

### **BAB III**

#### **METODE PENELITIAN**

Jenis penelitian ini adalah penelitian eksperimen laboratorium dengan pendekatan kuantitatif. Penelitian eksperimen dipilih karena fokus utamanya adalah pada pembuatan dan pengujian lapisan tipis *aluminium-doped zinc oxide* (AZO) yang disintesis menggunakan metode *dip-coating*. Penelitian ini mengkaji pengaruh konsentrasi doping *aluminium* terhadap sifat optik dan sifat listrik dari lapisan film tipis AZO. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimen murni (*true experimental research*) dengan desain penelitian yang terkontrol. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah konsentrasi doping *aluminium* (1, 2, 3, 4, dan 5%), sedangkan variabel terikatnya adalah sifat optik (transmitansi, absorbansi, dan *band gap*) dan sifat listrik (resistansi lembaran).

Prosedur penelitian dilaksanakan melalui beberapa tahap utama, yaitu:

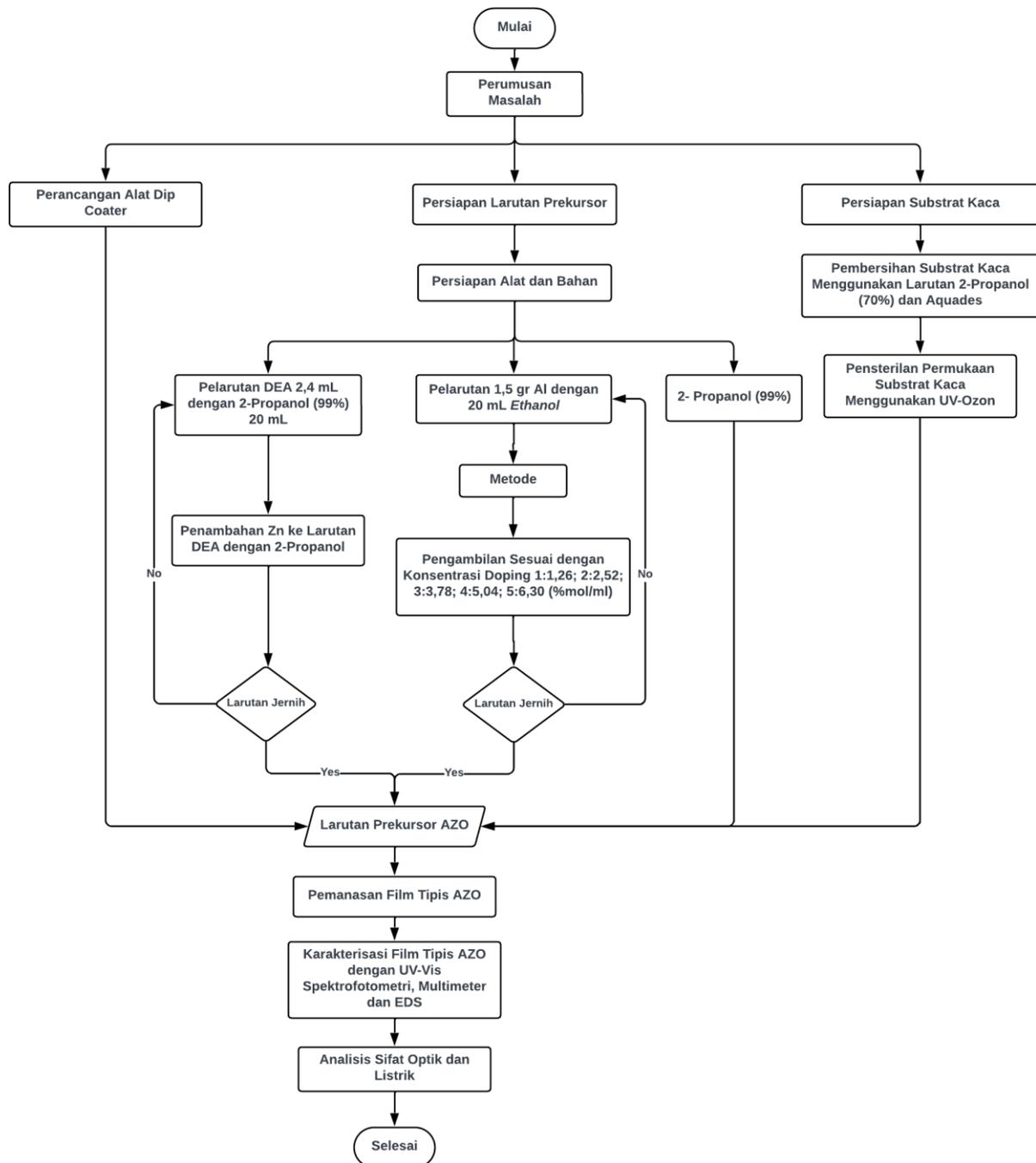
1. Persiapan bahan dan pembuatan larutan prekursor dengan penambahan konsentrasi Al.
2. Proses pelapisan substrat kaca menggunakan metode *dip-coating* dengan jumlah celupan tertentu.
3. Proses annealing pada suhu 450 °C untuk meningkatkan kualitas kristal film.
4. Karakterisasi sampel menggunakan *UV-Vis Spectrophotometry* untuk sifat optik, multimeter untuk resistansi, serta *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDS) sebagai analisis pendukung komposisi unsur.
5. Analisis data dilakukan dengan menghitung nilai rata-rata transmitansi, absorbansi, energi celah pita (*band gap*), serta resistivitas dan konduktivitas. Hasil analisis kemudian digunakan untuk membandingkan pengaruh doping terhadap sifat optik dan listrik film AZO.

