.5. Berdasarkan Tabel 7.5 terlihat jelas bahwa aksi introduksi tembaga tidak menggeser puncak difraksi film dibandingkan dengan ZnO undoped. Ini berarti ion tembaga tidak menggantikan ion Zn pada struktur film tipis, tetapi ion tembaga hanyalah interstisial pada struktur ZnO dari film. Hal itu terlihat dari spektrum XRD tidak muncul puncak difraksi baru. Alasan lain, juga dapat ditunjukkan dari nilai parameter *d-spacing* dan *lattice parameter*, c tidak ada perubahan antara ZnO undoped dan ZnO doping Cu.

Tabel 7.5. Parameter struktur film tipis ZnO:Cu dengan variasi doping Cu

Doping Cu	2 θ	FWHM	D (nm)	<i>d</i> -spacing (Å)	Lattice parameter <i>c</i> (Å)	L (Å)	V(Å ³)
0	34.39	0.50945	28.1988	1.3166	5.2161	2,2723	47.9712
1	34.39	0.56344	25.4968	1.4870	5.2161	2.2725	48.0743
3	34.44	0.61932	23.1994	1.3078	4.9753	2.1642	45.7130
5	34.42	0.57061	25.1784	1.3195	5.2117	2.2707	48.1799

Nilai ukuran kristal Cu yang tidak didoping dan ZnO yang didoping menurun dengan penambahan konsentrasi doping Cu seperti yang ditunjukkan pada Tabel 7.5. Peningkatan konsentrasi doping Cu menurunkan sifat kristalinitas lapisan tipis yang dihasilkan. Hal ini terkait dengan perilaku pemosisian atom doping dalam struktur kristal ZnO. Hampir semua atom doping dapat menggantikan atom Zn dengan kandungan Cu yang rendah. Karena jumlah doping Cu rendah dan jari-jari ionik hampir sama dengan Zn²⁺ (0,060 nm) dan Cu (0,057 nm), struktur kristal ZnO tidak terlalu terdistorsi. Selain alasan jari-jari ionik, energi Madelung juga kemungkinan mempengaruhi substitusi atom Zn oleh dopan. Substitusi atom dopan pada atom Zn terus terjadi dengan penambahan konsentrasi dopan sampai terjadi batas kelarutan bahan inang.

Parameter kisi *c* dihitung menggunakan persamaan (Aryanto *et al.*, 2016):

$$a = \frac{\lambda}{\sqrt{3} \sin \theta} \sqrt{h^2 + hk + k^2} \quad (7.8)$$

$$c = \frac{\lambda}{\sin \theta} \quad (7.9)$$

Untuk menghitung jarak antaratom atau d-spacing, digunakan rumus sebagai berikut:

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4(h^2 + hk + l^2)}{3a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (7.10)$$

Panjang ikatan Zn-O dapat dihitung menggunakan rumus:

$$L = \sqrt{\left(\frac{a^3}{3}\right) + \left(\left(\frac{1}{2}\right) - u\right)^2 c^2} \quad (7.11)$$

Dengan $u = \frac{a^2}{3c^2} + 0,25$ adalah parameter potensial dari struktur heksagonal. Di samping volume sel satuan struktur heksagonal dapat diperoleh sebagai berikut persamaan:

$$V = 0.868 \times a^2 \times c \quad (7.12)$$

Berdasarkan Tabel 7.5 dapat dilihat, perubahan parameter mempengaruhi panjang ikatan ZnO (L) dan volume satu satuan sistem heksagonal (V). Semakin besar volume mulai ZnO tanpa doping ke ZnO doping karena parameter kisi juga semakin besar. Panjang ikatan juga meningkat pada ZnO tanpa doping menjadi 1% doping Cu. Hal ini sesuai dengan penelitian sebelumnya oleh Aryanto *et al.*, (2017).

Selanjutnya berdasarkan data XRD juga dapat diperoleh informasi tentang regangan kisi, tegangan dan densitas dislokasi. Regangan kisi, sepanjang sumbu c dapat dihitung dengan mengikuti rumus Nafees *et al.*(2012)

$$\varepsilon = \frac{\beta}{4 \tan \theta} \quad (7.13)$$

Untuk nilai tegangan film dapat dihitung dengan menggunakan rumus Li *et al.* (2013).

$$\sigma = -233 \varepsilon \quad (7.14)$$

Dimana σ adalah nilai tegangan film tipis dan tanda negatif menunjukkan tegangan tekan. Menurut regangan kisi film itu juga mempengaruhi panjang garis dislokasi per satuan volume kristal. Seperti diketahui kerapatan dislokasi kristal dapat dihitung oleh Aryanto *et.al.* (2017).

$$\rho = \frac{\sqrt{12} \varepsilon}{D d} \quad (7.15)$$

Hasil perhitungan regangan kisi, tegangan dan densitas dislokasi dapat dilihat pada Tabel 7.6.

