

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Dalam beberapa tahun terakhir energi terbarukan, khususnya tenaga surya menjadi salah satu solusi utama untuk mencapai target *net zero emissions* pada tahun 2050. Secara geografis, Indonesia memiliki keunggulan karena dilalui oleh garis khatulistiwa sehingga sepanjang tahun menerima penyinaran matahari dengan intensitas radiasi rata-rata 4,5-5,1 kWh/m² per hari (Rahardjo dkk., 2017). Kondisi ini menjadikan pengembangan teknologi sel surya sebagai prioritas nasional, dengan tren terkini mengarah pada pengembangan sel surya transparan yang berpotensi diaplikasikan secara luas pada bangunan dan perangkat optoelektronik. Sel surya transparan menawarkan keunggulan unik berupa kemampuan menghasilkan energi listrik tanpa menghalangi cahaya tampak secara signifikan sehingga memungkinkan integrasi pada jendela, atap kaca, maupun layar perangkat elektronik.

Salah satu komponen utama dalam sel surya transparan adalah *Transparent Conductive Oxide* (TCO) yang berfungsi sebagai elektroda transparan untuk menghantarkan arus listrik sekaligus memungkinkan cahaya tampak menembus ke lapisan aktif. TCO yang paling umum digunakan adalah *Indium Tin Oxide* (ITO) dan *Fluorine-doped Tin Oxide* (FTO), keduanya memiliki transparansi optik tinggi dan resistivitas rendah, sehingga mendukung kinerja sel surya secara optimal. ITO sering digunakan dalam aplikasi piranti optoelektronik seperti sel surya (Ji dkk., 2019), *Organic LED* (OLEDs) (Masis dkk., 2015), dan pelapis optik (Sta dkk., 2016). Namun, tingginya biaya indium pada ITO serta keterbatasan kestabilan FTO pada kondisi tertentu mendorong penelitian terhadap material alternatif. Salah satu kandidat yang banyak diteliti adalah *Zinc Oxide* (ZnO), yang memiliki transparansi optik tinggi, ketersediaan bahan baku melimpah, ramah lingkungan, serta biaya produksi yang lebih rendah dibandingkan ITO.

Zinc oxide (ZnO) murni merupakan semikonduktor tipe-n dengan lebar *bandgap* 3.37 eV yang mirip dengan ITO (3.5 – 4.3 eV) (Starowicz dkk., 2023). Material ini memiliki energi ikatan eksiton yang tinggi, sekitar 60 meV (Znaidi, 2010), serta bersifat transparan. Namun, konsentrasi elektronnya relatif rendah, yaitu sekitar $10^{18} - 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, sehingga konduktivitas listriknya kurang baik jika dibandingkan dengan ITO yang mencapai 10^{21} cm^{-3} (Özgür dkk., 2005). Sifat listrik yang kurang memadai ini dapat ditingkatkan melalui proses pendopongan dengan kation maupun anion dari unsur lain. *Aluminum-doped zinc oxide* (AZO) merupakan salah satu hasil modifikasi yang paling banyak diteliti. Berdasarkan studi terhadap 22 jenis unsur dopan, Aluminium diketahui sebagai salah satu dopan yang paling efisien untuk ZnO (Gao & Banerjee, 2019), karena mampu menghasilkan film tipis ZnO yang konduktif tanpa mengorbankan transparansi optiknya, serta dapat diaplikasikan melalui berbagai teknik deposisi.

Film tipis berbasis AZO dapat disintesis menggunakan berbagai metode deposisi, yang secara umum terbagi menjadi teknik fisik, kimia, dan larutan. Metode fisik seperti *sputtering*, dan *pulsed laser deposition* mampu menghasilkan film dengan kualitas tinggi, morfologi seragam, serta ketebalan yang presisi, namun membutuhkan peralatan mahal dan kondisi vakum yang kompleks. Metode kimia seperti *chemical vapor deposition* (CVD) menawarkan control komposisi yang baik dan kemampuan deposisi pada area luas, tetapi memerlukan suhu tinggi dan sering melibatkan prekursor berbahaya. Sementara itu, metode berbasis larutan, seperti *sol-gel spin-coating* dan *spray pyrolysis*, relatif lebih sederhana dan berbiaya rendah, namun terkadang menghasilkan film dengan densitas dan adhesi yang kurang optimal dibandingkan metode fisik. Dibandingkan dengan metode lainnya, *dip-coating* dipilih karena kesederhanaan proses, efektivitas biaya, dan kemampuannya untuk melapisi substrat dengan bentuk bervariasi secara seragam. Kontrol ketebalan lapisan dapat dilakukan dengan mengatur parameter seperti kecepatan penarikan dan jumlah celupan, menjadikan metode ini ideal untuk aplikasi penelitian yang membutuhkan optimasi parameter secara sistematis.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa peningkatan jumlah celupan dapat menurunkan resistansi hingga titik optimum tertentu, namun cenderung menurunkan transmitansi optik pada daerah tampak. Meski demikian, Sebagian besar penelitian menggunakan interval jumlah celupan yang relatif besar (seperti 5, 10, 15, 20) sehingga perubahan sifat material pada rentang jumlah celupan rendah (1-9) belum banyak dikaji secara rinci. Selain itu, sebagian besar studi lebih menekankan pada sifat listrik dan optik saja, tanpa menghubungkannya secara langsung dengan komposisi unsur.