Dengan metode ini, penelitian diharapkan dapat menghasilkan data yang valid dan terukur, serta mampu memberikan gambaran jelas mengenai hubungan

konsentrasi doping *aluminium* terhadap performa material AZO sebagai kandidat material *Transparent Conductive Oxides* (TCO).

### 3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada periode bulan Februari hingga 08 Agustus 2025 di Laboratorium *Solar Energy Material*, Gedung Baru, Sekolah Pascasarjana, Universitas Pendidikan Indonesia, Jl. Setiabudhi No. 229, Bandung 40154, Jawa Barat, Indonesia. Penelitian ini menggunakan metode eksperimental kuantitatif yang bertujuan untuk menginvestigasi pengaruh konsentrasi doping *aluminium* (Al) terhadap sifat listrik, optik, dan struktural lapisan AZO (*Aluminum-doped Zinc Oxide*) yang disintesis menggunakan teknik *dip-coating*. Laboratorium ini dilengkapi dengan fasilitas untuk sintesis dan karakterisasi material, termasuk alat pencelupan buatan sendiri (*dip-coater*), *UV-Vis Spectrophotometry* untuk pengukuran sifat optik, multimeter untuk pengukuran resistivitas, dan *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDS) untuk melihat distribusi komposisi kimia. Selama periode tersebut, penelitian mencakup tahap persiapan alat, sintesis sampel, karakterisasi, dan analisis data. Alur tahapan dapat dilihat pada gambar 3.1.



**Gambar 3.1** Alur tahapan penelitian

### 3.2 Alat yang digunakan dalam Penelitian

Dalam penelitian ini, berbagai peralatan digunakan untuk mendukung proses preparasi, pengolahan, dan karakterisasi lapisan tipis AZO menggunakan metode

*dip-coating*. Alat-alat tersebut dapat dikelompokkan berdasarkan fungsinya, yaitu peralatan preparasi larutan, pengolahan sampel, dan karakterisasi material.

a. Peralatan Preparasi Larutan

Untuk menyiapkan larutan prekursor, digunakan *beaker glass* sebagai wadah untuk mencampur bahan kimia, labu ukur untuk mengukur volume larutan secara presisi, dan pipet volume serta pipet tetes untuk mengambil larutan dalam jumlah kecil dengan akurasi tinggi. Timbangan analitik digunakan untuk menimbang bahan kimia secara akurat, sedangkan *magnetic stirrer* dan *hot plate* dimanfaatkan untuk mencampur dan memanaskan larutan hingga homogen. Suntikan (*syringe*) digunakan untuk memindahkan larutan secara terkendali, terutama pada proses yang memerlukan ketelitian.