Tabel 7.6. Hasil perhitungan densitas kisi, tegangan dan dislokasi film tipis ZnO:Cu

Doping Cu	Lattice strain, ε	Stress, σ	Dislocation density, ρ (line/nm ²)
0	0.4116	-95.8956	0.00384
1	0.4552	-106.0583	0.00416
3	0.4996	-116.3970	0.00504
5	0.4606	-107.2992	0.00482

Dari Tabel 7.6 terlihat jelas bahwa regangan kisi film tipis ZnO meningkat dengan meningkatnya konsentrasi dopan Cu hingga 3% dan kemudian menurun. Dapat dikatakan bahwa tegangan film berkurang dengan meningkatnya konsentrasi dopan Cu. Nilai tegangan menunjukkan keadaan gaya antara atom penyusun kristal. Tegangan sebanding dengan besarnya gaya ikat antaratom, sehingga semakin kecil tegangan akan berpengaruh pada gaya ikat atom. Gaya ikat antaratom sebanding dengan energi ikat suatu kristal, energi ini diperlukan untuk memisahkan atom-atom dalam suatu kristal. Getaran kisi yang berperan dalam pembentukan energi pada kristal menunjukkan keseragaman susunan atom-atom dalam kristal. Atom-atom dalam susunan ini tidak bebas bergerak karena adanya

gaya. Atom-atom penyusun kristal selalu bergetar (*vibrate*) ke posisi setimbang, sehingga semakin besar nilai tegangan pada film maka susunan atom-atom dalam film semakin homogen. Film dengan struktur tidak homogen dapat dilihat dari kerapatan dislokasi.

BAB 8

PENUTUP

Buku ini diharapkan dapat memberikan informasi bagi pembaca yang berminat belajar mengenai teknik deposisi film tipis, karakterisasi struktur kristal, analisis hasil deposisi serta prospek aplikasi dari material semikonduktor ZnO maupun ZnO:Cu. Penulis memaparkan metode deposisi film tipis dengan bahan semikonduktor ZnO:Cu dengan menggunakan metode *sol-gel spin coating*. Hasil deposisi film tipis selanjutnya dikarakterisasi menggunakan UV-Vis spektroskopi untuk mengetahui sifat optik dari film tipis yang dihasilkan, sedangkan untuk struktur dan morfologi dari film tipis ZnO:Cu di karakterisasi menggunakan difraksi sinar-X dan SEM-EDX.

Berdasarkan analisis dengan UV-Vis spektroskopi menunjukkan bahwa penambahan konsentrasi doping Cu akan menurunkan nilai band gap dari film tipis ZnO, dimana penambahan konsentrasi Cu 5% memperoleh nilai energi band gap sebesar 2,895 eV. Dari karakterisasi SEM-EDX dihasilkan morfologi permukaan film semakin homogen dengan penambahan konsentrasi doping Cu dan doping yang diberikan ke dalam film tipis ZnO juga dapat bergabung dengan baik. Hal tersebut terkonfirmasi dari hasil karakterisasi EDX, dimana komposisi yang ditunjukkan mendekati dengan komposisi pada saat pembuatan film. Dan dari karakterisasi XRD diperoleh bahwa film tipis ZnO:Cu memiliki struktur polikristalin tipe wurtzite heksagonal dengan puncak dominan (002) pada sumbu c yang dikonfirmasi dengan nilai koefisien tekstur (TC) lebih dari satu.

DAFTAR PUSTAKA

- Acosta, D., López-Suárez, A., Magaña, C., & Hernández, F. (2018). Structural, electrical and optical properties of ZnO thin films produced by chemical spray using ethanol in different amounts of the sprayed solution. *Thin Solid Films*, 653(2017), 309–316.
- Acosta, H.F.; Cogollo Pitalúa, R.; Almanza, O. Electron Paramagnetic Resonance in Zn_{1-x}CoxO. *J. Magn. Magn. Mater.* 2013, 329, 39–42.
- Ahmed, S.A. Effect of Annealing Temperature and Dopant Concentration on The Structure, Optical, and Magnetic Properties of Cu-doped ZnO Nanopowders. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 2017, 28, 3733–3739.
- Alamdari, S., Tafreshi, M. J., & Ghamsari, M. S. (2017). The effects of indium precursors on the structural, optical and electrical properties of nanostructured thin ZnO films. *Materials Letters*, 197, 94–97.
- Arif, M., Sanger, A., Vilarinho, P. M., & Singh, A. (2018). Effect of Annealing Temperature on Structural and Optical Properties of Sol–Gel-Derived ZnO Thin Films. *Journal of Electronic Materials*, 47(7), 3678–3684.
- Arumkumar., S. K. Kuanr, & K. S. Babu. (2015). *Thin Film: Deposition, Growth Aspects, and Characterization. Thin Film Structure in Energy Applications*. Springer International

Publisher AG: 1-49.

