



TUGAS AKHIR - TF 181801

**PENGARUH DOPING Zn PADA CuO SEBAGAI FOTOKATODA
DYE-SENSITIZED SOLAR CELL (DSSC) TIPE P**

CHIARA ARANDANI
NRP. 02311640000150

Dosen Pembimbing:
Dr.-Ing. Doty Dewi Risanti, S.T., M.T.

Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020



TUGAS AKHIR - TF 181801

**PENGARUH DOPING Zn PADA CuO SEBAGAI FOTOKATODA
*DYE-SENSITIZED SOLAR CELL (DSSC) TIPE P***

CHIARA ARANDANI
NRP. 02311640000150

Dosen Pembimbing:
Dr.-Ing. Doty Dewi Risanti, S.T., M.T.

Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT - TF 181801

THE EFFECTS OF Zn DOPED CuO AS A P TYPE DYE-SENSITIZED SOLAR CELL (DSSC) PHOTOCATODE

CHIARA ARANDANI
NRP. 02311640000150

Supervisors:
Dr.-Ing. Doty Dewi Risanti, S.T., M.T.

*Department of Engineering Physics
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020*

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini,

Nama : Chiara Arandani
NRP : 02311640000150
Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FTIRS)
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "**PENGARUH DOPING Zn PADA CuO SEBAGAI FOTOKATODA DYE-SENSITIZED SOLAR CELL (DSSC) TIPE P**" adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya-benarnya.

Surabaya, 5 Agustus 2020
Yang membuat pernyataan,



Chiara Arandani
NRP. 02311640000150

Halaman ini sengaja dikosongkan

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**PENGARUH DOPING Zn PADA CuO SEBAGAI FOTOKATODA DYE-
SENSITIZED SOLAR CELL (DSSC) TIPE P**

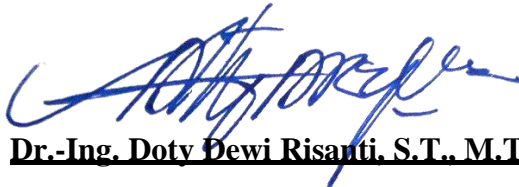
Oleh:

Chiara Arandani

NRP. 02311640000150

Surabaya, 10 Agustus 2020

**Menyetujui,
Pembimbing**



Dr.-Ing. Doty Dewi Risanti, S.T., M.T.

NIP. 19740903 199802 2 001

Mengetahui,

Kepala Departemen

Teknik Fisika FTIRS-ITS



Dr. Suvanto, S.T., M.T.

NIP. 19711113 199512 1 002

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

PENGARUH DOPING Zn PADA CuO SEBAGAI FOTOKATODA DYE-SENSITIZED SOLAR CELL (DSSC) TIPE P

TUGAS AKHIR

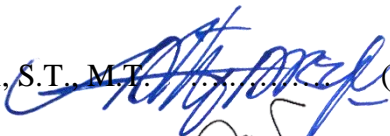




Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FTIRS)
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

CHIARA ARANDANI

NRP. 02311640000150

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr.-Ing. Doty Dewi Risanti, S.T., M.T.  (Pembimbing)
2. Dyah Sawitri, S.T., M.T.  (Ketua Penguji)
3. Lizda Johar Mawarani, S.T., M.T.  (Penguji I)
4. Dr.rer.nat. Ruri Agung Wahyuono, S.T.  (Penguji II)
5. Dr.rer.nat. Ir. Aulia M. T. Nasution, M.Sc.  (Penguji III)

SURABAYA

2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

**PENGARUH DOPING Zn PADA CuO SEBAGAI FOTOKATODA DYE-
SENSITIZED SOLAR CELL (DSSC) TIPE P**

Nama : Chiara Arandani
NRP : 02311640000150
Departemen : Teknik Fisika FTIRS - ITS
Dosen Pembimbing : Dr.-Ing. Doty Dewi Risanti, S.T., M.T.

ABSTRAK

Energi sangat dibutuhkan untuk menopang berbagai aspek kehidupan manusia. Salah satu sumber energi yang dapat dimanfaatkan sebagai energi baru dan terbarukan adalah matahari. Menggunakan sel surya, sinar matahari dapat dikonversikan menjadi energi listrik berkualitas tinggi secara langsung. Salah satu jenis sel surya yang saat ini sedang banyak dikembangkan adalah *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC), yaitu *thin film solar cell* berbasis semikonduktor yang terbentuk diantara fotoanoda atau fotokatoda dan elektrolit, serta dengan pemanfaatan pewarna di dalamnya. Akhir-akhir ini, DSSC dengan semikonduktor tipe p, yaitu CuO, mulai dijadikan fokus penelitian. Pada penelitian ini, CuO didoping dengan Zn, dimana doping tersebut dilakukan untuk merubah sifat CuO. Konsentrasi doping Zn divariasikan, yakni 0, 8, 10, 12, dan 14 mol%. Zn akan memengaruhi diameter kristal menjadi lebih besar, lebar spektrum absorbansi ke arah cahaya tampak, memperkecil celah pita energi CuO, dan meningkatkan performansi DSSC. Hasil akhir penelitian ini didapatkan bahwa Zn meningkatkan diameter kristal dari 38,415 nm menjadi 56,892 nm, mempersempit celah pita energi CuO dari 3,02 eV menjadi 2,9 eV dan meningkatkan efisiensi DSSC dari 0,000163% menjadi 0,000748%.

Kata kunci: CuO, doping Zn, DSSC

Halaman ini sengaja dikosongkan

***THE EFFECTS OF Zn DOPED CuO AS A P TYPE DYE-
SENSITIZED SOLAR CELL (DSSC) PHOTOCATODE***

Name : Chiara Arandani
NRP : 02311640000150
Department : Engineering Physics INDSYS - ITS
Supervisors : Dr.-Ing. Doty Dewi Risanti, S.T., M.T.

ABSTRACT

Energy is needed to sustain various aspect of human life. One of the energy sources that can be used as a new and renewable energy is the sun. Solar cells can be used to convert sunlight directly to high quality electrical energy. One of the solar cells that is currently being developed is Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC), which is a semiconductor based thin film solar cell that is formed between a photoanode or photocatode and an electrolyte, also with the use of a dye. Lately, DSSC with p type semiconductor, CuO, are starting to become the focus of researches. In this research, CuO is doped with Zn to change the characteristics of CuO. Zn will affect in increase in diameter of the crystal, width of the absorbance spectrum, reduction the CuO's energy band gap, and improvement of DSSC's performance. The results of this research found that Zn increased the crystal's diameter from 38.415 nm to 56.892 nm, narrowed the CuO's energy band gap from 3.02 eV to 2.9 eV and increased the DSSC's efficiency from 0.000163% to 0.000748%.

Keywords: CuO, DSSC, Zn doped

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas rahmat dan bimbingan-Nya, penulis mampu menyelesaikan laporan tugas akhir berjudul “Pengaruh Doping Zn pada CuO Sebagai Fotokatoda *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC) Tipe P” dengan baik. Penulisan tugas akhir ini bertujuan untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik di Departemen Teknik Fisika ITS. Penulis telah banyak mendapatkan bantuan dari berbagai pihak dalam menyelesaikan tugas akhir ini, oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Suyanto, S.T., M.T., selaku Kepala Departemen Teknik Fisika ITS.
2. Ibu Dr.-Ing. Doty Dewi Risanti, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing yang telah memberikan dukungan dan arahan kepada penulis dengan sabar dalam pengerjaan tugas akhir ini.
3. Seluruh dosen Departemen Teknik Fisika ITS yang telah memberikan ilmunya kepada penulis selama 8 semester ini, terlebih seluruh dosen bidang minat rekayasa bahan yang telah memberikan materi dan bimbingan untuk menunjang kelancaran tugas akhir ini.
4. Laboratorium Rekayasa Bahan Teknik Fisika ITS dan seluruh penghuni di dalamnya yang telah menampung penulis selama masa pengerjaan tugas akhir ini.
5. Laboratorium Teknologi Biokimia Teknik Kimia ITS, Laboratorium Karakterisasi Material Teknik Material dan Metalurgi ITS, dan Laboratorium Rekayasa Fotonika Teknik Fisika ITS yang telah membantu dalam hal peminjaman alat dan pengujian sehingga tugas akhir ini bisa berakhir dengan baik.
6. Orangtua yang selalu memberikan dukungan, motivasi, dan doa untuk penulis.
7. Mba Dhila dan Mas Haekal atas segala bantuannya dan kesabarannya dalam menjawab segala pertanyaan di *group chat*.
8. Rachma dan Winda, teman seperjuangan DSSC yang bersedia direpoti dalam segala hal.

9. Seluruh teman-teman yang namanya tidak dapat penulis sebutkan satu per satu karena terlalu banyak, yang telah setia menjadi *support system* penulis.

Penulis menerima kritik dan saran yang membangun terkait laporan tugas akhir ini demi kebaikan bersama. Akhir kata, penulis mengucapkan banyak terima kasih dan mohon maaf bila terdapat banyak kesalahan dalam laporan tugas akhir ini. Semoga laporan tugas akhir ini dapat dipergunakan dengan sebaik-baiknya dan memberikan manfaat bagi banyak orang, khususnya dalam pemahaman dan aplikasi material dan energi di Indonesia.

