

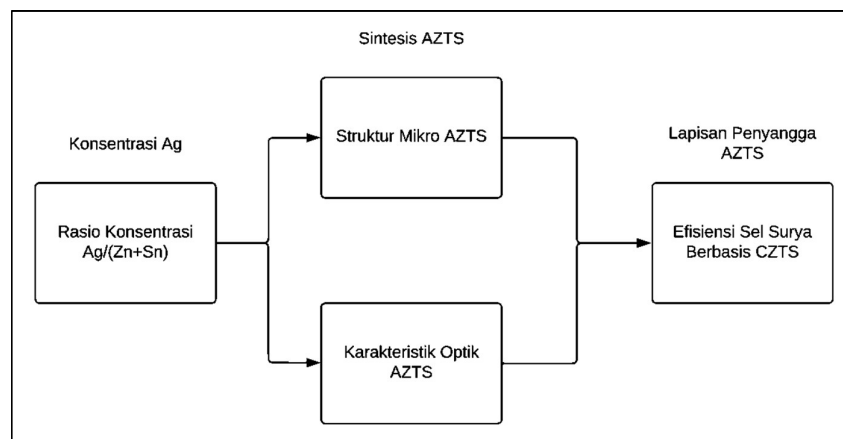
BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan Juli hingga Oktober 2021. Proses sintesis dan pembentukan sel surya berbasis kesterit dilakukan di Laboratorium Fisika Lanjut dan Laboratorium IPSE Universitas Pendidikan Indonesia yang beralamat di Jl. Dr. Setiabudi No. 229, Bandung. Beberapa proses karakterisasi dilakukan di tempat yang berbeda, Laboratorium Fisika Lanjut UPI dan Pusat Penelitian Nanosains dan Nanoteknologi (PPNN) ITB.

3.2 Desain Penelitian

Desain penelitian ditunjukkan oleh Gambar 3.1. Penelitian ini dilakukan melakukan eksperimen, empat buah sampel disiapkan dengan variasi konsentrasi Ag pada rasio molar Ag/(Zn+Sn) untuk sintesis Ag_2ZnSnS_4 . Rasio yang digunakan terlihat pada Tabel 2. Variabel bebas pada eksperimen ini adalah rasio konsentrasi Ag/(Zn+Sn) yaitu 0,75; 0,80; 0,85; 0,90, dan variabel kontrol yaitu Zn/Sn, keduanya merupakan variabel yang digunakan dalam pembuatan material yang akan digunakan sebagai sintesis material Ag_2ZnSnS_4 .



Gambar 3.1 Desain Penelitian

Hasil sintesis Ag_2ZnSnS_4 ditumbuhkan sebagai lapisan tipis kemudian dilakukan karakterisasi struktur mikro dan karakteristik optik. Material Ag_2ZnSnS_4 juga digunakan sebagai lapisan *buffer* pada sel surya CZTS. Sehingga, performa

dari sel surya dengan menggunakan lapisan *buffer* $\text{Ag}_2\text{ZnSnS}_4$ dengan konsentrasi Ag berbeda ditinjau.

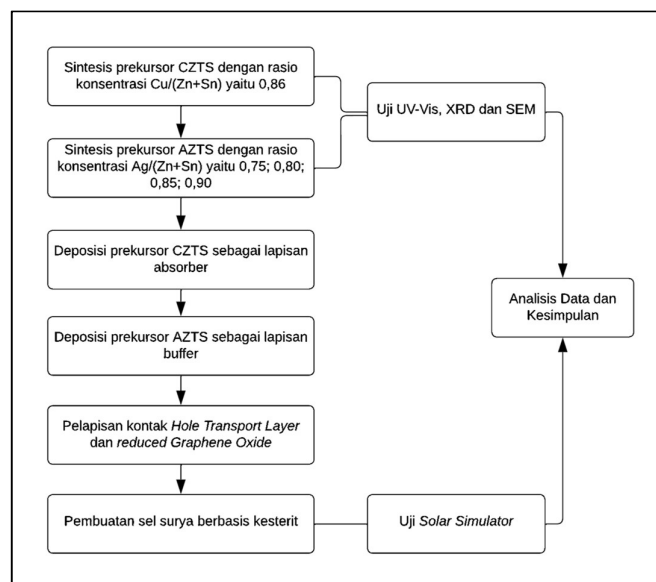
Penggunaan konsentrasi Ag pada lapisan *buffer* dilakukan untuk mengetahui komposisi yang paling optimal yang dapat dicapai sel surya berbasis CZTS. Variabel terikat untuk eksperimen ini yaitu struktur mikro, karakteristik optik dan performa pada sampel. Pembentukan sel surya berbasis CZTS menggunakan rasio konsentrasi lapisan *absorber* $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) yang digunakan yaitu $\text{Cu}/(\text{Zn}+\text{Sn})$ dan Zn/Sn yaitu 0,86 dan 1,25 (Rahmat, 2020).