- Asikuzun, E., Ozturk, O., Arda, L., & Terzioglu, C. (2018). Preparation, growth and characterization of nonvacuum Cu-doped ZnO thin films. *Journal of Molecular Structure*, 1165, 1–7.
- Asmatulu, R. (2012). Nanocoatings for corrosion protection of aerospace alloys. In *Corrosion Protection and Control Using Nanomaterials*. Woodhead Publishing Limited.
- Astuti, B., Zhafirah, A., Carieta, V. A., Hamid, N., Marwoto, P., Sugianto, Nurbaiti, U., Ratnasari, F. D., Putra, N. M. D., & Ariyanto, D. (2020). X-ray diffraction studies of ZnO : Cu thin films prepared using sol-gel method. *Journal of Physics: Conference Series*, 1567(022004).
- Astuti, B, Sugianto, Maftuchah I, Firmahaya N.A. Marwoto P, Ratnasari F.D. Muttaqin R, Setyaningsih NE. Aryanto D, Isnaeni, 2019, Phololuminescence Study of ZnO Al Thin Film With Different Power Plasma, *J. Phys. Conf Ser*, 1567, 022004.
- Atay, F., & Durmaz, D. (2020). Structural , Optical and Surface Properties of Multilayer Anatase-TiO 2 Films Grown by Sol-Gel Spin Coating Technique. *Journal of Electronic Materials*.
- Bai, Z., Yang, J., Wang, D., Bai, Z., Yang, J., & Wang, D. (2011). *Thin film CdTe solar cells with an absorber layer thickness in micro- and sub-micrometer scale Thin film CdTe solar cells with an absorber layer thickness in micro- and sub-micrometer scale*. 143502(May 2013), 2011–2014.
- Balakrishnan G, Sinha V, Peethalay P, Kumar M, Nimat GR, Husain H.J. Bato0 KM, Raslan EH, (2020), Structural and Optical properties of ZnO Thin Film Prepared by Sol Gel Spin Coating. *Material Science Poland*. 38(1), 17-22.
- Bedia, A., Bedia, F. Z., Aillerie, M., Maloufi, N., & Benyoucef, B.

- (2015). Morphological and Optical properties of ZnO thin films prepared by spray pyrolysis on glass substrats at various temperatures for integration in solar cell. *Energy Procedia*, 74, 529–538.
- Biswas, N., Sharmin, M., & Podder, J. (2018). Sol-gel Spin Coating: A Promising Technique for Preparation of Multilayer Metal Oxide Thin Films for Optoelectronic Applications. *International Conference on Physics, March*.
- Boudjouan, F., Chelouche, A., Touam, T., Djouadi, D., & Ouerdane, Y. (2016). *Materials Science in Semiconductor Processing Influence of Pb doping on the structural , morphological and optical properties of sol-gel ZnO thin fi lms*. 41, 382–389.
- Buwarda, S. (2019). AZTS dengan Metode Sol-Gel Sebagai Lapisan Buffer Bebas Cadmium Pada Sel Surya CZTS. *Jurnal Keteknikn Dan Sains (JUTEKS) – LPPM UNHAS*, 1(3), 80–86.
- Chakraborty, M.; Ghosh, A.; Thangavel, R. Experimental and Theoretical Investigations of Structural and Optical Properties of Copper Doped ZnO Nanorods. *J. Sol-Gel Sci. Technol.* 2015, 74, 756–764.
- Chawla, R., Singhal, P., & Kumar, A. (2020). Photovoltaic Review of all Generations : Environmental Impact and Its Market Potential. *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, 0123456789.
- Chen, Y., Ke, Y., Sung, M., & Chang, L. (2020). Surface & Coatings Technology Rapid thermal annealing of Cr – Si – N, Ta – Si – N , and Zr – Si – N coatings in glass molding atmospheres. *Surface & Coatings Technology*, 389(125662).
- Das, B.K.; Das, T.; Parashar, K. (2017) Structural, Band gap Tuning and Electrical Properties of Cu Doped ZnO Nanoparticles Synthesized by Mechanical Alloying. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, 28, 15127–15134.

- Dauletbekova, A., Vlasukova, L., Baimukhanov, Z., Akilbekov, A., Kozlovskiy, A., Giniyatova, S., Seitbayev, A., Usseinov, A., & Akylbekova, A. (2019). Synthesis of ZnO Nanocrystals in SiO₂/Si Track Template: Effect of Electrodeposition Parameters on Structure. *Physica Status Solidi (B) Basic Research*, 256(5), 2–7.
- Dejam, L., Mohammad Elahi, S., Nazari, H. H., Elahi, H., Solaymani, S., & Ghaderi, A. (2016). Structural and optical characterization of ZnO and AZO thin films: the influence of post-annealing. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 27(1), 685–696.
- Dhaouadi, M., Jlassi, M., Sta, I., Miled, I. Ben, Mousdis, G., Kompitsas, M., & Dimassi, W. (2018). Physical Properties of Copper Oxide Thin Films Prepared by Sol-Gel Spin-Coating Method. *American Journal of Physics and Applications*, 6(2), 43–50.
- Durdán, M., Kačur, J., Laciak, M., & Flegner, P. (2019). Thermophysical properties estimation in annealing process using the iterative dynamic programming method and gradient method. *Energies*, 12(3267), 1–24.
- Enigochitra, A. S., Perumal, P., Sanjeeviraja, C., Deivamani, D., & Boomashri, M. (2016). Influence of substrat temperature on structural and optical properties of ZnO thin films prepared by cost-effective chemical spray pyrolysis technique. *Superlattices and Microstructures*, 90, 313–320.
- Evangelisti, L., Vollaro, R. D. L., & Asdrubali, F. (2019). Latest advances on solar thermal collectors: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114(March), 109318.
- Fang, M.; Tang, C.M.; Liu, Z.W. (2018) Microwave-Assisted Hydrothermal Synthesis of Cu Doped ZnO Single Crystal Nanoparticles with Modified Photoluminescence and