Surabaya, 5 Agustus 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
COVER PAGE.....	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI.....	v
LEMBAR PENGESAHAN	vii
LEMBAR PENGESAHAN	ix
ABSTRAK	xi
ABSTRACT.....	xiii
KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Sistematika Laporan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	5
2.1 DSSC Tipe P.....	5
2.2 Karakteristik Nanopartikel CuO (<i>Cupric Oxide</i>)	7
2.3 CuO Doping Zn (<i>Zinc</i>) Sebagai Fotokatoda DSSC.....	9
2.4 Performansi DSSC.....	11
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	13
3.1 Studi literatur	14

3.2	Persiapan Alat dan Bahan	14
3.3	Sintesis CuO dengan Doping Zn.....	14
3.4	Pembuatan Elektrolit DSSC.....	18
3.5	Pembuatan Pewarna N-719.....	18
3.6	Karakterisasi Nanopartikel.....	19
3.7	Uji UV-Vis.....	22
3.8	Fabrikasi DSSC.....	24
3.9	Pengujian Performansi DSSC dengan Uji I-V	26
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		29
4.1	Karakterisasi Nanopartikel CuO dan CuO doping Zn	29
4.2	Hasil Karakterisasi UV-Vis	35
4.3	Hasil Uji I-V	38
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		43
5.1	Kesimpulan	43
5.2	Saran	43
DAFTAR PUSTAKA.....		45
LAMPIRAN		
BIODATA PENULIS		

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema proses transfer muatan yang terjadi pada DSSC tipe p (Benazzi, Mallows, Summers, Black, & Gibson, 2019)	6
Gambar 2.2 Struktur kristal CuO (Tran & Nguyen, 2014).....	7
Gambar 2.3 Satu unit sel dalam kristal (Cudennec & Lecerf, 2003).....	8
Gambar 2.4 Celah pita energi dari (a) CuO murni dan (b) CuO doping Zn (Goyal, et al., 2020)	9
Gambar 2.5 Ilustrasi prinsip kerja DSSC tipe p di bawah sinar matahari (Qin, 2010)	10
Gambar 2.6 Kurva I-V ideal	11
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian	13
Gambar 3.2 Larutan CuO doping Zn.....	15
Gambar 3.3 Larutan CuO doping Zn setelah ditetaskan NaOH.....	15
Gambar 3.4 Terjadinya pengendapan.....	16
Gambar 3.5 Larutan CuO doping Zn sebelum dan sesudah di- <i>centrifuge</i>	16
Gambar 3.6 Presipitat (a) sebelum dan (b) sesudah di-oven selama 12 jam.....	17
Gambar 3.7 CuO doping Zn setelah dikalsinasi pada suhu 300°C.....	17
Gambar 3.8 Bubuk nanopartikel CuO doping Zn.....	17
Gambar 3.9 Diagram energi dari (a) CuO dan beragam pewarna (Sumikura, Mori, Shimizu, Usami, & Suzuki, 2008) dan (b) pewarna N-719 (Li, et al., 2014)	19
Gambar 3.10 Skema diagram XRD (Callister, Jr. & Rethwisch, 2014).....	20
Gambar 3.11 Difraksi dari sinar x (Callister, Jr. & Rethwisch, 2014).....	21
Gambar 3.12 Konfigurasi SEM (Akhtar, Khan, Khan, & Asiri, 2018).....	21
Gambar 3.13 Interaksi sinar elektron dengan sampel dan sinyal yang diemisikan (Akhtar, Khan, Khan, & Asiri, 2018).....	22
Gambar 3.14 <i>Setup</i> alat pengujian UV-Vis	23
Gambar 3.15 Pelapisan pasta pada kaca FTO	24
Gambar 3.16 Kaca FTO yang telah dilapisi pasta semikonduktor	25
Gambar 3.17 Kaca FTO dan pasta direndam dalam pewarna N-719.....	25

Gambar 3.18 Struktur <i>sandwich</i> DSSC.....	26
Gambar 3.19 Rangkaian ekivalen DSSC	27
Gambar 3.20 <i>Setup</i> pengambilan data I-V	27
Gambar 4.1 Pola XRD dari (a) CuO murni dan CuO doping Zn, (b) CuO berdasarkan JCPDS, (c) Cu(OH) ₂ berdasarkan JCPDS, dan (d) CuO murni dan CuO doping Zn (perbesaran)	30
Gambar 4.2 Hubungan antara ukuran kristal dengan (a) <i>micro-strain</i> dan (b) <i>dislocation density</i>	32
Gambar 4.3 Hasil SEM dari (a) CuO (b) 8%Zn-CuO (c) 10%Zn-CuO (d) 12%Zn-CuO dan (e) 14%Zn-CuO	34
Gambar 4.4 Spektrum absorpsi UV-Vis pewarna N-719.....	35
Gambar 4.5 Perbandingan spektrum absorpsi UV-Vis CuO dan CuO doping Zn	36
Gambar 4.6 Spektrum celah pita energi (a) CuO (b) 8%Zn-CuO (c) 10%Zn-CuO (d) 12%Zn-CuO (e) 14%Zn-CuO.....	37
Gambar 4.7 Pengaruh konsentrasi Zn terhadap celah pita energi CuO	38
Gambar 4.8 Perbandingan kurva J-V CuO dan CuO doping Zn	39

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Properti kristal dan konstanta fisis dari CuO (Tran & Nguyen, 2014)...	8
Tabel 2.2 Perbandingan parameter kisi antara CuO dan CuO doping Zn dihitung secara teoritis dan dari data eksperimen (Nesa, Momin, Sharmin, & Bhuiyan, 2020)	11
Tabel 4.1 Parameter kisi dari CuO	31
Tabel 4.2 Ukuran kristal, <i>micro-strain</i> , dan <i>dislocation density</i> dari CuO	32
Tabel 4.3 Ukuran partikel CuO murni dan CuO doping Zn.....	33
Tabel 4.4 Performansi DSSC dengan CuO doping Zn sebagai fotokatoda.....	40

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi sangat dibutuhkan untuk menopang berbagai aspek kehidupan manusia di bumi. Saat ini, konsumsi energi global adalah sekitar 18 TW per tahun dan diperkirakan akan meningkat menjadi 27,6 TW pada tahun 2050 (Benazzi, Mallows, Summers, Black, & Gibson, 2019). Sebagian besar energi tersebut berasal dari bahan bakar fosil yang tidak hanya terbatas, namun juga merusak lingkungan (Benazzi, Mallows, Summers, Black, & Gibson, 2019) dan diperkirakan bahwa bahan bakar fosil di seluruh dunia hanya dapat bertahan selama 40 tahun untuk minyak, 60 tahun untuk gas alam, dan 200 tahun untuk batu bara (Gong, Sumathy, Qiao, & Zhou, 2017). Oleh karena itu, diperlukan pemanfaatan energi lainnya, yaitu energi baru dan terbarukan seperti energi matahari. Sebanyak 120.000 TW energi matahari masuk ke bumi, menjadikan sinar matahari sebagai sumber energi baru dan terbarukan yang melimpah (Benazzi, Mallows, Summers, Black, & Gibson, 2019).

Energi matahari dapat dimanfaatkan dengan menggunakan teknologi *photovoltaic* (PV), atau sel surya, dimana PV dapat mengonversikan sinar matahari menjadi energi listrik berkualitas tinggi secara langsung (Gong, Sumathy, Qiao, & Zhou, 2017). Akan tetapi, harga PV konvensional yang dijual secara komersial sangatlah mahal dikarenakan tingginya biaya produksi. Oleh karena itu, diperlukan sel surya dengan teknologi yang berbeda agar dapat mengurangi biaya produksi. *Dye-sensitized Solar Cell* (DSSC), dibandingkan dengan PV konvensional dari silikon, memiliki biaya produksi yang lebih murah dikarenakan biaya materialnya yang tidak mahal dan proses fabrikasi yang lebih sederhana (Gong, Sumathy, Qiao, & Zhou, 2017).

DSSC adalah *thin film solar cell* berbasis semikonduktor yang terbentuk diantara fotoanoda/fotokatoda dan elektrolit, serta dengan pemanfaatan pewarna di dalamnya (Rawal, Vaishaly, Sharma, & Mathew, 2015). Sejak kemunculan pertamanya pada tahun 1991 dengan efisiensi 7%, DSSC telah menarik perhatian

dikarenakan efisiensinya yang tinggi, walaupun tidak setinggi sel surya silikon monokristalin yang memiliki efisiensi hingga 24,7%, dan biaya produksinya yang rendah (Sumikura, Mori, Shimizu, Usami, & Suzuki, 2008; International Renewable Energy Agency, 2012). Biaya produksi DSSC sebesar 301-311 $\$/m^2$, atau berkisar Rp4.500.000/ m^2 , sedangkan sel surya dari silikon monokristalin memiliki biaya produksi sebesar 671 $\$/m^2$, atau berkisar Rp9.800.000/ m^2 (Kalowekamo & Baker, 2009). Akhir-akhir ini, DSSC dengan semikonduktor tipe p mulai dijadikan fokus penelitian karena dapat membuka jalan untuk fabrikasi DSSC tandem (Jiang, et al., 2016). CuO adalah semikonduktor tipe p yang cocok diaplikasikan sebagai sel surya dikarenakan beberapa sifatnya yang baik, seperti koefisien absorpsi yang tinggi dan celah pita energi yang sempit di daerah *visible light*, sehingga diharapkan dapat memberikan efisiensi yang tinggi, serta tidak beracun, stabil, konduksi listrik yang baik, proses fabrikasi yang mudah, dan lain sebagainya (Tran & Nguyen, 2014). Sumikura, et.al. (Sumikura, Mori, Shimizu, Usami, & Suzuki, 2008), telah meneliti pengaruh suhu *annealing* terhadap fabrikasi DSSC dengan fotokatoda CuO dan menghasilkan efisiensi pada rentang 0,0028 hingga 0,011%. Jiang, et.al. (Jiang, et al., 2016), memfabrikasi DSSC dengan CuO berstruktur *nanowire* dan *nanorod* dengan variasi tiga jenis pewarna dan menghasilkan efisiensi berkisar pada 0,0008 hingga 0,097% (Jiang, et al., 2016).

CuO yang didoping dengan Zn digunakan pada penelitian ini. Doping dilakukan untuk merubah sifat dari CuO (Iqbal, et al., 2015). Dopan Zn dipilih dikarenakan radius ion Zn^{2+} mirip dengan Cu^{2+} , menyebabkan kelarutan termodinamika Zn^{2+} yang lebih tinggi dalam CuO, sehingga mudah untuk larut pada matriks CuO (Iqbal, et al., 2015). Iqbal, et.al. (Iqbal, et al., 2015), meneliti bahwa CuO doping Zn dapat memperkecil celah pita energi CuO dan menghasilkan rentang absorbansi cahaya yang lebih lebar jika dibandingkan dengan CuO tanpa doping. Melebarnya rentang absorbansi cahaya dapat meningkatkan efisiensi DSSC. Sharafeldin (Sharafeldin, 2019) telah melakukan fabrikasi DSSC CuO doping Zn dengan melakukan variasi terhadap konsentrasinya dan didapatkan efisiensi sebesar 0,260-0,521%. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan dengan harapan performansi DSSC yang lebih baik dibanding penelitian-penelitian terdahulu.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka didapatkan rumusan masalah yang akan diselesaikan sebagai berikut:

- a) Bagaimana mensintesis CuO doping Zn dengan metode *facile chemical*?
- b) Apa pengaruh doping Zn terhadap karakteristik CuO?
- c) Berapa efisiensi DSSC yang dihasilkan dengan menggunakan CuO doping Zn sebagai fotokatodanya?