Tabel 3.1 Variasi rasio molar $\text{Ag}/(\text{Zn}+\text{Sn})$ untuk lapisan buffer AZTS

No	Nama Sampel	Rasio Konsentrasi
		$[\text{Ag}]/([\text{Zn}]+[\text{Sn}])$
1	AZTS0,75	0.75
2	AZTS0,80	0.80
3	AZTS0,85	0.85
4	AZTS0,90	0.90

Keterangan : $[\text{Zn}]/[\text{Sn}] = 1.24$

Langkah-langkah penelitian yang dilakukan oleh penulis ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian

3.3 Instrumen Penelitian

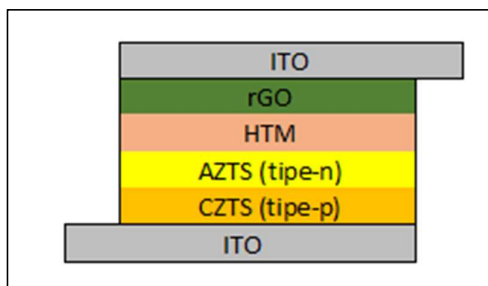
Instrumen penelitian yaitu alat yang digunakan dalam penelitian untuk memperoleh data. Instrumen yang digunakan merupakan instrumen yang telah tersedia di Laboratorium Fisika Lanjut UPI. Instrumen yang digunakan meliputi instrumen untuk proses sintesis dan karakterisasi. Tabel 3.2 merupakan instrumen penelitian khusus yang digunakan untuk karakterisasi sampel.

Tabel 3.2 Instrumen Penelitian

No	Alat yang Digunakan	Teknik Karakterisasi	Fungsi
1	<i>UV-Vis Spectrometry (UV-Vis)</i>	Spektroskopi	Untuk mengukur nilai absorpsi, <i>bandgap</i> , dan LHE.
2	<i>X-Ray Diffractometer (XRD)</i>	Difraksi	Untuk memperoleh fase-fase kristal, ukuran kristal yang terbentuk.
3	<i>Scanning Electron Microscope (SEM)</i>	Mikroskopi	Untuk mengetahui morfologi permukaan dari lapisan AZTS.
4	<i>Solar Simulator 1.5 AM & DC Voltage Current Source/Monitor</i>	Pengukuran I-V	Untuk mengetahui densitas arus yang dihasilkan (J_{sc}), tegangan sirkuit terbuka (V_{oc}), efisiensi yang dihasilkan, dan fill factor (FF) dari sel surya CZTS.

3.4 Prosedur Pembuatan Sel Surya

Prosedur pembuatan sel surya pada sub-bab ini meliputi langkah yang perlu dipersiapkan untuk membuat lapisan tipis sel surya, diantaranya persiapan alat dan bahan yang digunakan, sintesis CZTS, sintesis AZTS, deposisi prekursor CZTS sebagai lapisan absorber, deposisi prekursor AZTS sebagai lapisan buffer, pelapisan kontak *hole transport layer* dan deposisi *reduced Graphene Oxide* (rGO), dan fabrikasi sel surya berbasis CZTS. Prosedur akan membentuk lapisan sel surya seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Desain struktur lapisan sel surya CZTS