- Confirmed Ferromagnetism. *J. Electron. Mater.*, 47, 1390–1396.
- Fianti, & Kim, K. H. (2015). Investigation on structural modification of CuInSe₂ solar cell absorber by Al addition. *Journal of Ceramic Processing Research*, 16(3), 335–339.
- Ganesh, V., Yahia, I. S., AlFaify, S., & Shkir, M. (2017). Sn-doped ZnO nanocrystalline thin films with enhanced linear and nonlinear optical properties for optoelectronic applications. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 100, 115–125.
- Gaurav, A., Beura, R., Kumar, J. S., & Thangadurai, P. (2019). Study on the effect of copper ion doping in zinc oxide nanomaterials for photocatalytic applications. *Materials Chemistry and Physics*, 230(March 2018), 162–171.
- Gould, R. D, S. Kasap, & A. K. Ray. (2017). *Thin Film: Springer Handbook of Electronic and Photonic Material*. Springer International Publisher AG: 1-62
- Haidemenopoulos, G. N. (2018). *Physical Metallurgy Principles and Design* (Taylor & Francis Group (ed.)). CRC Press.
- Hanh, N. T., Le, N., Tri, M., Thuan, D. Van, Hung, M., & Tung, T. (2019). Journal of Photochemistry & Photobiology A : Chemistry Monocrotophos pesticide e ff ectively removed by novel visible light driven Cu doped ZnO photocatalyst. *Journal of Photochemistry & Photobiology, A: Chemistry*, 382(May), 111923.
- Harish S.V, Suhas S, Abhinav, Harish S, & Vinayaka R. (2019). Solar Panel Maintenance System. *Ijise*, 1(2), 88–92.
- Hassan, K., Farzana, R., & Sahajwalla, V. (2019). In-situ fabrication of ZnO thin film electrode using spent Zn–C battery and its electrochemical performance for supercapacitance. *SN Applied Sciences*, 1(4).
- Hasyim, N. H., Subramani, S., Devarajan, M., & Ibrahim, A. R. (2015). Structural and surface characterization of undoped

ZnO and Cu doped ZnO using sol-gel spin coating method. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 4187-5

- Hong, M. H., Choi, H., Kim, Y., Kim, T., Cho, H. H., Driss, Z., Driss, D., Bouabidi, A., Euchy, S., & Park, H. H. (2019). Ti doping effects on the Seebeck coefficient and electrical conductivity of mesoporous ZnO thin film. *Materials Chemistry and Physics*, 235(May), 121757.
- Jacob, A. A., Balakrishnan, L., Meher, S. R., Shambavi, K., & Alex, Z. C. (2017). Structural, optical and photodetection characteristics of Cd alloyed ZnO thin film by spin coating. *Journal of Alloys and Compounds*, 695, 3753–3759.
- Javadi, F. S., Metselaar, H. S. C., & Ganesan, P. (2020). Performance improvement of solar thermal systems integrated with phase change materials (PCM), a review. *Solar Energy*, 206(May), 330–352.
- Jin, Y., Song, B., Jia, Z., Zhang, Y., Lin, C., Wang, X., & Dai, S. (2017). Improvement of Swanepoel method for deriving the thickness and the optical properties of chalcogenide thin films. *Optics Express*, 25(1), 1214–1222.
- Kahouli, M., Barhoumi, A., Bouzid, A., Al-Hajry, A., & Guermazi, S. (2015). Structural and optical properties of ZnO nanoparticles prepared by direct precipitation method. *Superlattices and Microstructures*, 85, 7–23.
- Kaviyarasu, K., Maria Magdalane, C., Kanimozhi, K., Kennedy, J., Siddhardha, B., Subba Reddy, E., Rotte, N. K., Sharma, C. S., Thema, F. T., Letsholathebe, D., Mola, G. T., & Maaza, M. (2017). Elucidation of photocatalysis, photoluminescence and antibacterial studies of ZnO thin films by spin coating method. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 173, 466–475.

- Kayani, Z.N.; Iram, S.; Rafi, R. (2018) Effect of Cu Doping on The Structural, Magnetic and Optical Properties of ZnO Thin Films. *Appl. Phys. Mater. Sci. Process*, 124, 468–470.
- Kaviyarasu, K., Mola, G. T., Oseni, S. O., Kanimozhi, K., Magdalane, C. M., Kennedy, J., & Maaza, M. (2019). ZnO doped single wall carbon nanotube as an active medium for gas sensor and solar absorber. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30(1), 147–158.
- Kim, D. H., Christopher, P., Kim, D. H., Muzzillo, C. P., Tong, J., Palmstrom, A. F., Larson, B. W., Choi, C., Harvey, S. P., Glynn, S., Whitaker, J. B., Zhang, F., Li, Z., Lu, H., Hest, M. F. A. M. Van, Berry, J. J., Mansfield, L. M., Huang, Y., & Yan, Y. (2019).
- Bimolecular Additives Improve Wide-Band- Gap Perovskites for Efficient Tandem Solar Cells with CIGS. *Joule*, 3(7), 1734–1745.
- Kim, J. H. (2018). *Developing Inorganic Thin Film Solar Cells using Earth-Abundant Cu₂ZnSn(S,Se)₄ Absorber Materials based on Sputtering Process*.
- Kraan, O., Chappin, E., Jan, G., & Nikolic, I. (2019). *The influence of the energy transition on the significance of key energy metrics*. 111(May), 215–223. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.032>
- Kumar, K. V. A., Lakshminarayana, B., Vinodkumar, T., & Subrahmanyam, C. (2019). Journal of Environmental Chemical Engineering Cu-ZnO for visible light induced mineralization of Bisphenol-A: Impact of Cu ion doping. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(3), 103057.
- Kumar, V., Singh, N., Mehra, R. M., Kapoor, A., Purohit, L. P., & Swart, H. C. (2013). Role of film thickness on the properties of ZnO thin films grown by sol-gel method. *Thin Solid*

Films, 539, 161–165.