1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah, didapatkan tujuan dari penelitian yang akan dilakukan, yaitu sebagai berikut:

- a) Mensintesis CuO doping Zn dengan metode *facile chemical*.
- b) Mengetahui pengaruh doping Zn terhadap karakteristik CuO.
- c) Mengetahui efisiensi DSSC yang dihasilkan dengan menggunakan CuO doping Zn sebagai fotokatodanya.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang ditinjau pada pengusulan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- a) CuO disintesis menggunakan prekursor $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ dengan doping Zn menggunakan ZnCl_2 .
- b) CuO doping Zn disintesis menggunakan metode *facile chemical*.
- c) Variasi doping Zn sebesar 0, 8, 10, 12, dan 14 mol%.
- d) Pelapisan CuO doping Zn pada kaca FTO menggunakan metode *doctor blade*.
- e) Pewarna yang digunakan adalah Ruthenium kompleks N-719.

1.5 Sistematika Laporan

Laporan tugas akhir ini tersusun atas lima bab dengan rincian sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan latar belakang, rumusan masalah, tujuan, Batasan masalah, dan sistematika penulisan laporan pada tugas akhir ini.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Pada bab ini dijelaskan mengenai beberapa teori dasar yang menunjang penelitian tugas akhir ini, yaitu DSSC tipe p.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini memberikan penjelasan detail tahapan-tahapan yang dilakukan untuk menyelesaikan penelitian tugas akhir ini.

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini dijelaskan hasil dan pembahasan pada perancangan dan hasil penelitian.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini terdiri dari kesimpulan dari penelitian tugas akhir ini dan saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutn

BAB II

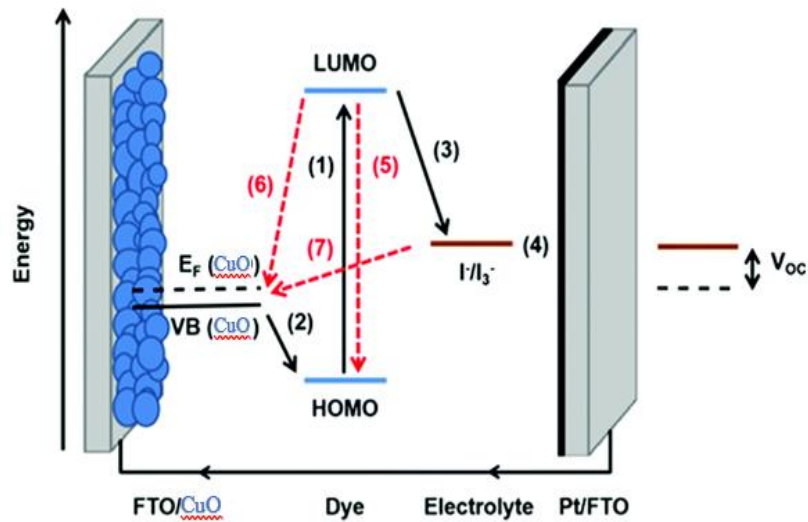
TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 DSSC Tipe P

DSSC tipe p dibuat dengan susunan komponen yang sama seperti DSSC tipe n, yaitu terdiri dari:

- a) *Working electrode*, berupa kaca konduktif transparan dengan lapisan oksida mesopori, dalam hal ini berupa CuO, yang dideposisikan pada kaca.
- b) Pewarna (*dye sensitizer*) yang terikat secara kovalen ke permukaan lapisan CuO untuk menangkap cahaya dan menghasilkan elektron yang tereksitasi foton.
- c) Elektrolit yang mengandung pasangan redoks, umumnya I^-/I_3^- , dalam pelarut organik untuk mengumpulkan elektron pada elektroda lawannya dan meregenerasi pewarna.
- d) *Counter electrode* yang terbuat dari kaca konduktif berlapis Pt (platinum) (Gong, Sumathy, Qiao, & Zhou, 2017).

Prinsip kerja DSSC tipe p mirip dengan DSSC tipe n, akan tetapi, dikarenakan pembawa muatan pada CuO adalah *hole* positif (h^+), aliran elektron yang terjadi adalah dalam arah sebaliknya. Pada DSSC tipe n, transfer elektron terjadi dari pewarna yang terkesitasi ke dalam pita konduksi TiO_2 , sedangkan pada DSSC tipe p, transfer electron terjadi dari pita valensi CuO ke pewarna yang tereksitasi (Benazzi, Mallows, Summers, Black, & Gibson, 2019).



Gambar 2.1 Skema proses transfer muatan yang terjadi pada DSSC tipe p (Benazzi, Mallows, Summers, Black, & Gibson, 2019)

Penyerapan foton menyebabkan terjadinya eksitasi pewarna (D) dari HOMO ke LUMO, membentuk electron yang tereksitasi sebagai berikut:



Kemudian terjadi transfer elektron dari pita valensi CuO ke pewarna yang tereksitasi atau dapat dikatakan transfer hole dari pewarna ke pita valensi CuO:



Pewarna tersebut kemudian diregenerasi oleh spesies teroksidasi di elektrolit dan melibatkan spesies radikal sebagai berikut:



Pewarna yang direduksi diregenerasi terlebih dahulu oleh triiodide untuk membentuk diiodide radikal dengan mengalami disproporsionasi sebagai berikut:



Regenerasi dari spesies yang tereduksi pada elektrolit terjadi di elektroda *counter*:



Proses transfer muatan ini beradu dengan beberapa jalur rekombinasi. Seperti terjadinya peluruhan keadaan tereksitasi dari pewarna (radiative dan non-radiatif):



Lalu rekombinasi antara pewarna yang tereduksi dengan *hole* pada CuO:

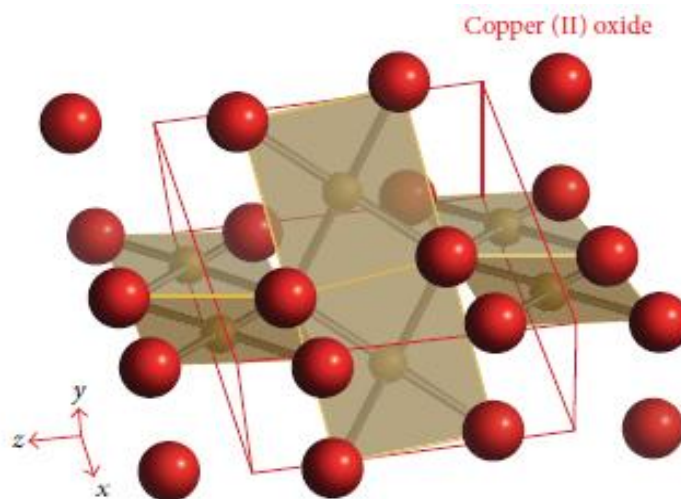


Kemudian rekombinasi *hole* di CuO dengan spesies tereduksi dalam elektrolit:



2.2 Karakteristik Nanopartikel CuO (*Cupric Oxide*)

Metal oxide semiconductors (MOS) terdapat banyak macamnya, diantaranya adalah *copper (II) oxide* atau *cupric oxide* (CuO). CuO merupakan MOS tipe p yang terkenal dengan sifat struktur, kimia, optik, dan listriknya yang menarik (Nesa, Momin, Sharmin, & Bhuiyan, 2020). CuO juga dikenal dengan celah pita energi yang sempit, yaitu pada rentang 1,2 – 1,85 eV, dimana variasi celah pita energi dapat berhubungan dengan efek ukuran kuantum *nanostructure* CuO (Nesa, Momin, Sharmin, & Bhuiyan, 2020).



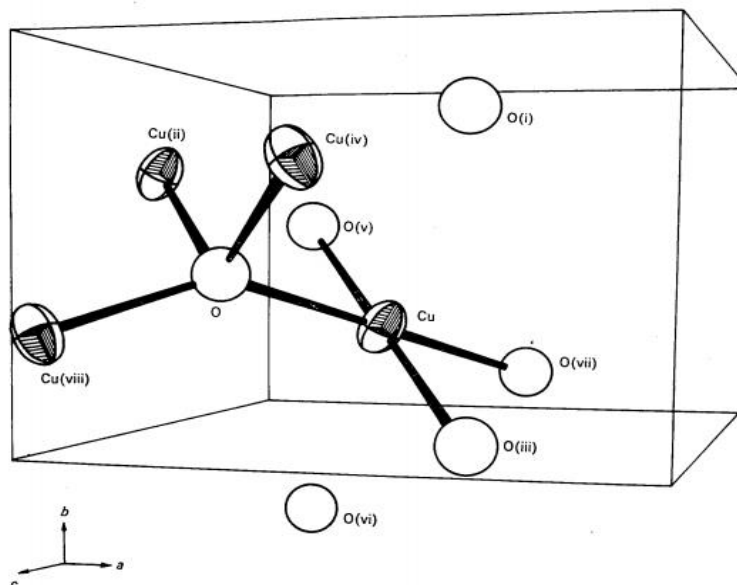
Gambar 2.2 Struktur kristal CuO (Tran & Nguyen, 2014)