3.4.1 Alat dan Bahan Penelitian

Alat dan bahan beserta fungsinya yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan oleh Tabel 3.3 dan Tabel 3.4. Bahan-bahan utama penyusun prekursor $\text{Ag}_2\text{ZnSnS}_4$ yaitu *Silver chloride* (AgCl), *Zinc (II) acetate dihydrate*, *Tin (II) chloride dihydrate*, dan Thiourea ditunjukkan pada Gambar 3.4. Sedangkan

Tabel 3.3 Bahan yang digunakan pada Penelitian

No	Nama Bahan	Fungsi
1	Copper(II) acetate monohydrate	Bahan utama prekursor CZTS
2	Silver Chloride Powder	Bahan utama prekursor AZTS
3	Tin(II) chloride dihydrate	Bahan utama prekursor AZTS & CZTS
4	Zinc acetate dihidrate	Bahan utama prekursor AZTS & CZTS
5	Thiourea	Bahan utama prekursor AZTS & CZTS
6	Monoethanolamine	Penyetabil prekursor AZTS dan CZTS
7	Triethanolamine	Penyetabil prekursor AZTS dan CZTS
8	2-metoksietanol	Pelarut prekursor AZTS dan CZTS
9	Bubuk Sulfur 99%	Sulfurisasi
10	Kaca Konduktif ITO	Substrat
11	Padatan Iodine	Hole Transport Material
12	Reduce Graphene Oxide (rGO)	Hole Transport Material
13	Isopropil Alkohol	Pencuci substrat

Tabel 3.4 Alat yang digunakan pada penelitian

No	Alat	Fungsi
1	Timbangan Digital	Mengukur massa bahan
2	Spatula	Mengambil bahan serbuk
3	Botol Vial	Menyimpan sampel
4	Botol Sampel Kaca	Mencampurkan sampel
5	Magnetic Stirrer	Mengaduk dan memanaskan sampel
6	Pipet Mikro	Mengambil TEA dan MEA, meneteskan larutan saat deposisi
7	Centrifuge	Memisahkan padatan dan larutan
8	Pompa Vakum	Mengeluarkan molekul gas dari sampel
9	Spin Coater	Membentuk lapisan tipis AZTS dan CZTS
10	Oven	Mengeringkan sampel
11	Furnace	Proses sulfurisasi
12	Gas Nitrogen	Membersihkan substrat
13	Stopwatch	Mengukur waktu ketika sampel diberi perlakuan
14	Multimeter	Mengukur adanya hambatan pada sampel
15	Jangka Sorong Digital	Mengukur area sel surya
16	Keramik Alumina	Melindungi sampel saat sulfurisasi suhu tinggi
17	Blower	Mengeringkan substrat



Gambar 3.4 Bahan Utama AZTS (kiri ke kanan : AgCl, Zinc Acetate Dihydrate, Tin Chloride Dihydrate, Thiourea)



Gambar 3.5 Alat yang digunakan untuk sintesis $\text{Ag}_2\text{ZnSnS}_4$

3.4.2 Sintesis CZTS

Sintesis CZTS diawali dengan persiapan yaitu menghitung stoikiometri untuk menentukan berat bahan setiap sampel. Rasio konsentrasi CZTS yaitu dengan komposisi *Cu-poor* dan *Zn-Rich* dengan perbandingan $\text{Cu}/(\text{Zn}+\text{Sn})$ yaitu 0.86 dan Zn/Sn yaitu 1.24.

Berat bahan setiap sampel dengan konsentrasi terlampir pada Tabel 3.5 didapatkan dengan Persamaan 3.1

$$M = \frac{m}{M_r} \times \frac{1000}{V} \quad (3.1)$$

Dimana M merupakan molaritas, m massa bahan yang dicari, M_r adalah massa relatif dari material dan V adalah volume pelarut yang akan ditentukan. Massa dari bahan diukur dengan menggunakan neraca digital dan spatula untuk memindahkan bahan tersebut. Volume pelarut yang ditentukan yaitu sebanyak 30 ml larutan *2-methoxyethanol*, sehingga massa dari masing-masing bahan yaitu Cu sebanyak 0,761 gram, Zn sebanyak 0,540 gram, Sn sebanyak 0,447 gram, dan S sebanyak 1,229 gram.