b. Peralatan Pengolahan Sampel

Proses pengolahan sampel melibatkan *dip-coater* buatan sendiri sebagai alat utama untuk melapiskan larutan prekursor pada substrat melalui metode *dip-coating*. Kaca preparat digunakan sebagai substrat, yang dipotong menggunakan alat pemotong kaca dan dibersihkan dengan ultrasonic cleaner serta *UV-Ozon* untuk menghilangkan kontaminan. *Oven* dan *furnace* digunakan untuk proses pengeringan dan *annealing* lapisan tipis guna meningkatkan sifat kristalinitas. Parafilm digunakan untuk menutup wadah larutan agar terhindar dari kontaminasi, sedangkan nampan dan *staining jars* mendukung proses penanganan dan penyimpanan sampel. Gunting dan pinset membantu dalam manipulasi material secara presisi.

c. Peralatan Karakterisasi Material

Untuk menganalisis sifat optik dan listrik lapisan tipis AZO, digunakan *UV-Vis Spectrophotometer* untuk mengukur transmitansi dan absorbansi. Multimeter digital digunakan untuk mengukur resistansi lembaran, yang mencerminkan sifat konduktivitas listrik, *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (EDS) dimanfaatkan

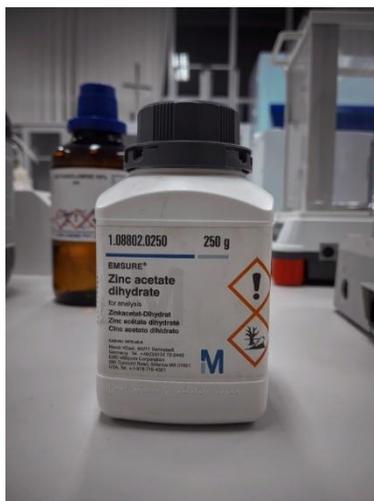
untuk menganalisis komposisi unsur lapisan tipis, memberikan informasi mendetail tentang distribusi doping Al.

### 3.3 Bahan Kimia yang Digunakan dalam Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode *dip-coating* untuk membentuk lapisan tipis *Aluminium-doped zinc oxide* (AZO) sebagai material *Transparent Conductive Oxide* (TCO). Berikut adalah bahan kimia yang digunakan beserta fungsinya.

**a. *Zinc Acetate Dihydrate* ( $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ):**

*Zinc acetate dihydrate* ( $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) dengan massa 5,49 gram digunakan sebagai sumber seng (Zn) untuk membentuk struktur utama lapisan tipis AZO pada penelitian ini. Gambar 3.2 menunjukkan wadah *zinc acetate dihydrate* yang digunakan.

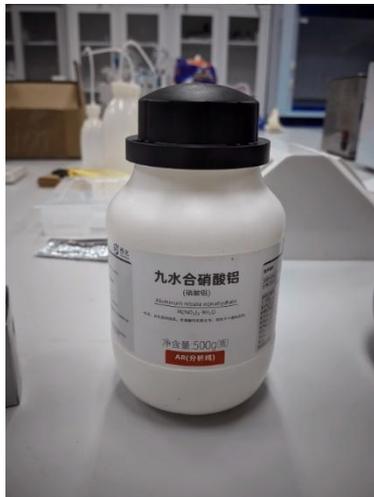


**Gambar 3.2** Senyawa *Zinc Acetate Dihydrate* ( $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )

**b. *Aluminium Nitrate Nonahydrate* ( $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ):**

*Aluminium nitrate nonahydrate* ( $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ) sebanyak 1,5 gram dilarutkan dalam 20 mL *ethanol*, diambil sesuai konsentrasi doping terhadap Zn (1:1,26; 2:2,52; 3:3,78; 4:5,04; 5:6,30 (%mol/ml)), digunakan sebagai sumber doping *aluminium* (Al) untuk meningkatkan sifat listrik dan optik.

Gambar 3.3 menunjukkan wadah *aluminium nitrate nonahydrate* yang digunakan pada penelitian ini.