- Lany, S. (2015). Semiconducting transition metal oxides Manuscript version : Accepted Manuscript Manuscript version : Accepted Manuscript. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 27.
- Lee J.H. Kwonwoo Oh, Jung K. Wilson K.C. Lee M.J. (2020). Tuning the Morphology and Properties of Nanostructured Cu ZnO Thin Films Using Two Step Sputtering Technique. *Metals*. 10.437.
- Li, Y., Kong, T., & Shen, S. (2019). *Artificial Photosynthesis with Polymeric Carbon Nitride : When Meeting Metal Nanoparticles , Single Atoms , and Molecular Complexes*. 1900772, 1–18.
- Liu, H., Ran, Y., Jia, L., Lu, H., Zhao, S., Zhao, H., Li, Y., Jiang, Z., & Wang, Z. (2018). Structural and optical properties of Cu–N codoped ZnO thin films deposited by magnetron cosputtering. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29(12), 9901–9907.
- Liu, X., Xu, D., Liao, C., Fang, Y., & Guo, B. (2018). Journal of Drug Delivery Science and Technology Development of a promising drug delivery for formononetin: Cyclodextrin-modified single-walled carbon nanotubes. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 43(September 2017), 461–468.
- Liu, H.; Cheng, X.; Liu, H.; Guo, J.F.; Wu, H.S.; Gehring, G.A. (2013) Structural, Optical and Magnetic Properties of Cu and V co-doped ZnO Nanoparticles. *Phys. E Low Dimens. Syst. Nanostruct*, 47, 1–5.
- Lung, C., Toma, M., Pop, M., Marconi, D., & Pop, A. (2017). Characterization of the structural and optical properties of ZnO thin films doped with Ga, Al and (Al+Ga). *Journal of Alloys and Compounds*, 725, 1238–1243.

- Ma, Z., Ren, F., Ming, X., Long, Y., & Volinsky, A. A. (2019). Cu-Doped ZnO Electronic Structure and Optical Properties Studied by First-Principles Calculations and Experiments. *Materials*, *12*(196).
- Mahajan, B. K., Kumar, N., Chauhan, R., Srivastava, V. C., & Gulati, S. (2019a). Mechanistic evaluation of heterocyclic aromatic compounds mineralization by a Cu doped ZnO photo-catalyst. *Photochemical and Photobiological Sciences*, *18*(6), 1540–1555.
- Mahajan, B. K., Kumar, N., Chauhan, R., Srivastava, V. C., & Gulati, S. (2019b). Mechanistic evaluation of heterocyclic aromatic compounds mineralization by Cu doped ZnO photo-catalyst. *Photochemical & Photobiological Sciences*.
- Marwoto, P., Darmaputra, N. M., Othaman, Z., & Wibowo, E. (2012). Peningkatan Kualitas Film Tipis CdTe sebagai Absorber Sel Surya dengan Menggunakan Doping Tembaga (Cu). *Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia*, *8*(2), 215–221.
- Marwoto, P., & Wibowo, E. (2015). Variasi Suhu Deposisi Pada Struktur, Sifat Optik Dan Listrik Film Tipis Seng Oksida Dengan Doping Galium (Znoga). *Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia*, *11*(1), 93–99.
- Marwoto, Putut, Sugianto, Sulhadi, Aryanto, D., Wibowo, E., & Yanti. (2015). Highly Oriented ZnO:Al Thin Films as an Alternatif Transparent Conducting Oxide (TCO) for Windows Layer of Solar Cells. *Advanced Materials Research*, *1123*(August), 364–367.
- Mia, M. N. H., Pervez, M. F., Hossain, M. K., Reefaz Rahman, M., Uddin, M. J., Al Mashud, M. A., Ghosh, H. K., & Hoq, M. (2017). Influence of Mg content on tailoring optical bandgap of Mg-doped ZnO thin film prepared by sol-gel method. *Results in Physics*, *7*, 2683–2691.
- Mimouni, R., Boubaker, K., & Amlouk, M. (2015). Investigation of

structural and optical properties in Cobalt-Chromium co-doped ZnO thin films within the Lattice Compatibility Theory scope. *Journal of Alloys and Compounds*, 624, 189–194.

Mulyani, Sri. (2019). *Pengaruh Daya Plasma terhadap Struktur dan Sifat Optik Film Tipis ZnO Doping Galium yang Ditumbuhkan dengan DC Magnetron Sputtering*. Skripsi. Semarang: FMIPA UNNES

Murali, D. S., Kumar, S., Choudhary, R. J., Wadikar, A. D., Jain, M. K., & Subrahmanyam, A. (2015). Synthesis of Cu₂O from CuO thin films: Optical and electrical properties. *AIP Advances*, 5(4), 1–6.

Muresan, L. M. (2015). Corrosion Protective Coatings for Ti and Ti Alloys Used for Biomedical Implants. In *Intelligent Coatings for Corrosion Control*. Elsevier Inc.