Tidak seperti MOS lainnya yang struktur kristalnya kubik dengan kemungkinan distorsi *rhomboidal*, CuO memiliki struktur monoklinik (Nesa, Momin, Sharmin, & Bhuiyan, 2020). Monoklinik merupakan struktur dimana ketiga konstanta kisi tidak ada yang sama, serta memiliki sudut α (sudut antara kisi b dan c) dan γ (sudut antara kisi a dan b) berukuran sama, yaitu 90° , sedangkan sudut β (sudut antara kisi a dan c) berbeda (Callister, Jr. & Rethwisch, 2014). Kristal CuO memiliki struktur monoklinik dengan *space group* $C2/c$ (simetri C_2^6) (Tran & Nguyen, 2014). Bilangan koordinasi dari atom Cu adalah 4, sehingga atom Cu berikatan dengan empat atom O pada bidang persegi dengan konfigurasi [110] seperti pada Gambar 2.2 dan panjang ikatan Cu-O pada bidang ini adalah 1,88 dan

1,96 Å, kemudian atom O tersebut juga berikatan dengan empat atom Cu, tegak lurus dengan bidang [110], membentuk *tetrahedron* terdistorsi seperti pada Gambar 2.3 (Tran & Nguyen, 2014). Properti kristal dan konstanta fisika dari CuO tampak sebagaimana Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1 Properti kristal dan konstanta fisis dari CuO (Tran & Nguyen, 2014)

Space group	C2/c (No. 15)	
Unit cell	$a = 4,6837 \text{ \AA}$	
	$b = 3,4226 \text{ \AA}$	
	$c = 5,1288 \text{ \AA}$	
	$\beta = 99,54^\circ$	
	$\alpha = \gamma = 90^\circ$	
Cell volume	81,08 Å ³	
Cell content	4 CuO	
Formula weight	79,57	
Density	6,515 g/cm ³	
Distances		
	Cu-O	1,96 Å
	O-O	2,62 Å
Cu-Cu	2,90 Å	
Melting point	1201°C	

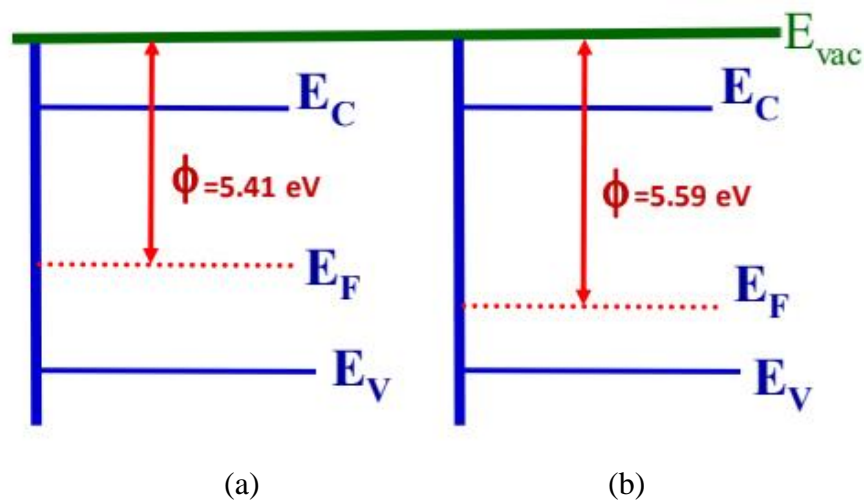


Gambar 2.3 Satu unit sel dalam kristal (Cudennec & Lecerf, 2003)

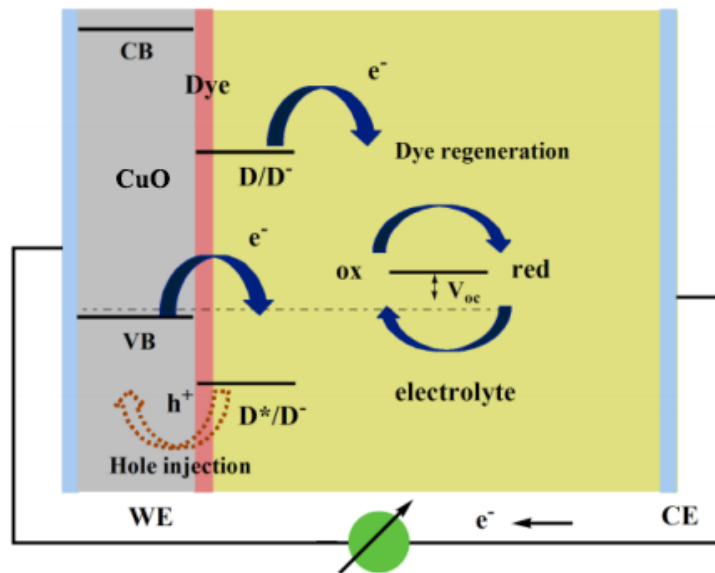
2.3 CuO Doping Zn (Zinc) Sebagai Fotokatoda DSSC

Zn sebagai dopan CuO dinilai sangat menjanjikan, hal ini dikarenakan nilai radius ion Zn^{2+} yang mirip dengan Cu^{2+} , yaitu sebesar 0,074 nm, sedangkan Cu^{2+} berukuran 0,072 nm, serta keadaan ionik yang mirip pula (Iqbal, et al., 2015). Hal tersebut menyebabkan kelarutan termodinamika Zn^{2+} yang lebih tinggi dalam CuO, sehingga mudah untuk larut pada matriks CuO (Iqbal, et al., 2015).

CuO sebagai semikonduktor tipe p memiliki hole sebagai pembawa muatan mayoritasnya. Energi fermi pada semikonduktor tipe p berada dekat dengan pita valensi seperti pada Gambar 2.4a. Setelah dilakukannya doping Zn, energi fermi bergeser ke bawah semakin mendekati pita valensi seperti pada Gambar 2.4b (Goyal, et al., 2020). Mendekatnya energi fermi ke pita valensi akan memengaruhi efisiensi DSSC. Hal tersebut dikarenakan jarak antara energi fermi dengan potensial redoks pada elektrolit menentukan besarnya tegangan *open circuit* (V_{OC}) (Odobel, et al., 2012) seperti pada Gambar 2.5. Sehingga, doping Zn akan meningkatkan nilai V_{OC} , yang kemudian akan meningkatkan efisiensi DSSC sesuai dengan persamaan (2.10).



Gambar 2.4 Celah pita energi dari (a) CuO murni dan (b) CuO doping Zn (Goyal, et al., 2020)



Gambar 2.5 Ilustrasi prinsip kerja DSSC tipe p di bawah sinar matahari (Qin, 2010)

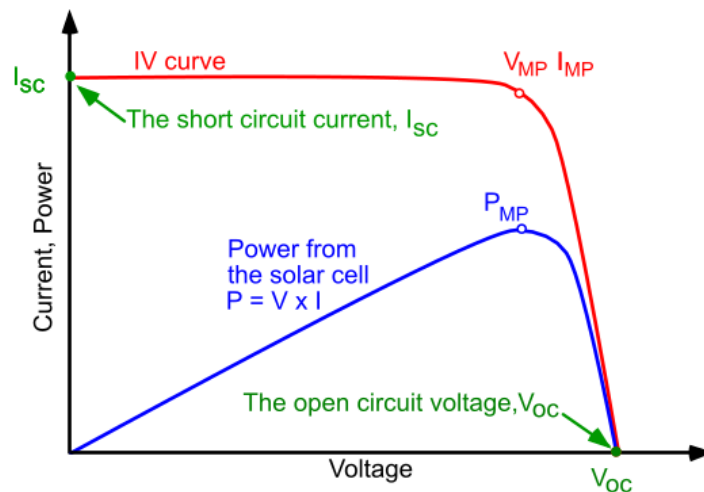
Telah banyak dilakukan penelitian dengan metode yang berbeda-beda mengenai pengaruh doping Zn terhadap sifat CuO. Penelitian dengan metode *sol-gel*, *facile chemical*, dan *hydrothermal* menghasilkan nanopartikel dengan ukuran partikel dan ukuran kristal yang meningkat, serta penyempitan celah pita energi CuO seiring dengan bertambahnya konsentrasi Zn (Jayaprakash, Srinivasan, Chandrasekaran, & Girija, 2014; Iqbal, et al., 2015; Sonia, et al., 2015). Namun ada juga penelitian yang hasil datanya fluktuatif, bahkan menunjukkan peningkatan celah pita energi (Yathisha & Nayaka, 2017; Kumar, Sharma, & Dahiya, 2017). Sehingga dapat disimpulkan bahwa konsentrasi Zn akan memengaruhi ukuran kristal, spektrum absorbansi, dan lebar celah pita energi dari CuO. Selain itu, Zn juga memengaruhi struktur dari CuO. Volume sel CuO doping Zn meningkat dibandingkan dengan volume sel CuO dikarenakan pelemahan orbital elektronik, dengan besarnya volume sel adalah $56,875 \text{ \AA}^3$ untuk CuO dan $381,795 \text{ \AA}^3$ untuk CuO doping Zn (Nesa, Momin, Sharmin, & Bhuiyan, 2020). Parameter kisi antara CuO dengan CuO doping Zn dibandingkan seperti pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Perbandingan parameter kisi antara CuO dan CuO doping Zn dihitung secara teoritis dan dari data eksperimen (Nesa, Momin, Sharmin, & Bhuiyan, 2020)

Material	Nilai eksperimen				Nilai teori			
	a (Å)	b (Å)	c (Å)	γ	a (Å)	b (Å)	c (Å)	γ
CuO	4,6915	3,4127	5,2527	99,54	2,9334	2,9334	6,6097	90,02
CuO doping Zn	4,6824	3,4107	5,1858	99,54	6,0403	5,9885	10,554	86,12

2.4 Performansi DSSC

Performansi DSSC didapatkan melalui uji I-V, yaitu pengukuran arus (I) dan tegangan (V) yang dihasilkan DSSC. Hasil pengukuran I-V kemudian akan diolah menjadi kurva I-V dan akan didapatkan nilai *fill factor*-nya.