**Gambar 3.3** Senyawa *Aluminium Nitrate Nonahydrate*

**c. *Diethanolamine (DEA)*:**

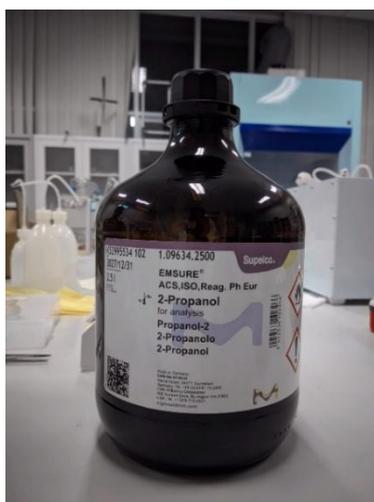
*Diethanolamine* (DEA) sebanyak 2,4 mL digunakan sebagai stabilizer untuk mencegah presipitasi dan memastikan homogenitas larutan prekursor. Gambar 3.4 menunjukkan wadah senyawa *Diethanolamine* (DEA) yang digunakan pada penelitian ini.



**Gambar 3.4** Senyawa *Diethanolamine* (DEA)

**d. 2-Propanol (Isopropanol):**

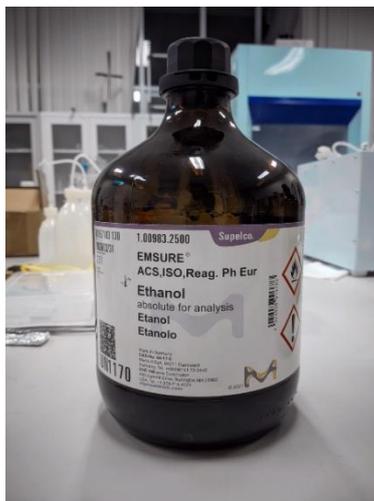
2-Propanol (isopropanol) dengan kemurnian 99% sebanyak 20 mL digunakan untuk menyiapkan larutan prekursor dan menyesuaikan volume hingga 50 mL, sedangkan isopropanol 70% digunakan untuk pembersihan substrat. Gambar 3.5 menunjukkan wadah senyawa 2-Propanol (isopropanol) yang digunakan pada penelitian ini.



**Gambar 3.5** Senyawa 2-Propanol (Isopropanol)

e. **Ethanol (EtOH):**

*Ethanol* (EtOH) sebanyak 20 mL digunakan sebagai pelarut untuk *aluminium nitrate nonahydrate*. Gambar 3.6 menunjukkan wadah senyawa *Ethanol* (EtOH) yang digunakan pada penelitian ini.



**Gambar 3.6** Senyawa *Ethanol* (EtOH)

f. **Aquades (Air Deionisasi):**

Aquades (air deionisasi) digunakan untuk pembersihan awal substrat guna menghilangkan kontaminan polar. Gambar 3.7 menunjukkan wadah senyawa Aquades (air deionisasi) yang digunakan pada penelitian ini.



**Gambar 3.7** Senyawa Aquades (air deionisasi)

### 3.4 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan utama, mulai dari persiapan larutan prekursor, proses pelapisan menggunakan metode *dip-coating*, hingga perlakuan panas (*annealing*). Setiap tahap dirancang agar menghasilkan lapisan tipis *aluminium-doped zinc oxide* (AZO) dengan kualitas yang baik sehingga memungkinkan untuk dilakukan karakterisasi lebih lanjut terhadap sifat optik dan listriknya.