Penelitian ini memiliki beberapa perbedaan mendasar dibandingkan studi terdahulu. Pertama, variasi jumlah celupan dilakukan secara lebih rapat, yaitu 1-9 kali sehingga memungkinkan observasi lebih detail terhadap perubahan sifat listrik, optik, dan komposisi pada rentang rendah. Kedua, penelitian ini tidak hanya menilai konduktivitas dan transmitansi, tetapi juga menghubungkannya dengan distribusi unsur (Zn, O, dan Al) yang dianalisis menggunakan EDS sehingga menghasilkan gambaran yang lebih komprehensif. Ketiga, penelitian ini menggunakan alat dip-coater hasil rancangan tim penelitian di laboratorium, yang menegaskan potensi *low-cost fabrication* tanpa ketergantungan pada peralatan komersial. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam optimasi jumlah celupan pada pembuatan film tipis AZO berbasis dip-coating sederhana, dengan menekankan keseimbangan antara sifat listrik, optik, dan komposisi unsur, untuk mendukung pengembangan sel surya transparan.

1.2. Rumusan Masalah

1. Bagaimana pengaruh jumlah celupan terhadap sifat optik film tipis AZO dengan metode *dip-coating*?
2. Bagaimana pengaruh sifat listrik film tipis AZO dengan metode *dip-coating*?
3. Bagaimana pengaruh komposisi unsur film tipis AZO dengan metode *dip-coating*?

4. Berapa jumlah celupan optimal untuk menghasilkan film tipis AZO dengan keseimbangan terbaik antara transparansi optik dan konduktivitas listrik untuk aplikasi sel surya tranparan?

1.3. Tujuan Penelitian

1. Menganalisis pengaruh jumlah celupan terhadap sifat optik yang disintesis menggunakan metode *dip-coating*.
2. Menganalisis pengaruh jumlah celupan terhadap sifat listrik yang disintesis menggunakan metode *dip-coating*.
3. Menganalisis pengaruh jumlah celupan terhadap komposisi film tipis AZO yang disintesis menggunakan metode *dip-coating*.
4. Menentukan jumlah celupan optimal dalam pembuatan film tipis AZO dengan metode *dip-coating*.

1.4. Batasan Masalah

Penelitian ini memiliki beberapa batasan untuk memfokuskan ruang lingkup dan memastikan kedalaman analisis yang optimal terhadap sintesis lapisan tipis *Aluminum-doped Zinc Oxide (AZO)* menggunakan metode *dip-coating*. Batasan-batasan tersebut adalah sebagai berikut:

1. Analisis difokuskan pada sifat optik, listrik, dan komposisi unsur lapisan AZO, tanpa membahas aspek lain seperti sifat mekanik atau termal.
2. Pengukuran ketebalan lapisan AZO tidak dilakukan, meskipun diketahui bahwa jumlah celupan (1–9) berpengaruh terhadap ketebalan, tetapi fokus tetap pada pengaruhnya terhadap sifat yang diteliti.
3. Kecepatan celupan diatur tetap pada 8 cm/s untuk menjaga konsistensi proses, tanpa variasi laju celupan dalam eksperimen.
4. Suhu *annealing* ditetapkan pada 450°C selama 30 menit setelah seluruh celupan selesai, tanpa eksplorasi variasi suhu *annealing* yang lebih tinggi atau lebih rendah.

1.5. Manfaat Penelitian

1. Menyediakan data parameter optimal jumlah celupan untuk sintesis film tipis AZO yang efisien menggunakan metode *dip-coating*. Memberikan referensi parameter yang optimal untuk pembuatan lapisan AZO.
2. Mendukung pengembangan teknologi sel surya transparan berbasis AZO yang ramah lingkungan dengan biaya rendah untuk diimplementasikan di Indonesia. Mendorong pengembangan teknologi sel surya transparan yang lebih murah dan ramah lingkungan.