Tabel 3.5 Massa relatif dan konsentrasi bahan CZTS

Material	M_r (g/mol)	Konsentrasi (M)	Massa (g)
$(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Cu} \cdot \text{H}_2\text{O}$	199,65	0,127	0,761
$\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	219,5	0,082	0,540
$\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	225,65	0,066	0,447
$\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$	76,12	0,538	1,229

Kemudian melarutkan sebagian bahan ke dalam satu botol sampel bergiliran dengan urutan sebagai berikut; Zn dan Sn dilarutkan terlebih dahulu selama 30 menit, 400 rpm, dan 60°C; Cu dilarutkan bersama Zn dan Sn selama 30 menit, 400 rpm, dan 60°C; S dilarutkan paling terakhir bersamaan dengan penambahan penyetabil *trimethylamine* (TEA) sebanyak 50 μl dan *monoethylamine* (MEA) sebanyak 100 μl selama 60 menit, 400 rpm dan 60°C. Prosedur sintesis CZTS secara singkat ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Prosedur sintesis CZTS: (dari kiri ke kanan) Penimbangan bahan, pengadukan prekursor, hasil sentrifugasi, penyaringan prekursor CZTS

Setelah larutan CZTS tercampur rata, proses sentrifugasi dilakukan untuk memisahkan larutan dan endapan yang menyatu dengan menggunakan gaya sentrifugal yang diputar dengan kecepatan tinggi. Proses ini dilakukan dengan memindahkan larutan ke dalam tabung sentrifugasi berukuran 15 ml, lalu tabung ditaruh ke dalam rotor yang akan diputar dengan kecepatan 3000 rpm selama 10 menit. Hasil sentrifugasi kemudian disaring dengan menggunakan pompa vakum dan corong Buchner yang telah dilapisi kertas Whatmann. Proses penyaringan ini dilakukan agar tidak ada bahan yang mengendap selama proses deposisi. Hasil penyaringan dipindahkan kembali ke botol sampel. Hasil sintesis prekursor CZTS ditunjukkan oleh Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Hasil sintesis larutan $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS)

3.4.3 Sintesis AZTS

Proses sintesis AZTS memiliki prosedur yang sama dengan CZTS, hal yang membedakannya yaitu bahan utama dan juga komposisinya. Langkah pertama yaitu menghitung stoikiometri untuk menentukan berat bahan setiap sampel. Rasio konsentrasi AZTS yang merupakan variabel bebas dibuat menjadi empat buah sampel. Perhitungan rasio konsentrasi komposisi sampel AZTS dalam konsentrasi molar ditunjukkan dalam Tabel 3.6

Tabel 3.6 Rasio konsentrasi Ag/(Zn+Sn) sampel AZTS

Sampel	Konsentrasi (mol/L)	
	Ag	Ag/(Zn+Sn)
AZTS0,75	0,111	0,75
AZTS0,80	0,118	0,80
AZTS0,86	0,127	0,86
AZTS0,90	0,133	0,90

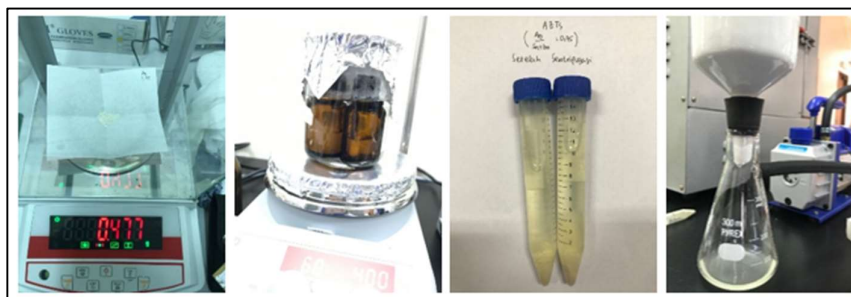
Dengan demikian konsentrasi Zn, Sn, dan S masing-masing yaitu 0,082; 0,066; dan 0,538 dengan satuan mol/L. Sedangkan untuk rasio konsentrasi Zn/Sn yaitu sebesar 1,24 mol/L. Berat bahan setiap sampel dengan konsentrasi terlampir pada Tabel 3.7 didapatkan dengan Persamaan 3.1, maka didapatkan berat masing-masing untuk setiap sampel yaitu:

Tabel 3.7 Berat bahan yang digunakan untuk sampel AZTS

Sampel	Massa (g)			
	Ag	Zn	Sn	S
AZTS0,75	0,477			
AZTS0,80	0,509			
AZTS0,86	0,546	0,540	0,447	1,229
AZTS0,90	0,573			

Proses sintesis dimulai dengan memasukkan total 30 ml pelarut 2-methoxyethanol ke dalam masing-masing 4 buah botol vial berukuran 50 ml yang berisi *magnetic bar*. Seluruh bahan yang telah ditimbang masing-

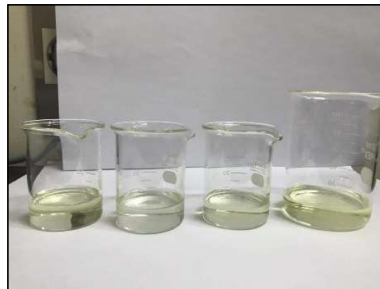
masing dimasukkan ke dalam botol vial yang telah berisi pelarut. Setelah itu, keempat bahan dalam botol vial tersebut dipanaskan dan diaduk dalam gelas beaker berisi air yang ditutup dengan menggunakan *aluminium foil* lalu ditaruh di atas magnetic stirrer dengan kecepatan 400 rpm, dengan temperatur 60°C selama 60 menit. Kemudian melarutkan sebagian bahan ke dalam satu botol sampel bergiliran dengan urutan sebagai berikut; Zn dan Sn dilarutkan terlebih dahulu selama 30 menit, 400 rpm, dan 60°C; Ag dilarutkan bersama Zn dan Sn selama 30 menit, 400 rpm, dan 60°C; S dilarutkan paling terakhir bersamaan dengan penambahan penyetabil *trimethylamine* (TEA) sebanyak 50 μ l dan *monoethylamine* (MEA) sebanyak 100 μ l selama 60 menit, 400 rpm dan 60°C. Proses pembuatan prekursor AZTS ditunjukkan oleh Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Proses pembuatan prekursor AZTS

Setelah larutan AZTS tercampur rata, proses sentrifugasi dilakukan untuk memisahkan larutan dan endapan yang menyatu dengan menggunakan gaya sentrifugal yang diputar dengan kecepatan tinggi. Proses ini dilakukan dengan memindahkan larutan ke dalam tabung sentrifugasi berukuran 15 ml, lalu tabung ditaruh ke dalam rotor yang akan diputar dengan kecepatan 3000 rpm selama 10 menit.

Hasil sentrifugasi kemudian disaring dengan menggunakan pompa vakum dan corong Buchner yang telah dilapisi kertas Whatmann. Proses penyaringan ini dilakukan agar tidak ada bahan yang mengendap selama proses deposisi. Hasil penyaringan dipindahkan kembali ke botol sampel. Hasil sintesis prekursor AZTS ditunjukkan oleh Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Hasil sintesis prekursor AZTS dengan variasi konsentrasi Ag/Zn+Sn (dari kiri ke kanan : rasio 0,75; 0,80; 0,85; dan 0,90)

3.4.4 Deposisi Prekursor CZTS sebagai lapisan *absorber*

Proses deposisi dimulai dengan preparasi kaca substrat ITO yang dibersihkan dengan larutan Isoprophyl Alcohol (IPA) dalam *ultrasonic cleaner*, kemudian membersihkan kaca dari sisa larutan IPA dengan menggunakan gas Nitrogen. Tahap selanjutnya yaitu meneteskan larutan CZTS sebanyak 200 μL pada permukaan kaca ITO yang berada di tengah *spin coater* dengan kecepatan putar pertama 1000rpm selama 10 detik dan kecepatan kedua 3000rpm selama 30 detik. Proses penumbuhan film tipis CZTS di atas kaca ITO dengan metode spin coating kemudian dipanaskan dalam oven (*pre heat*) pada suhu 150°C selama 3 menit dan dilakukan pengulangan sebanyak 10 kali untuk mendapatkan ketebalan yang sesuai.