#### 3.4.1 Prosedur Preparasi Larutan Prekursor

Larutan prekursor dibuat dengan menggunakan bahan dasar *zinc acetate dihydrate* [ $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ] sebagai sumber ZnO, *aluminium nitrate nonahydrate* [ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ] sebagai doping aluminium, serta *ethanol* sebagai pelarut. Konsentrasi doping Al dikkan sebesar 1, 2, 3, 4, dan 5% mol terhadap jumlah ion  $\text{Zn}^{2+}$ . Untuk preparasi larutan *zinc*, digunakan *zinc acetate dihydrate* sebanyak 5,49 gram sebagai sumber seng (Zn) untuk membentuk struktur utama lapisan tipis AZO. *Diethanolamine* (DEA) berperan sebagai stabilizer untuk mencegah presipitasi, dan *2-propanol* dengan kemurnian 99% digunakan sebagai pelarut untuk memastikan *zinc acetate dihydrate* terlarut dengan baik. Prosedur preparasinya adalah sebagai berikut:

- a. Campurkan *diethanolamine* (DEA) 2,4 mL dengan *2-propanol* (99%) 20mL dalam beker gelas untuk membentuk larutan awal.
- b. Aduk campuran ini menggunakan *magnetic stirrer* dengan kecepatan 500 rpm selama 10 menit tanpa pemanasan untuk memastikan homogenitas.
- c. Tambahkan *zinc acetate dihydrate* sebanyak 5,49 gram secara bertahap ke dalam campuran sambil terus diaduk untuk menghindari penggumpalan.
- d. Lanjutkan pengadukan pada *hot plate* dengan kecepatan 500 rpm dan suhu  $70^\circ\text{C}$  selama 1 jam untuk menghasilkan larutan zinc yang stabil dan homogen.

### 3.4.2 Preparasi Larutan *Aluminium* (Al)

**Bahan:**

- *Aluminium nitrate nonahydrate*: 1,5 gram.
- *Ethanol*: 20 mL.

**Prosedur:**

- a. Larutkan 1,5 gram *aluminium nitrate nonahydrate* dalam 20 mL *ehtanol* dalam beker gelas.
- b. Aduk larutan menggunakan *magnetic stirrer* dengan kecepatan 500 rpm selama 10 menit tanpa pemanasan untuk memastikan *aluminium nitrate nonahydrate* terlarut sempurna.
- c. Ambil larutan *aluminium nitrate nonahydrate* sesuai konsentrasi doping (1–5% mol terhadap Zn) dengan 1:1,26; 2:2,52; 3:3,78; 4:5,04; 5:6,30 (%mol/ml)

### 3.4.3 Penggabungan Larutan Zn dan Al

**Prosedur:**

- a. Tambahkan larutan *aluminium nitrate nonahydrate* (sesuai volume doping yang telah diambil) ke dalam larutan Zn yang mengandung *diethanolamine* dan *zinc acetate dihydrate*.
- b. Aduk campuran menggunakan *magnetic stirrer* dengan kecepatan 500 rpm selama 10 menit tanpa pemanasan untuk mengintegrasikan larutan *aluminium nitrate nonahydrate* dengan larutan *zinc acetate dihydrate*.
- c. Tambahkan *2-propanol* (99%) secukupnya hingga volume total larutan mencapai 50 mL.
- d. Aduk kembali larutan menggunakan *magnetic stirrer* dengan kecepatan 500 rpm dan suhu 70°C selama 2 jam untuk memastikan larutan prekursor homogen dan siap digunakan untuk proses *dip-coating*.

### 3.5 Prosedur Pembersihan Substrat

Menggunakan kaca preparat dengan ukuran  $2,5 \times 2,5 \text{ cm}$  dan ketebalan  $1 \text{ mm}$  sebagai substrat. Sebelum proses pelapisan, substrat terlebih dahulu dibersihkan dengan larutan *ethanol* dan aquades menggunakan *ultrasonic cleaner*. Proses pembersihan ini bertujuan untuk memastikan permukaan substrat benar-benar bersih dari kontaminan debu, minyak, atau residu kimia, sehingga mendukung adhesi yang baik dan menghasilkan kualitas lapisan tipis AZO yang merata serta bebas cacat

Prosedur:

a. Penyimpanan Substrat

Total 18 substrat (9 substrat per *staining jar*, 2 jar) direndam dalam aquades.

b. Pembersihan dengan *Aquades*

Lakukan ultrasonik pada substrat yang direndam dengan aquades menggunakan *staining jar* selama 10 menit untuk menghilangkan kontaminan polar lalu buang *aquades* setelah proses selesai.

c. Pengeringan

Keringkan substrat dalam oven pada suhu  $80^\circ\text{C}$  selama 10 menit.

d. Pembersihan dengan Isopropanol 70%

Ulangi proses ultrasonik menggunakan isopropanol 70% selama 10 menit. Kemudian keringkan kembali substrat dalam oven pada suhu  $80^\circ\text{C}$  selama 10 menit.

e. Perlakuan *UV-Ozon*

Perlakukan substrat dengan *UV-Ozon* selama 10 menit untuk menghilangkan kontaminan organik dan meningkatkan kebersihan permukaan.

f. Hasil

Substrat siap untuk pelapisan tipis AZO menggunakan metode *dip-coating*.