Ng, Z. N., Chan, K. Y., & Tohsophon, T. (2012). Effects of annealing temperature on ZnO and AZO films prepared by sol-gel technique. *Applied Surface Science*, 258(24), 9604–9609.

Nimbalkar, A. R., & Patil, M. G. (2017). Synthesis of ZnO thin film by sol-gel spin coating technique for H₂S gas sensing application. *Physica B: Condensed Matter*, 527(July), 7–15.

Ogugua S.N. Ntwaeaborwa DM. Swart H.C. (2020). Latest Development on Pulsed Laser Deposited Thin Films For Advanced Luminescence Applications. *Coating*, 10, 1078.

Ouidette, S.; Djamel, D.; Laid, H. (2018) Structural and Optical Properties of Cu Doped ZnO Aerogels Synthesized in Supercritical Ethanol. *J. Porous Mater.*, 25, 595–601.

Parida, B., Iniyam, S., & Goic, R. (2011). A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1625–1636.

Patil, N. B., Nimbalkar, A. R., & Patil, M. G. (2018). ZnO thin film

- prepared by a sol-gel spin coating technique for NO₂ detection. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, 227(2), 53–60.
- Peng, H.X.; Liu, G.X.; Dong, X.T.; Wang, J.X.; Xu, J.; Yu, W.S. (2011) Preparation and Characteristics of Fe₃O₄@YVO₄:Eu³⁺ Bifunctional Magnetic-Luminescent Nanocomposites. *J. Alloy. Compd.* 509, 6930–6934.
- Poongodi, G., Kumar, R. M., & Jayavel, R. (2015). Structural, optical and visible light photocatalytic properties of nanocrystalline Nd doped ZnO thin films prepared by spin coating method. *Ceramics International*, 41(3), 4169–4175.
- Purohit, A., Chander, S., Sharma, A., Nehra, S. P., & Dhaka, M. S. (2015). Impact of low temperature annealing on structural, optical, electrical and morphological properties of ZnO thin films grown by RF sputtering for photovoltaic applications. *Optical Materials*, 49, 51–58.
- Rahmane, S., Aida, M. S., Djouadi, M. A., & Barreau, N. (2015). Effects of thickness variation on properties of ZnO:Al thin films grown by RF magnetron sputtering deposition. *Superlattices and Microstructures*, 79, 148–155.
- Rherari, A., Addou, M., & Haris, M. (2017). Structural and optical characterization of (Sn/Li) co-doped ZnO thin films deposited by spray pyrolysis technique. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28(21), 15762–15767.
- Roguai, S., & Djelloul, A. (2020). A structural and optical properties of Cu - doped ZnO films prepared by spray pyrolysis. *Applied Physics A*, 126(122), 1–8.
- Ruzgar, S., & Caglar, M. (2019). The effect of Sn on electrical performance of zinc oxide based thin film transistor. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30(1), 485–490.
- Samavati, A., Nur, H., Ismail, A. F., & Othaman, Z. (2016). Radio

- frequency magnetron sputtered ZnO/SiO₂/glass thin film: Role of ZnO thickness on structural and optical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 671, 170–176.
- Sanjeev, S., & Kekuda, D. (2015a). Effect of annealing temperature on the structural and optical properties of zinc oxide (ZnO) thin films prepared by spin coating process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 73(1).
- Sanjeev, S., & Kekuda, D. (2015b). Effect of annealing temperature on the structural and optical properties of zinc oxide (ZnO) thin films prepared by spin coating process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 73(1), 0–5.
- Sarkar, D.; Ghosh, C.K.; Chattopadhyay, K.K. (2017) Carbon Doped ZnO Thin Film: Unusual Nonlinear Variation in Bandgap and Electrical Characteristic. *Appl. Surf. Sci.*, 418, 252–257
- Shaikh, S. K., Inamdar, S. I., Ganbavle, V. V., & Rajpure, K. Y. (2016). Chemical bath deposited ZnO thin film based UV photoconductive detector. *Journal of Alloys and Compounds*, 664, 242–249.
- Sharma, S., Jain, K. K., & Sharma, A. (2015). *Solar Cells: In Research and Applications — A Review*. December, 1145–1155.
- Shukla, A. K., Sudhakar, K., & Baredar, P. (2017). Recent advancement in BIPV product technologies: A review. *Energy and Buildings*, 140, 188–195.
- Sim, J., Um, D., Kim, J., Kim, J., Jeong, K., & Lee, C. (2019). Improvement in the performance of CIGS solar cells by introducing GaN nanowires on the absorber layer. *Journal of Alloys and Compounds*, 779, 643–647.
- Sim, K. U., Wook, S., Moholkar, A. V, Ho, J., Ha, J., & Hyeok, J. (2010). Effects of dopant (Al , Ga , and In) on the characteristics of ZnO thin films prepared by RF magnetron