Gambar 2.6 Kurva I-V ideal

Nilai *fill factor* didapatkan melalui persamaan sebagai berikut:

$$FF = \frac{V_{mpp} \times I_{mpp}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (2.9)$$

dimana V_{mpp} dan I_{mpp} adalah tegangan dan arus ketika daya maksimum, V_{oc} adalah tegangan ketika *open circuit*, dan I_{sc} adalah arus ketika *short circuit*. Setelah

didapatkan nilai *fill factor*, dihitung nilai efisiensinya, yaitu rasio keluaran energi dari sel surya dengan energi masukan dari sinar matahari (Honsberg & Bowden, 2019). Efisiensi DSSC sangat dipengaruhi oleh nilai V_{OC} , J_{SC} , dan FF sebagaimana terlihat dalam persamaan (2.10) berikut:

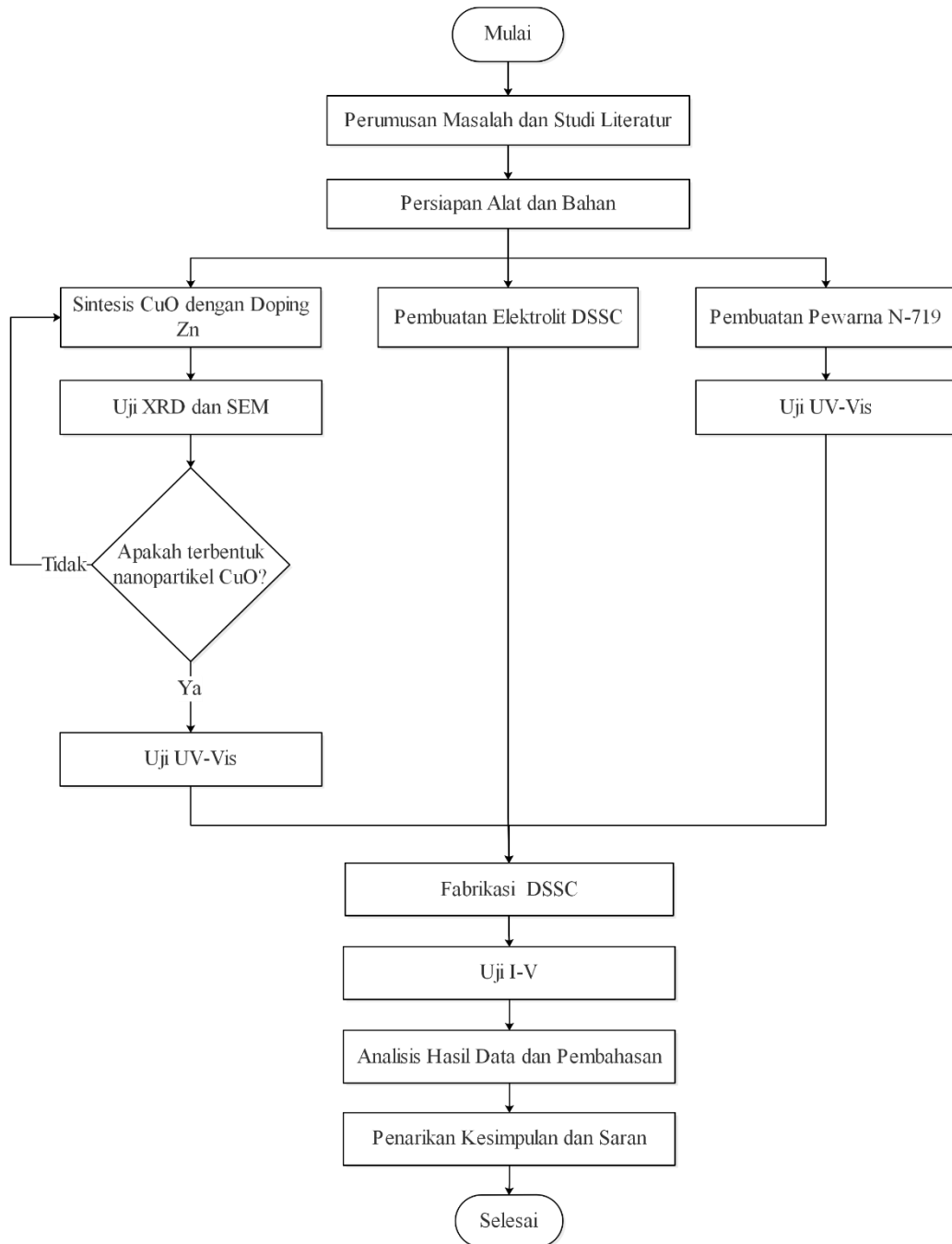
$$\eta = \frac{V_{OC} \times J_{SC} \times FF}{P_{sun}} \times 100\% \quad (2.10)$$

dimana P_{sun} merupakan nilai irradiansi matahari yang telah dikonversi menjadi mW/cm^2 .

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan memperhatikan tahapan-tahapan sebagai berikut:



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.1 Studi literatur

Studi literatur dilakuka untuk memahami konsep-konsep yang terkait dengan permasalahan yang telah dibuat dan juga untuk mencari solusi atas permasalahan tersebut. Studi literatur dalam penelitian ini meliputi prinsip kerja dan cara fabrikasi DSSC tipe p, cara sintesis CuO dengan doping Zn, cara pembuatan elektrolit dan pewarna N-719, serta cara pengujiannya.

3.2 Persiapan Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian ini adalah gelas beker, gelas ukur, spatula, pipet tets, timbangan digital, *magnetic stirrer/hot plate*, pH meter, *centrifuge*, oven, *furnace*, dan *sieve 400 mesh*.

Bahan kimia yang digunakan dalam penelitian ini merupakan *copper (II) chloride dehydrates* ($\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), *zinc chloride* (ZnCl_2), *sodium hydroxide* (NaOH), kalium iodide (KI), iodida (I_2), PEG 4000, *ruthenium N-719* ($\text{C}_{58}\text{H}_{86}\text{N}_8\text{O}_8\text{RuS}_2$), *aquades*, asam asetat (CH_3COOH), *chloroform* (CHCl_3), *acetonitrile* (CH_3CN), dan *ethanol* ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$).

Bahan yang dibutuhkan untuk perakitan DSSC adalah kaca *Fluorine doped Tin Oxide* (FTO), pasta semikonduktor, pewarna *ruthenium N-719*, elektrolit iodide/triiodide, dan kaca FTO *Pt-coated* yang dilapisi lagi dengan karbon.

3.3 Sintesis CuO dengan Doping Zn

CuO doping Zn (dengan variasi doping Zn = 0, 8, 10, 12, dan 14 mol%) disintesis menggunakan metode *facile chemical*. $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ dan ZnCl_2 dilarutkan pada *aquades*, seperti pada Gambar 3.2, dengan memperhatikan rasio molarnya. Kemudian 2 ml CH_3COOH ditambahkan ke dalam larutan tersebut. NaOH 1 M ditambahkan dalam larutan secara setetes demi setetes sehingga pH berubah menjadi 10, setelah itu dipanaskan pada suhu 100°C selama 1 jam dalam keadaan tetap mengaduk. Presipitat diambil dan dicuci menggunakan *aquades* dengan cara *centrifugation* pada kecepatan 8000 rpm selama 10 menit, kemudian dikeringkan semalaman pada suhu 100°C dengan oven. Sampel yang sudah kering dikalsinasi

selama 2 jam pada suhu 300°C . Bubuk nanopartikel kemudian disaring dengan *sieve* agar bubuk menjadi lebih halus.



Gambar 3.2 Larutan CuO doping Zn



Gambar 3.3 Larutan CuO doping Zn setelah ditetaskan NaOH



Gambar 3.4 Terjadinya pengendapan



Gambar 3.5 Larutan CuO doping Zn sebelum dan sesudah di-centrifuge



(a)

(b)

Gambar 3.6 Presipitat (a) sebelum dan (b) sesudah di-oven selama 12 jam



Gambar 3.7 CuO doping Zn setelah dikalsinasi pada suhu 300°C



Gambar 3.8 Bubuk nanopartikel CuO doping Zn

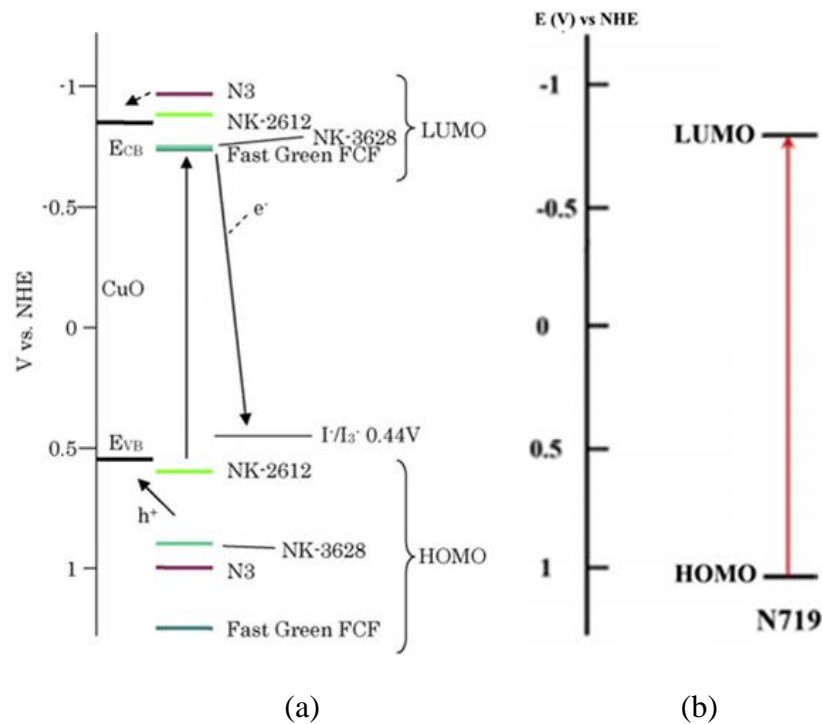
3.4 Pembuatan Elektrolit DSSC

Elektrolit dibuat dengan melarutkan 0,8g KI dalam 10 ml *acetonitrile* hingga larut sepenuhnya, kemudian ditambahkan 0,127g I₂. Pada saat yang sama, dilarutkan pula 7g PEG 4000 dalam 25 ml *chloroform*, hingga membentuk gel. Kemudian larutan elektrolit dicampurkan dengan gel tersebut dan diaduk selama 1 jam pada suhu 80°C.