### 3.5 Proses *Dip-Coating*

Proses pelapisan dilakukan pada substrat kaca mikroskop yang telah dibersihkan dengan isopropanol dan aquades menggunakan *ultrasonic cleaner*. Tahap pelapisan, digunakan alat *dip-coater* dengan substrat kaca preparat yang dipasangkan terlebih dahulu ke pegangan (*holder*) pada *dip-coater*. Setelah itu, *dip-coater* dinyalakan dan dilakukan pengaturan parameter proses. Setting awal meliputi waktu *delay* 30 detik untuk memastikan kestabilan posisi substrat dalam larutan, serta kecepatan penarikan 8 cm/detik agar lapisan tipis dapat terbentuk merata. Setelah parameter ditentukan, proses pelapisan dimulai dengan menekan tombol *start cycle*.

Prosedur pencelupan dilakukan secara berulang sesuai jumlah siklus yang ditentukan. Setiap kali substrat selesai dicelup dan ditarik, sampel terlebih dahulu di diamkan selama 3 menit di pegangan *dip-coater* agar lapisan bisa menyebar merata dipermukaan, lalu setelah itu dikeringkan melalui oven pada suhu 120 °C selama 15 menit. Tahap pengeringan ini bertujuan untuk menguapkan pelarut dan membantu pembentukan lapisan awal agar stabil sebelum dilakukan pencelupan berikutnya. Proses ini diulang hingga jumlah celupan yang diinginkan tercapai, sehingga diperoleh film tipis AZO dengan ketebalan yang terkontrol.

### 3.6 Proses *Annealing*

Setelah proses *dip-coating* selesai, sampel kemudian diberi perlakuan panas (*annealing*) untuk meningkatkan kristalinitas dan kualitas struktural lapisan tipis. Sampel dimasukkan ke dalam *furnace*, kemudian dilakukan pemanasan bertahap hingga mencapai suhu *annealing* 450 °C.

Proses pemanasan dilakukan dengan waktu penanjakan (*ramping*) menuju 450 °C selama 2 jam 30 menit, agar kenaikan suhu berlangsung perlahan dan merata sehingga lapisan tidak mengalami retak akibat perbedaan tegangan termal. Setelah suhu target tercapai, sampel ditahan pada 450 °C selama 20 menit memungkinkan rekristalisasi material dan difusi doping *aluminium* ke dalam kisi

ZnO. Setelah tahap penahanan selesai, furnace dimatikan dan sampel dibiarkan mendingin secara alami di dalam furnace hingga mencapai suhu ruang.

Tahap annealing ini penting untuk menguapkan sisa senyawa organik dan pelarut, meningkatkan keteraturan kristal ZnO, serta memastikan doping Al dapat terdistribusi dengan baik. Dengan demikian, sifat optik dan listrik dari film tipis AZO dapat lebih optimal.

### 3.7 Karakterisasi

Karakterisasi dilakukan untuk memperoleh data yang akan dianalisis dalam penelitian ini. Tahapan karakterisasi sangat penting karena menentukan parameter utama yang menjadi fokus, yaitu sifat optik, sifat listrik, dan komposisi unsur dari lapisan tipis *aluminium-doped zinc oxide* (AZO). Dengan karakterisasi yang tepat, hubungan antara konsentrasi doping *aluminium* dengan perubahan sifat material dapat dijelaskan secara ilmiah dan terukur.