- sputtering system. *Current Applied Physics*, 10(3), S463–S467. Simmons, J. H., & Potter, K. S. (2000). *Optical Materials*. Academic Press.
- Singh, R. (2012). Heat Treatment of Steels : Metallurgical Principle. *Applied Welding Engineering*, 95–108.
- Smirnov, M., Baban, C., & Rusu, G. I. (2010). Structural and optical characteristics of spin-coated ZnO thin films. *Applied Surface Science*, 256(8), 2405–2408.
- Solymar, L., Walsh, D., & Syms, R. R. A. (2014). *Electrical properties of materials* (Ninth edit). OXFORD University Press.
- Sugianto, Zannah, R., Mahmudah, S. N., Astuti, B., Putra, N. M. D., AA WIBowo, Marwoto, P., Ariyanto, D., & Wibowo, E. (2016). Pengaruh Temperatur Annealing Pada Sifat Listrik Film Tipis Zinc Oksida Doping Aluminium Oksida. *Jurnal MIPA*, 39(2), 115–122.
- Suherman, I. (2016). Analisis Teknoekonomi Pengembangan Mineral Tembaga di Indonesia. *Jurnal Teknologi Mineral Dan Batubara*, 12(Mei), 117–136.
- Sun, C., Pan, F., Bin, H., Zhang, J., Xue, L., Qiu, B., Wei, Z., Zhang, Z., & Li, Y. (2018). A low cost and high performance polymer donor material for polymer solar cells. *Nature Communications*, 9(743), 1–10.
- Tang, T.Y.; Zhang, J.Q. (2018) Study on Band Structure and Spectrum of $Mg_xZn_{1-x}O$ Based on First Principles. *J. Nanoelectron. Optoelectron*, 13, 646–652.
- Tumbul, A., Aslan, F., Göktaş, A., & Mutlu, I. H. (2019). All solution processed superstrate type Cu_2ZnSnS_4 (CZTS) thin film solar cell: Effect of absorber layer thickness. *Journal of Alloys and Compounds*, 4(December), 280–288.
- Wang, L. W., Wu, F., Tian, D. X., Li, W. J., Fang, L., Kong, C. Y., & Zhou, M. (2015). Effects of Na content on structural and

- optical properties of Na-doped ZnO thin films prepared by sol-gel method. *Journal of Alloys and Compounds*, 623, 367–373.
- Xinliang C, Cangbo Y, Xinhua G, Dekun Z, Changchun W, Ying Z, Xiaodan Z. (2014). Modified Textured Surface MOCVD ZnO:B Transparent Conductive Layer for Thin Film Solar Cell. *J. Semicon.* 35(4), 043002
- Yahia, A., Attaf, A., Saidi, H., Dahnoun, M., Kheli, C., Bouhdjer, A., Saadi, A., & Ezzaouia, H. (2019). Structural, optical, morphological and electrical properties of indium oxide thin films prepared by sol gel spin coating process. *Surfaces and Interfaces*, 14(October 2018), 158–165.
- Ye, S., Ding, C., Liu, M., Wang, A., Huang, Q., & Li, C. (2019). Water Oxidation Catalysts for Artificial Photosynthesis. *Advanced Materials*, 1902069.
- Zargar RA, Shah AH, Arora M, Ahmar Mir F, (2019), Crystallographic, Spectroscopic and Electrical Study of ZnO: CdO Nanocomposite Coated Films for Photovoltaic Application, *Arabian J Science and Engineering*, 44, 6631-6636.
- Zhang, H., Ji, Z., Xia, T., Meng, H., Low-kam, C., Liu, R., & Pokhrel, S. (2012). Use of Metal Oxide Nanoparticle Band Gap To Develop a Predictive Paradigm for Oxidative Stress and Acute Pulmonary Inflammation. *American Chemical Society Nano*, 6(5), 4349–4368.
- Zhao, J., Li, Y., Yang, G., Jiang, K., Lin, H., Ade, H., & Yan, H. (2016). Efficient organic solar cells processed from hydrocarbon solvents. *NATURE ENERGY*, 1(9).
- Zheng, J.H.; Song, J.L.; Jiang, Q.; Lian, J.S. (2012) Optical Properties of Cu-doped ZnO Nanoparticles Experimental and First-Principles Theory Research. *J. Mater. Sci. Mater. Electron*, 23, 1521–1524

- Zheng, Q.; Li, Z.; Feng, L. (2013) Theoretical Study on Impurity Energy Level of Cu-doped ZnO Semiconductor. *Nat. Sci. J. Harbin Norm. Univ.*, 32, 67–70.
- Zhu, K., Yang, Y., & Song, W. (2015). Effects of substrat temperature on the structural, morphological, electrical and optical properties of Al and Ga co-doped ZnO thin films grown by DC magnetron sputtering. *Materials Letters*, 145, 279–282.
- Zwinkels, J. C. (2015). Light, Electromagnetic Spectrum. In *Encyclopedia of Color Science and Technology* (Issue January 2015, pp. 1–8).

INDEKS

A

akselerasi, 37
annealing, 6, 25, 26, 27, 31, 43, 44, 53,
62, 75, 76, 82, 83, 84

C

cooling, 31, 53
cracking, 43, 61
crucible, 31

D

deposisi, v, 6, 25, 52, 72, 90, 91

E

ethanolamine, 30

F

furnace, 31, 53

G

gaya sentrifugal, 46, 50

gelombang elektromagnetik, 32

H

heating, 31, 53
hexagonal, 20
holding, 31, 53

I

isopropanol, 29, 31, 51, 52

K

kristal, xi, xii, 1, 3, 5, 6, 10, 17, 18, 19,
20, 21, 27, 33, 34, 44, 46, 47, 48, 49,
53, 61, 64, 66, 67, 68, 70, 72