Setelah proses spin coating selesai, lapisan CZTS di atas kaca ITO kemudian dilakukan sulfurisasi. Proses sulfurisasi dilakukan pada temperatur minimum 2/3 dari titik didihnya (444.6°C) yaitu 296°C. Sulfurisasi dilakukan dengan memanaskan sampel dalam atmosfer sulfur dengan temperatur sebesar 500°C selama 4 jam.

3.4.5 Deposisi Prekursor AZTS sebagai lapisan *buffer*

Proses deposisi AZTS sebagai lapisan *buffer* dimulai dengan membersihkan lapisan ITO/CZTS dengan menggunakan gas Nitrogen. Tahap selanjutnya yaitu meneteskan larutan AZTS sebanyak 200 μL di atas kaca ITO/CZTS yang berada di tengah *spin coater*. Proses penumbuhan film tipis AZTS di atas kaca ITO/CZTS dengan metode spin coating dengan kecepatan putar pertama 1000rpm selama 10 detik kecepatan putar kedua

3000 rpm selama 30 detik, kemudian dipanaskan dalam oven (*pre heat*) pada suhu 150°C selama 3 menit dan dilakukan pengulangan sebanyak 10 kali untuk mendapatkan ketebalan yang sesuai.

Setelah proses spin coating selesai, lapisan AZTS di atas kaca ITO/CZTS kemudian dilakukan sulfurisasi. Proses sulfurisasi dilakukan pada temperatur minimum 2/3 dari titik didihnya (444.6°C) yaitu 296°C. Sulfurisasi dilakukan dengan memanaskan sampel dalam atmosfer sulfur dengan temperatur sebesar 500°C selama 4 jam.

3.4.6 Pelapisan Kontak Hole Transport Layer dan Deposisi reduced Graphene Oxide

Lapisan rGO disintesis dengan mencampurkan serbuk rGO ke dalam gelas beaker berisi *diionized (DI) water* yang ditutup dengan menggunakan aluminium foil. Setelah itu, larutan serbuk rgo diletakkan pada *ultrasonic cleaner* pada suhu 60°C selama 60 menit. Proses deposisi rGO dilakukan dengan meneteskan 250 µL larutan rGO pada kaca konduktif ITO dengan mikropipet dan meratakannya ke seluruh lapisan ITO, proses ini dilakukan sebanyak dua lapis. Setiap satu lapis deposisi rGO perlu dilakukan pemanasan di dry oven pada 80°C selama 3 menit.

Sebelum pembentukan lapisan tipis sel surya, lapisan yang sudah terbentuk ITO/CZTS/AZTS kemudian dilapisi oleh hole transport material berupa elektrolit padat iodine I/I_3^- . Lapisan HTM ditutup dengan lapisan elektroda balik rGO (reduce graphene oxide) yang telah ditumbuhkan di kaca konduktif ITO.

3.4.7 Fabrikasi Sel Surya

Setelah lapisan ITO/CZTS/AZTS terbentuk tempelkan *heat resistant tape* pada bagian kaca ITO yang tidak dikenai lapisan CZTS/AZTS. Ukur terlebih dahulu luas area CZTS/AZTS dengan menggunakan jangka sorong digital. Tahap selanjutnya yaitu meletakkan elektrolit padatan berupa *Hole Transport Material* (HTM) sebanyak kurang lebih 50 mg pada lapisan CZTS/AZTS. Lapisan sel surya ditutup dengan lapisan *counter electrode* RGO pada kaca ITO dengan menjepit sel menggunakan penjepit buaya (*binder clips*). Setelah itu

panaskan lapisan sel surya yang telah dibuat ke dalam oven dengan suhu 80°C selama 3 menit untuk menghubungkan seluruh bagian. Setelah didiamkan pada suhu ruang, pasang selotip tembaga pada sisi yang kosong untuk proses karakterisasi uji *solar simulator* untuk mengetahui kinerja dari sel surya.