#### 3.7.1 Karakterisasi Sifat Optik

Sifat optik lapisan tipis AZO dianalisis menggunakan *UV-Vis Spektrofotometer* dalam rentang panjang gelombang 300–1100 nm. Instrumen ini bekerja berdasarkan prinsip penyerapan dan transmisi cahaya oleh material, sehingga dapat memberikan data berupa kurva transmitansi (T%) dan absorbansi (A). Langkah-langkah karakterisasi optik meliputi:

- a. Menempatkan sampel lapisan tipis AZO pada dudukan sampel spektrofotometer.
- b. Mengukur transmitansi cahaya yang melewati sampel dari panjang gelombang 300 nm hingga 1100 nm.
- c. Mendapatkan kurva hubungan panjang gelombang terhadap transmitansi dan absorbansi.

- d. Menghitung nilai rata-rata transmitansi pada rentang cahaya tampak (400–700 nm).
- e. Menentukan celah pita energi (*band gap*) menggunakan metode *Tauc plot*, yang didasarkan pada hubungan antara koefisien absorptansi dan energi foton.

Tujuan dari karakterisasi optik ini adalah untuk mengetahui bagaimana konsentrasi doping Al memengaruhi tingkat transparansi film tipis, absorptansi cahaya, serta pergeseran nilai *band gap* (misalnya *blue shift* atau *red shift*). Hasil ini sangat penting untuk aplikasi optoelektronik yang membutuhkan material dengan transmitansi tinggi (>80%) sekaligus *band gap* optimum.

### 3.7.2 Karakterisasi Sifat Listrik

Sifat listrik lapisan tipis AZO dalam penelitian ini dikarakterisasi melalui pengukuran resistansi menggunakan multimeter digital. Hal ini dilakukan karena instrumen *four-point probe* standar hanya mampu mengukur resistansi dalam orde rendah (hingga kilo-ohm), sedangkan sampel film tipis AZO yang dihasilkan pada penelitian ini memiliki resistansi lebih tinggi (hingga orde mega-ohm). Untuk menjaga kesesuaian metode, jarak antar probe pada multimeter diatur menyerupai jarak titik elektroda pada *four-point probe*, sehingga hasil pengukuran lebih representatif terhadap resistansi lembaran film tipis.

Nilai resistansi terukur kemudian dinyatakan sebagai *sheet resistance* ( $R_s$ ) dengan persamaan:

$$R_s = R \times \frac{\omega}{l} \Omega/\text{sq}$$

dengan  $R_s$  yaitu *sheet resistance* dalam ohm per persegi ( $\Omega/\text{sq}$ ),  $R$  adalah Resistansi terukur ( $\Omega$ ),  $\omega$  yaitu lebar sampel (2,5 cm), dan  $l$  adalah lebar sampel (2,5 cm). Karena sampel berbentuk persegi ( $\omega = l = 2,5 \text{ cm}$ ), maka faktor  $\frac{\omega}{l} = 1$ , sehingga:

$$R_s = R$$

Dengan demikian, nilai resistansi yang diperoleh dari multimeter langsung merepresentasikan *sheet resistance*. Hasil pengukuran ini ditampilkan dan digunakan untuk menganalisis pengaruh konsentrasi doping *aluminium* terhadap sifat listrik film tipis AZO.

### 3.7.3 Karakterisasi Komposisi Unsur (EDS)

Karakterisasi komposisi unsur lapisan tipis AZO dilakukan menggunakan *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (EDS) yang terintegrasi pada instrumen *Scanning Electron Microscope* (SEM). Teknik ini dipilih karena mampu mendeteksi jenis unsur yang ada pada sampel berdasarkan emisi sinar-X karakteristik dari atom penyusunnya.

Sampel film tipis AZO terlebih dahulu ditempatkan pada holder dengan menggunakan karbon tape, kemudian dimasukkan ke dalam ruang vakum instrumen. Setelah kondisi vakum tercapai, pengamatan morfologi permukaan dilakukan pada perbesaran 50.000× dengan *working distance* (WD) 8,4 mm dan tegangan percepatan (EHT) 10,00 kV. Selanjutnya, analisis komposisi unsur dilakukan dengan EDS dengan cara mengarahkan berkas elektron ke area tertentu pada permukaan sampel. Sinar-X karakteristik yang dipancarkan oleh atom dalam sampel kemudian dideteksi untuk mengidentifikasi jenis unsur penyusun. Hasil analisis ditampilkan dalam bentuk spektrum EDS dan peta distribusi unsur (*elemental mapping*) yang menunjukkan keberadaan Zn dan O sebagai unsur utama, serta Al sebagai doping.