M

magnetic stirrer, 31, 44, 52

N

near infrared, 32, 55

P

photovoltaic, 1, 82, 83, 90
polikristalin, 34, 45, 65, 72
precursor, 26, 27

S

SEM-EDX, 32, 34, 53, 72, 90
semikonduktor ekstrinsik, 11
semikonduktor intrinsik, 8, 9, 10, 13
sintering, 27
sol gel, *xii*, 25, 52, 86
spin coater, 7, 26, 27, 31, 52, 91
spin coating, *v*, *vi*, *viii*, *xii*, 4, 5, 6, 23, 24,
25, 26, 27, 36, 37, 39, 41, 44, 46, 48,
51, 72, 78, 82, 83, 84, 86, 91
spinning rate, *v*, *x*, *xii*, 4, 7, 45, 47, 48,
49, 50

T

turbulensi, 37, 38, 39

V

viskositas, 36, 37, 39, 40, 41, 42

W

wurtzite, *xi*, 3, 17, 19, 20, 46, 65, 72

X

X-ray diffraction, 74, 91

Z

ZnO, *i*, *iii*, *iv*, *v*, *vi*, *vii*, *viii*, *ix*, *x*, *xi*, *xii*, *xiii*,
2, 3, 4, 5, 6, 7, 17, 18, 19, 20, 21, 22,
23, 24, 29, 31, 32, 35, 36, 43, 44, 45,
46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55,
56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65,
66, 67, 68, 69, 70, 72, 73, 74, 75, 76,
77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86,
87, 90

GLOSARIUM

CVD (chemical vapor deposition): merupakan salah satu metode deposisi film tipis secara kimia dengan menggunakan temperatur tinggi.

spray pyrolysis: merupakan salah satu metode pembuatan nanopartikel yang memanfaatkan atomisasi atau penyemprotan larutan kedalam api (flame) di atas nozel atomisasi dan akan menghasilkan partikel berupa serbuk.

ZnO (zinc oxide): merupakan material semikonduktor an organik yang sering digunakan sebagai bahan pada deposisi film tipis

ZnO:Cu (zinc oxide doping Cupper): merupakan material semikonduktor zinc oksida yang diberi pengotor tembaga sehingga dapat memperbaiki sifat dari film tipis zinc oksida.

photovoltaic (sel surya): suatu perangkat yang dapat mengkonversi sinar matahari menjadi tenaga listrik.

SEM-EDX (scanning electron microscope- energy dispersive X-ray spectroscopy): merupakan 2 perangkat analisis yang digabung menjadi satu untuk mengetahui citra permukaan film dan unsur penyusun film tipis.

Metode Sol-Gel: merupakan salah satu metode deposisi film tipis dengan beberapa tahapan seperti pembuatan sol dan gel.

Deposisi: merupakan suatu proses pembuatan film tipis dari gel menjadi padat.

Semikonduktor: merupakan sebuah bahan yang memiliki sifat konduktivitas lebih rendah dari bahan konduktor dan lebih tinggi dari bahan insulator.

X-ray diffraction: difraksi sinar-X merupakan instrumen untuk pengujian miktosuktur material.

Sputtering (DC atau RF): merupakan proses pelepasan atom-atom dari permukaan target oleh bom bardier partikel berenergi tinggi. Atom-atom dari permukaan target terlepas akibat ion yang dipercepat menumbuk permukaan target melalui proses transfer momentum.

Metode spin coating: merupakan suatu metode deposisi film tipis dengan cara meneteskan material dalam bentuk larutan ke pusat-atas permukaan substrat yang yang diletakkan di atas piringan yang dapat berputar.

spin coater: merupakan seatu instrumen untuk menumbuhkan film tipis yang berupa piringan yang dapat diputar dengan sangat cepat, baik yang dilengkapi dengan pemanas ataupun tidak.

SINTESIS FILM TIPIS ZnO:Cu DENGAN METODE SOL GEL SPIN COATING: PENGARUH SPINNING RATE & KONSENTRASI DOPING

Buku monograf dengan judul Sintesis Film Tipis ZnO:Cu dengan Metode Sol Gel Spin Coating: Pengaruh Spinning Rate & Konsentrasi Doping. Buku ini menyajikan secara praktis dan lengkap sehingga dapat membantu para siswa, mahasiswa, dosen, guru serta para praktisi industry. Cakupan dan penekanan materi yang disajikan dapat membantu memberi sumbangan pemikiran dalam mendukung pemecahan masalah yang muncul pada teknologi film tipis untuk aplikasi sel surya. Oleh karena itu, buku monograf ini disusun secara integratif antardisiplin ilmu yaitu bahan semikonduktor, metode film tipis spin coating, eposisi film tipis dengan variasi spinning rate dan konsentrasi doping, hasil karakterisasi yang didasarkan struktur dan sifat optiknya sehingga diperoleh informasi bahwa film tipis yang diperoleh dapat diaplikasikan sebagai lapisan absorber pada aplikasi sel surya.



PENERBIT LAKEISHA

Jl. Jatinom Boyolali,
Srikaton, Rt.003, Rw.001,
Pucangmiliran, Tulung,
Klaten, Jateng, Indonesia 57482
Email : penerbit_lakeisha@yahoo.com
HP/WA : 08989880852
Website : <http://www.penerbitlakeisha.com/>



SCAN ME

ISBN 978-623-6322-48-2



9 786236 322482