3.5 Karakterisasi Sampel Penelitian

3.5.1 Karakterisasi Struktur Mikro AZTS

Karakterisasi struktur mikro dalam penelitian ini meliputi karakterisasi sifat kristal dan morfologi permukaan dari sampel. Morfologi permukaan AZTS digunakan alat *Scanning Electron Microscope* (SEM). Pada penelitian ini, proses karakterisasi dengan menggunakan alat Hitachi TM SU-3500. Hasil yang diperoleh berupa morfologi permukaan lapisan tipis dari bagian atas.

Untuk menentukan kristalinitas yang terbentuk pada lapisan buffer, proses karakterisasi menggunakan alat X-Ray Diffractor Bruker Advanced D8 dengan eksitasi Cu-K α . Hasil karakterisasi berupa informasi puncak difraksi yang diolah menggunakan *software* Match. Hasil pengolahan diperoleh data fase kristal dan fase sekunder yang mungkin muncul. Karakterisasi struktur mikro dilakukan di PPNN (Pusat Penelitian Nanosains dan Nanoteknologi) ITB.

3.5.2 Karakterisasi Optik AZTS

UV-Vis Spectrometry digunakan untuk mengetahui karakterisasi serapan optik dari lapisan buffer AZTS maupun lapisan absorber CZTS. Melalui alat ini dapat ditinjau kemampuan absorbansi cahaya dan nilai puncak serapan gelombang UV-Vis. Alat UV-Vis ini tersambung melalui sebuah komputer yang berfungsi untuk menghasilkan data dan grafik dari hasil karakterisasi. Alat ditunjukkan oleh Gambar 3.10.



Gambar 3.10 UV-Vis Spectrophotometer (UV 1240 Shimadzu Co. Japan)

Alat yang digunakan untuk karakterisasi optik ini adalah *UV-VIS Spectrophotometer* jenis UV 1240 (Shimadzu Co. Japan) yang dapat mengukur panjang gelombang dari rentang 0 hingga 1100 nm. Spektrum absorptansi dan panjang gelombang dapat digunakan untuk mengetahui energi *band-gap* dan Light Harvesting Energy (LHE).

3.5.3 Performansi Sel Surya Berbasis Kesterit

Pengukuran sel surya berbasis CZTS ditunjukkan oleh Gambar 3.11. Untuk menguji performansi dari sel surya berbasis kesterit pada penelitian ini menggunakan Solar Standard Simulator yang menghasilkan kurva J-V. proses karakterisasi dilakukan dengan cara meletakkan sampel yang terhubung dengan *DC Voltage Current Source/Monitor* ADCMT 6242 di bawah alat yang menampilkan nilai arus dan tegangan. Pengujian performansi sel surya dilakukan pada suhu ruangan 26°C, tingkat radiasi 100 mW/cm², dan radiasi spektral matahari referensi AM 1,5. hasil karakterisasi dapat menghasilkan densitas arus short-circuit (J_{sc}), tegangan open-circuit (V_{oc}), Fill Factor (FF), dan efisiensi (η). P



Gambar 3.11 Pengukuran sel surya CZTS di bawah *solar simulator*

3.6 Analisis Data Penelitian

Analisis data dilakukan untuk mendapatkan kesimpulan dengan tujuan penelitian.

3.6.1 Analisis Struktur Mikro AZTS

Data yang digunakan pada analisis struktur mikro adalah hasil karakterisasi morfologi permukaan dan struktur kristal dengan menggunakan SEM dan XRD. Hasil morfologi permukaan dari SEM secara kualitatif untuk menunjukkan adanya proses sulfurisasi pada penumbuhan lapisan AZTS. Pengukuran butir juga dilakukan untuk mengetahui distribusi ukuran butir pada sampel AZTS dengan menggunakan aplikasi ImageJ.

Analisis sifat kristalin ini meliputi perbandingan banyak fasa yang terbentuk. Hasil karakterisasi menggunakan XRD adalah data sudut (2θ) dan intensitas yang diolah menggunakan software Match! untuk memperoleh data puncak, perbandingan banyak fase yang terbentuk dan persentase fase kristal AZTS. Analisis sifat kristalin dilakukan pada sampel dengan konsentrasi rendah (AZTS0,75) sampai sampel konsentrasi tertinggi (AZTS0,90). Ukuran bulir kristal ditentukan menggunakan persamaan Scherrer 3.2

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (3.2)$$

dengan K adalah konstanta tak berdimensi yang memiliki besar 0.9, λ adalah panjang gelombang sinar-x yang digunakan saat pengujian yaitu sebesar $1,54 \text{ \AA}$, β merupakan Full Width at Half Maximum (FWHM) artinya lebar garis pada setengah dari amplitudo maksimum, dan D adalah ukuran rata-rata bulir kristal yang terbentuk pada sampel.