Metode EDS ini digunakan sebagai data pendukung untuk memastikan keberhasilan doping *aluminium* pada lapisan tipis AZO serta mengamati homogenitas distribusi doping di dalam film.

## 3.8 Teknik Analisis Data

Teknik analisis data digunakan untuk mengolah hasil karakterisasi optik dan listrik dari lapisan tipis *aluminium-doped zinc oxide* (AZO) yang diperoleh melalui metode *dip-coating*. Analisis dilakukan untuk mengetahui pengaruh

konsentrasi doping *aluminium* terhadap sifat material, serta membandingkan tren perubahan yang muncul pada setiap parameter.

### 3.8.1 Analisis Sifat Optik

Data optik berupa transmitansi (T) dan absorbansi (A) diperoleh dari pengukuran menggunakan *UV-Vis Spektrofotometer*. Analisis dilakukan melalui beberapa tahapan:

- a. Transmitansi rata-rata ( $T_{vis}$ ) dihitung pada rentang panjang gelombang 400–700 nm menggunakan persamaan:

$$\bar{T}_{vis} = \frac{1}{N} \sum_{\lambda=400}^{700} T(\lambda)$$

dengan N adalah jumlah titik data (1 nm per data).

- b. Absorbansi rata-rata ( $A$ ) digunakan untuk mengetahui sejauh mana film tipis menyerap cahaya dengan persamaan :

$$\bar{A}_{vis} = \frac{1}{N} \sum_{\lambda=400}^{700} A(\lambda)$$

- c. *Band gap* optik ( $E_g$ ) ditentukan dengan metode *Tauc plot*, melalui persamaan:

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

di mana  $\alpha$  adalah koefisien absorpsi yang diperoleh dari data absorbansi. Grafik  $(\alpha h\nu)^2$  terhadap  $h\nu$  diekstrapolasi untuk menentukan nilai  $E_g$ . Metode Tauc plot digunakan untuk menentukan band gap optik melalui *linear fitting* pada kurva  $(\alpha h\nu)^2$  vs  $h\nu$ . Validitasnya di film ZnO telah dibuktikan dalam tinjauan besar (Jubu dkk., 2024). Dengan analisis ini diperoleh gambaran perubahan transmitansi, absorbansi, dan *band gap* akibat konsentrasi doping.

### 3.8.2 Analisis Sifat Listrik

Data resistansi ( $R$ ) diperoleh melalui pengukuran menggunakan multimeter digital dengan jarak elektroda disesuaikan menyerupai konfigurasi *four-point probe*. Karena resistansi terukur bergantung pada dimensi sampel, nilai tersebut diubah menjadi *sheet resistance* ( $R_s$ ) menggunakan persamaan:

$$R_s = R \times \frac{w}{l} \Omega/\text{sq}$$

dengan  $R_s$  yaitu *sheet resistance* dalam ohm per persegi ( $\Omega/\text{sq}$ ),  $R$  adalah Resistansi terukur ( $\Omega$ ),  $w$  yaitu lebar sampel (2,5 cm), dan  $l$  adalah panjang sampel (2,5 cm). Sheet resistance  $R_s$  adalah ukuran resistansi film tipis yang independen dari dimensi sampel, memungkinkan perbandingan antar film berbeda ukuran. Persamaan tersebut digunakan untuk mengkonversi resistansi terukur ( $R$ ) menjadi resistansi per satuan luas, sehingga karakterisasi material film menjadi lebih akurat (Naftaly dkk., 2021). Analisis ini dilakukan untuk melihat tren perubahan *sheet resistance* pada setiap konsentrasi doping *aluminium*, sehingga dapat diketahui hubungan doping terhadap konduktivitas lapisan tipis AZO.