3.5 Pembuatan Pewarna N-719

Pewarna adalah komponen utama DSSC yang menyerap foton pada rentang cahaya tampak, karena dengan meningkatkan absorpsi ke daerah cahaya tampak merah dan *infrared*, rapat arus *short circuit* (J_{sc}) akan meningkat (Rawal, Vaishaly, Sharma, & Mathew, 2015). J_{sc} yang tinggi akan meningkatkan efisiensi DSSC, seperti pada persamaan (2.10). Seperti pada Gambar 2.1 dan Gambar 2.5, letak HOMO (*Highest Occupied Molecular Orbital*) dan LUMO (*Lowest Unoccupied Molecular Orbital*) pewarna sangat berpengaruh dalam proses kerja DSSC. Seperti pada Gambar 3.9a, level HOMO sebaiknya cukup dalam untuk menginjeksikan hole ke pita valensi CuO, seperti pewarna *Fast Green FCF* yang memiliki beda potensial terbesar antara HOMO dengan pita valensi, sehingga memberikan laju injeksi hole tercepat, menyebabkan performansi DSSC yang tinggi. Kemudian level LUMO sebaiknya di bawah pita konduksi CuO untuk menghindari terjadinya rekombinasi elektron dari LUMO dengan hole pada CuO seperti pada pewarna N3 (Sumikura, Mori, Shimizu, Usami, & Suzuki, 2008).

Pada penelitian ini, pewarna *ruthenium* N-719 dibuat dengan melarutkan bubuk $C_{58}H_{86}N_8O_8RuS_2$ dalam *ethanol* sehingga terbentuk larutan dengan konsentrasi 0,3 mM. Diagram energi dari N-719 dapat dilihat pada Gambar 3.9b, dimana level HOMO di bawah pita valensi CuO dan level LUMO di bawah pita konduksi CuO.



Gambar 3. 9 Diagram energi dari (a) CuO dan beragam pewarna (Sumikura, Mori, Shimizu, Usami, & Suzuki, 2008) dan (b) pewarna N-719 (Li, et al., 2014)

3.6 Karakterisasi Nanopartikel

3.6.1 Uji XRD (*X-Ray Diffraction*)

Uji XRD dilakukan untuk mengamati fasa yang terbentuk pada CuO doping Zn dan mengetahui parameter struktur kristal, seperti ukuran kristal (D), *micro-strain* (ε), dan *dislocation density* (δ) yang dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (3.1)$$

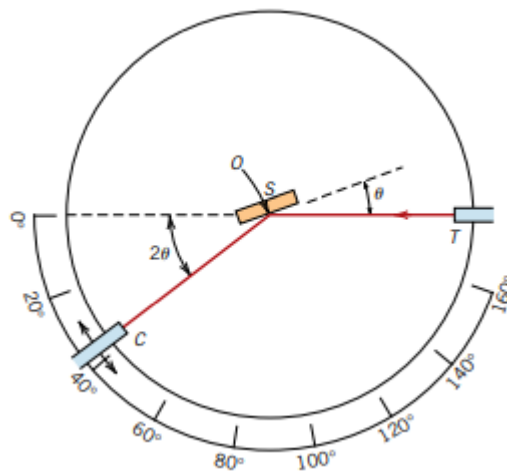
$$\varepsilon = \frac{\beta \cos\theta}{4} \quad (3.2)$$

$$\delta = \frac{1}{D^2} \quad (3.3)$$

dimana λ (0,15406nm) adalah panjang gelombang sinar X, k (0,89) adalah konstanta, dan β adalah FWHM (*Full Width at Half Maximum*) dalam satuan radian.

Uji XRD dilakukan di Laboratorium Karakterisasi Material Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS menggunakan XRD PANalytical X'Pert Pro.

XRD terdiri dari tiga hal, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3.10, yaitu sumber sinar X (T), sampel (S), dan detektor (C). Sampel S diletakkan pada plat datar yang memungkinkan untuk berotasi pada sumbu O, kemudian sinar X ditembakkan dari sumbernya hingga mengenai sampel, lalu sinar yang terdifraksi dideteksi oleh detektor. Detektor dan sampel berotasi pada sumbu O sehingga rotasi sampel dengan sudut θ diikuti dengan rotasi detektor dengan sudut 2θ , hal ini untuk memastikan bahwa sudut insiden dan refleksi dipertahankan satu sama lain. Ketika detektor bergerak pada kecepatan putar yang konstan, intensitas sinar X yang dipantulkan akan dicatat secara otomatis.

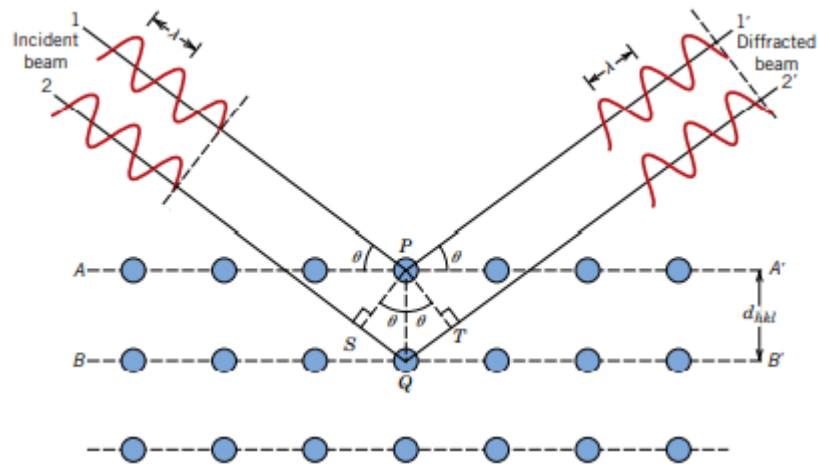


Gambar 3.10 Skema diagram XRD (Callister, Jr. & Rethwisch, 2014)

Sinar x ditembakkan pada sampel, seperti pada Gambar 3.11, dan dihamburkan oleh atom-atom pada sampel membentuk sudut θ . Interferensi konstruktif dari sinar yang terdifraksi juga terjadi pada sudut θ , memenuhi hukum Bragg sebagai berikut:

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (3.4)$$

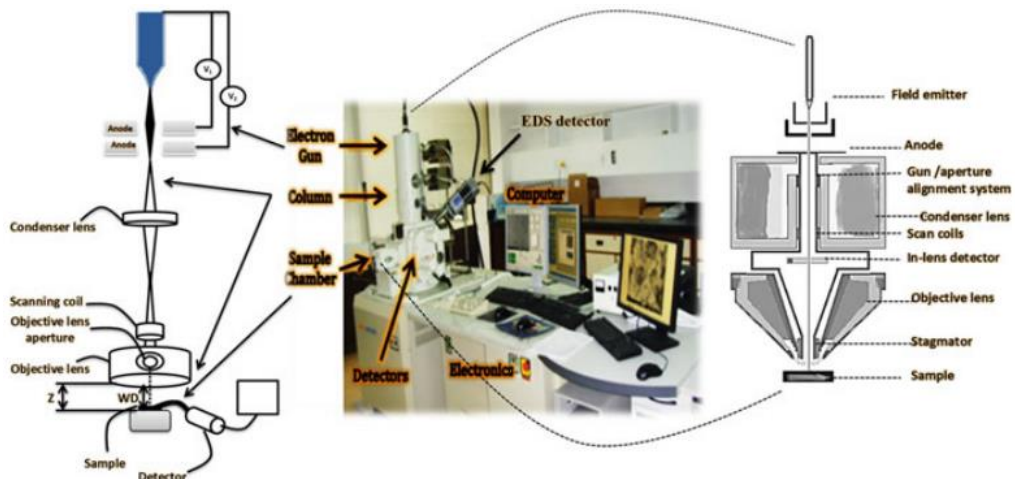
dimana n adalah bilangan bulat, d adalah jarak antar bidang, dan θ adalah sudut difraksi.



Gambar 3.11 Difraksi dari sinar x (Callister, Jr. & Rethwisch, 2014)

3.6.2 Uji SEM (*Scanning Electron Microscope*)

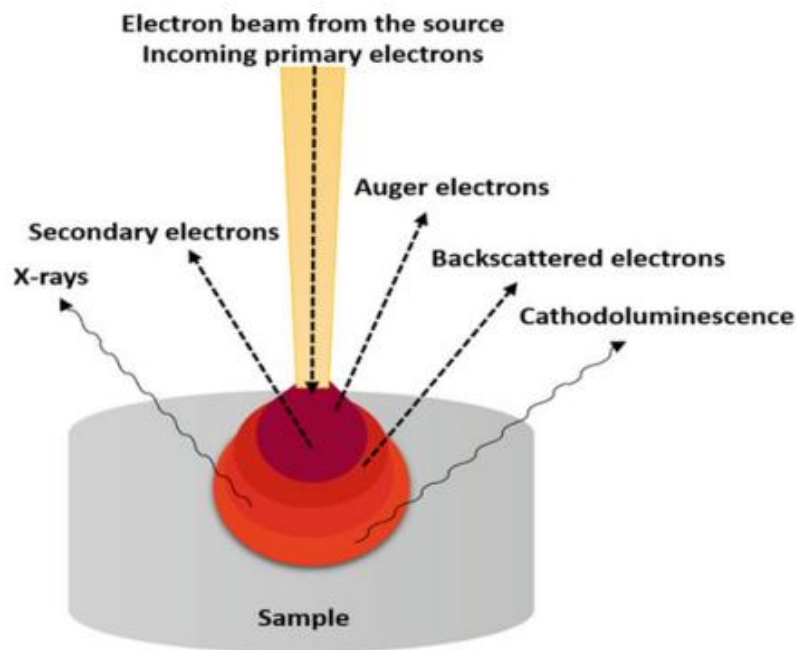
Pengujian SEM dilakukan untuk mengetahui morfologi dan ukuran partikel dari CuO doping Zn. SEM memindai permukaan sampel menggunakan berkas elektron yang bergerak dengan energi rendah untuk memfokuskan dan memindai sampel (Mokobi, 2020). Pada penelitian ini, pengujian SEM dilakukan di Laboratorium Karakterisasi Material Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS.