3.6.2 Analisis Sifat Optik

Analisis sifat optik ini meliputi nilai LHE yang terbentuk dan nilai energi *bandgap* dengan menggunakan data yang diperoleh dari hasil karakterisasi absorbansi dengan UV-Vis Spectrophotometry. Data tersebut diolah dengan cara *plotting* dalam satu grafik untuk menentukan panjang

gelombang absorbansi optimal. Kemudian, untuk memperoleh nilai LHE ditentukan oleh Persamaan 3.3.

$$LHE (\%) = (1 - 10^{-\alpha}) \times 100\% \quad (3.3)$$

Dimana α adalah data absorbansi yang diperoleh. LHE berfungsi untuk mengetahui keberhasilan sampel dalam menyerap cahaya. Penyerapan dinyatakan optimal apabila nilai LHE mencapai 100%. Persamaan 3.4 adalah persamaan yang digunakan untuk menentukan nilai energi *band gap*. Persamaan 3.5 digunakan untuk mengetahui nilai energi foton $h\nu$.

$$(ah\nu) = D(h\nu - E_g)^m$$

$$(ah\nu)^{1/m} = D(h\nu - E_g) \quad (3.4)$$

$$h\nu(eV) = \frac{1240}{\lambda} \quad (3.5)$$

Dimana α merupakan koefisien absorpsi, h konstanta Planck, m merupakan indeks yang mencirikan transisi elektron, dan λ adalah panjang gelombang (nm).

Nilai energi *bandgap* diperoleh dengan metode Tauc-Plot dengan memplot grafik sumbu $(ah\nu)^{1/m}$ dan $(h\nu)$, bagian linear (garis lurus) diekstrapolasi ke sumbu-X di $(ah\nu)^{1/m} = 0$. Nilai m bergantung pada jenis transisi elektron, dimana:

$m = \frac{1}{2}$, untuk transisi langsung yang diizinkan (*direct allowed transition*),

$m = 2$, untuk transisi tidak langsung diizinkan (*indirect allowed transition*),

$m = \frac{3}{2}$, untuk transisi langsung terlarang (*direct forbidden transition*),

$m = 3$, untuk transisi tidak langsung terlarang (*indirect forbidden transition*)

Pada penelitian ini, m bernilai $\frac{1}{2}$ yang mendefinisikan *direct transition* untuk semikonduktor AZTS (Saha dkk., 2020). Perpanjangan yang membentuk titik potong pada sumbu-X merupakan nilai energi *bandgap* dari material AZTS.

3.6.3 Analisis Performansi Sel Surya Berbasis Kesterit

Analisis performansi sel surya ini menggunakan data dari karakterisasi menggunakan *Solar Standard Simulator 1.5 AM filter 100 mW/cm²*. Data yang diperoleh berupa densitas arus dan tegangan (J-V) yang kemudian di *plot* ke dalam grafik setelah nilai arus dibagi oleh luas permukaan lapisan tipis CZTS/AZTS terlebih dahulu untuk menghasilkan nilai densitas arus. Selanjutnya nilai tersebut digunakan untuk menentukan *Fill Factor* (FF) dan efisiensi dengan Persamaan 3.6 dan 3.7.

$$FF = \frac{V_{max} \cdot J_{max}}{V_{oc} \cdot J_{sc}} \quad (3.6)$$

$$\eta = \frac{V_{oc} \cdot J_{sc}}{P_{in}} \times FF \quad (3.7)$$

Dimana J_{sc} ditentukan dengan melihat besar densitas arus ketika tegangan nol, V_{oc} ditentukan dengan melihat besar tegangan ketika arus mendekati nol, dan V_m dan J_m ditentukan dengan melihat daya terbesar yang dapat dihasilkan sel surya.