Gambar 3.12 Konfigurasi SEM (Akhtar, Khan, Khan, & Asiri, 2018)

SEM adalah sistem optik dan elektronik yang terdiri dari beberapa komponen, yaitu penembak elektron, vakum, dan kolom berisi lensa kondensor, lilitan pemindai, lensa objektif, stigmator, pemegang sampel, dan detektor. Pada

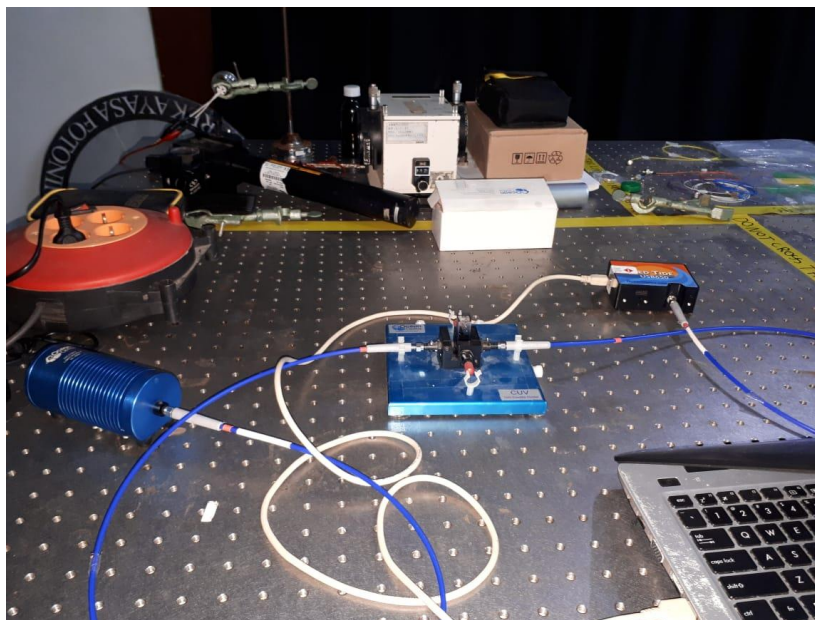
prinsipnya, penembak elektron menembakkan sinar elektron, yang ditahan dalam tempat vakum, pada jalur vertikal melalui medan elektromagnetik dan lensa-lensa. Sinar elektron difokuskan oleh lensa objektif pada sampel, kemudian sinar yang terfokus memindai luas permukaan sampel. Sinar elektron yang mengenai sampel menghasilkan beberapa sinyal, seperti Gambar 3.13, yang dapat dideteksi oleh detektor dan dikonversikan menjadi gambar (Akhtar, Khan, Khan, & Asiri, 2018).



Gambar 3.13 Interaksi sinar elektron dengan sampel dan sinyal yang diemisikan (Akhtar, Khan, Khan, & Asiri, 2018)

3.7 Uji UV-Vis

Uji UV-Vis merupakan pengujian yang dilakukan untuk mengetahui absorbansi dari suatu material, dimana pada penelitian ini adalah CuO murni dan CuO doping Zn. 0,004g bubuk CuO doping Zn dilarutkan dengan 5 ml *ethanol* agar menghasilkan larutan dengan konsentrasi 0,01 M dan diletakkan pada kuvet. *Setup* alat pengukuran UV-Vis tampak pada Gambar 3.14 berikut.



Gambar 3.14 Setup alat pengujian UV-Vis

Sumber cahaya yang digunakan adalah lampu halogen Ocean Optics HL-2000 yang cahayanya ditembakkan pada kuvet, kemudian cahaya tersebut ditransmisikan ke spektrometer Ocean Optics Red Tide USB650 dan hasilnya langsung ditampilkan di PC menggunakan *software* SpectraSuite. Rentang panjang gelombang yang digunakan adalah 350-1000 nm.

Data yang didapatkan berupa absorbansi per panjang gelombang, yang kemudian diolah menjadi grafik Tauc agar didapatkan celah pita energinya. Persamaan Tauc adalah sebagai berikut:

$$(\alpha hv)^n = K(hv - E_g) \quad (3.5)$$

dimana α adalah koefisien absorpsi, hv adalah energi foton, K adalah konstanta, dan E_g adalah celah pita energi, sedangkan n merepresentasikan transisi semikonduktor, untuk *direct band gap*, n bernilai 2. Pada grafik Tauc, energi foton diplot pada sumbu x dan $(\alpha hv)^2$ pada sumbu y. Kemudian ditarik garis lurus dari kurva hingga memotong sumbu x agar didapatkan celah pita energinya. Energi foton dan koefisien absorpsi didapatkan melalui persamaan (3.6) dan (3.7) sebagai berikut:

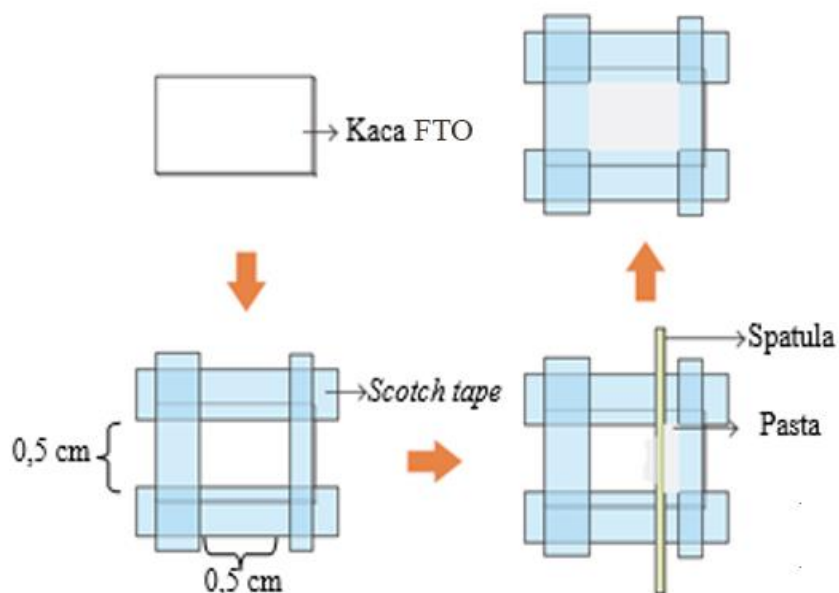
$$hv = \frac{1240}{\lambda} \quad (3.6)$$

$$\alpha = \frac{2,303A}{l} \quad (3.7)$$

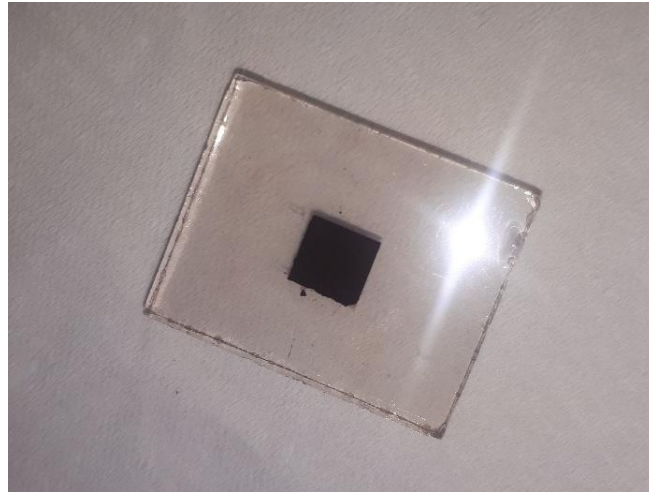
Dimana λ adalah panjang gelombang (nm), A adalah absorbansi, dan l adalah panjang lintasan cahaya, yaitu 1 cm.

3.8 Fabrikasi DSSC

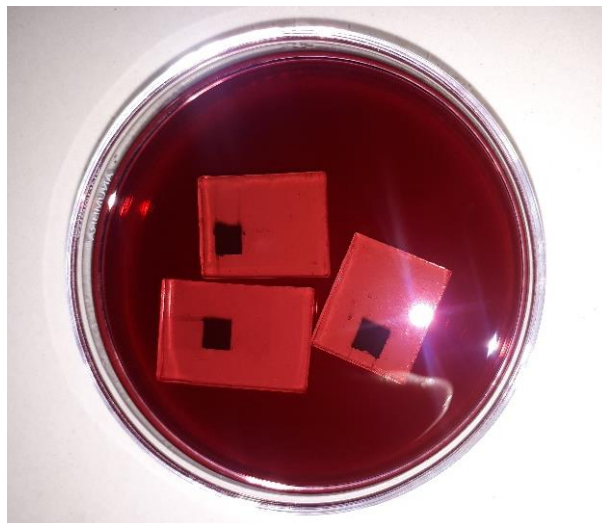
Pada penelitian ini, sampel yang diteliti adalah nanopartikel CuO dan CuO dengan doping Zn. Pembuatan pasta dilakukan dengan melarutkan 0,5g bubuk CuO doping Zn dalam 1 ml *ethanol*. Pasta kemudian dilapisi pada kaca FTO menggunakan metode *doctor blade*. Sisi-sisi kaca FTO terlebih dahulu dilapisi *scotch tape* hingga membentuk persegi berukuran 0,5 cm x 0,5 cm, seperti Gambar 3.15, sebagai permukaan yang akan dilapisi pasta. Pasta kemudian diteteskan ke kaca FTO dan dilapiskan menggunakan spatula kaca. Kemudian kaca FTO dipanaskan pada *hot plate* selama 10 menit dengan suhu 150°C (Prabhin, Jeyasubramanian, Romulus, & Singh, 2017). Kaca FTO yang telah dipanaskan, direndam dalam larutan pewarna N-719 selama 24 jam.



Gambar 3.15 Pelapisan pasta pada kaca FTO

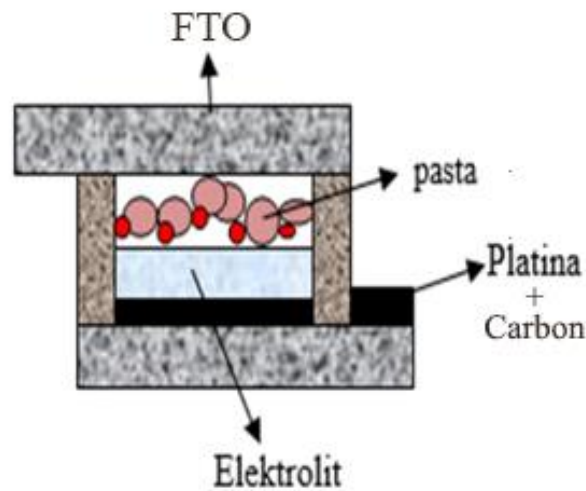


Gambar 3.16 Kaca FTO yang telah dilapisi pasta semikonduktor



Gambar 3.17 Kaca FTO dan pasta direndam dalam pewarna N-719

Langkah selanjutnya adalah penyusunan komponen-komponen DSSC dengan struktur *sandwich* yang terdiri dari kaca FTO yang sudah terlapisi fotokatoda dan telah direndam pewarna, larutan elektrolit, dan kaca FTO berlapis platina, yang kemudian ditambahkan karbon, sebagai elektroda lawannya. Larutan elektrolit ditetaskan pada permukaan fotokatoda secukupnya. Susunan DSSC tersebut kemudian direkatkan menggunakan penjepit.



Gambar 3.18 Struktur *sandwich* DSSC

3.9 Pengujian Performansi DSSC dengan Uji I-V

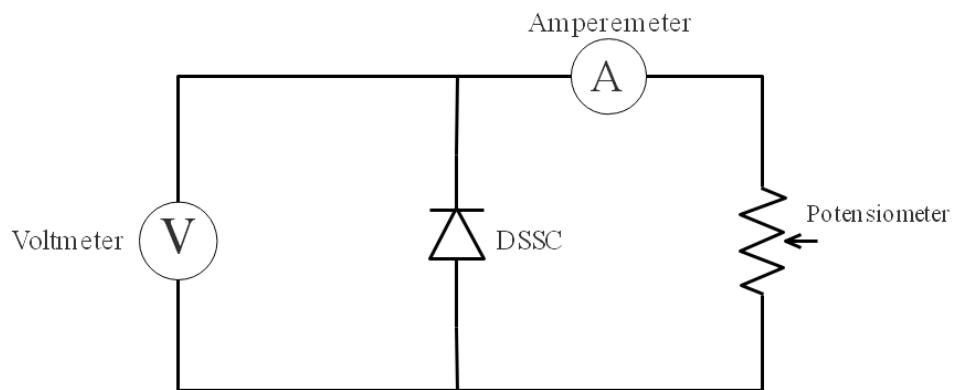
Uji I-V dilakukan untuk mengukur arus (I) dan tegangan (V) yang dihasilkan oleh DSSC di bawah sinar matahari untuk mengetahui performansinya. Hasil pengukuran akan diolah menjadi kurva I-V seperti pada Gambar 2.6. Arus dan tegangan ketika daya maksimum didapatkan dengan kurva P-V, sehingga didapatkan *fill factor* berdasarkan persamaan (2.9). Berdasarkan *fill factor*, akan didapatkan efisiensi dari DSSC menggunakan persamaan (2.10).

Pada penelitian ini, uji I-V dilakukan di Venus, Teknik Fisika ITS dengan menggunakan cahaya matahari langsung. Cahaya matahari diukur iradiansinya dengan menggunakan *pyranometer* yang disambungkan dengan multimeter untuk dicatat tegangannya dan kemudian dikonversi menggunakan persamaan (3.8) sebagai berikut:

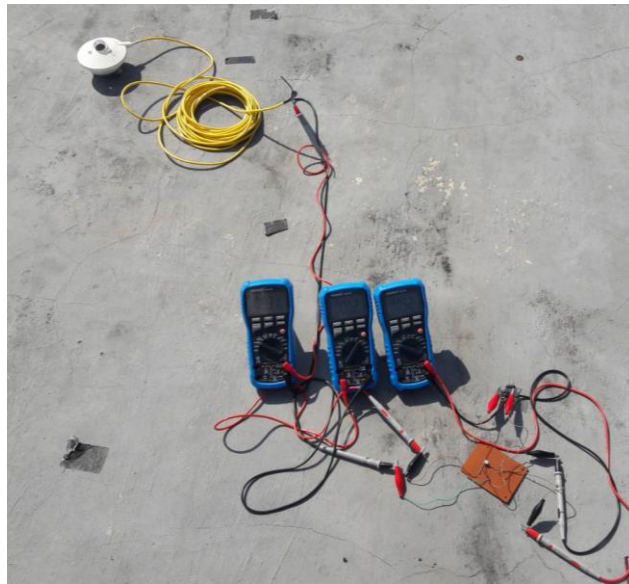
$$P_{sun} \left(\frac{mW}{cm^2} \right) = \frac{V_{sun} (\mu V)}{S \left(\frac{\mu V}{W \cdot m^{-2}} \right)} \times \frac{1}{10} \quad (3.8)$$

dimana V_{sun} merupakan tegangan keluaran dari *pyranometer* dan S merupakan sensitivitas *pyranometer* sesuai dengan yang dituliskan pada produk. Pada penelitian ini, *pyranometer* yang digunakan adalah CMP 3 Kipp & Zonen yang

memiliki sensitivitas $14,36 \mu\text{V/W/m}^2$. Kemudian, diperlukan pula rangkaian ekuivalen untuk mengukur arus dan tegangan DSSC sebagai berikut:



Gambar 3.19 Rangkaian ekuivalen DSSC



Gambar 3.20 *Setup* pengambilan data I-V

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakterisasi Nanopartikel CuO dan CuO doping Zn

4.1.1 Hasil Uji XRD

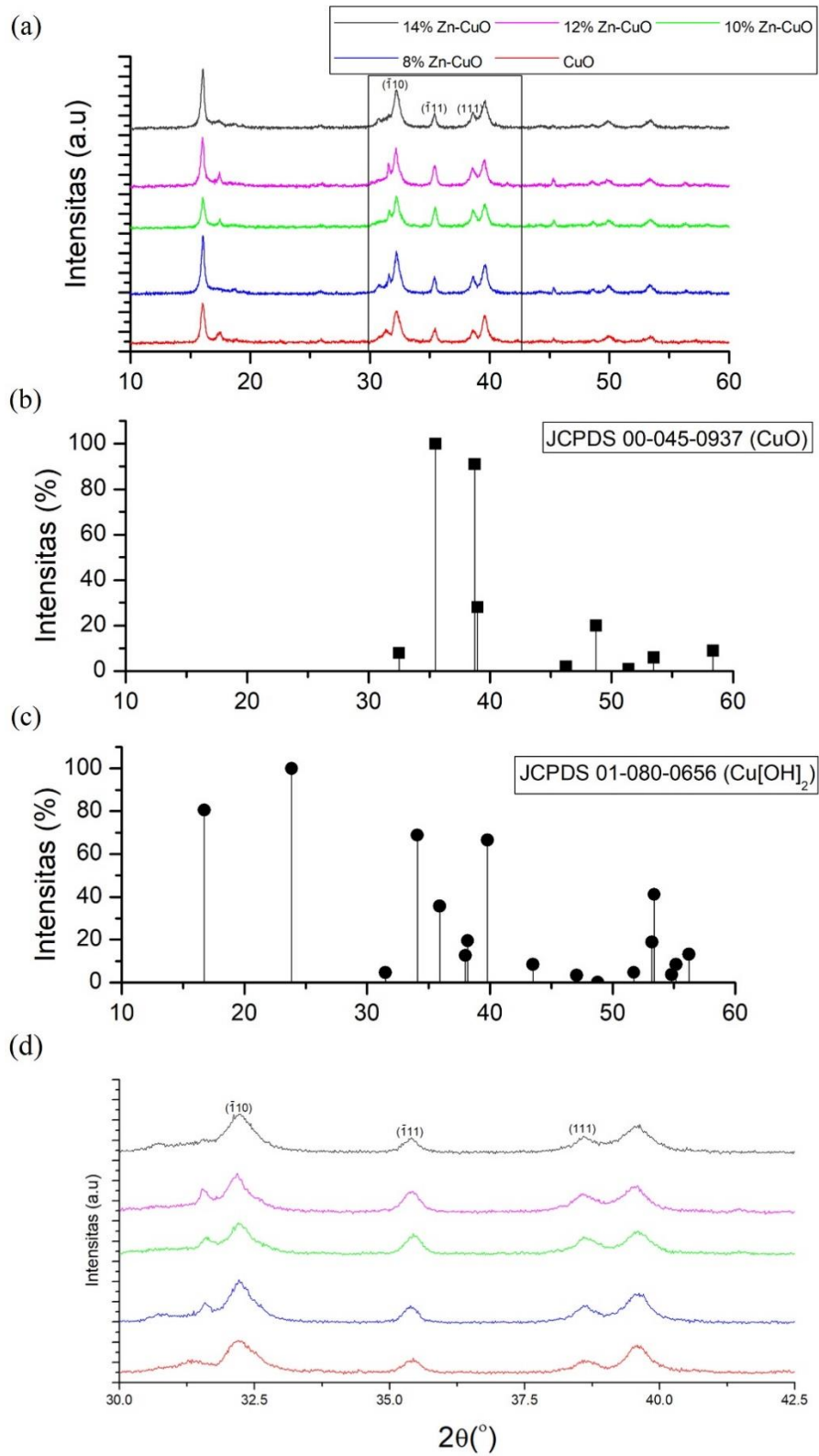
Gambar 4.1a menunjukkan hasil uji XRD dari CuO murni dan CuO doping Zn. Terdapat beberapa puncak pada $2\theta = 32,2^\circ$, $35,5^\circ$, dan $38,6^\circ$ yang sesuai dengan hkl $(\bar{1}10)$, $(\bar{1}11)$, dan (111) pada CuO monoklinik berdasarkan JCPDS 00-045-0937 (Gambar 4.1b). Kemudian terdapat pula puncak pada $2\theta = 16,04^\circ$, $31,6^\circ$, dan $39,6^\circ$ yang sesuai dengan hkl (020) , (110) , dan (130) pada $\text{Cu}(\text{OH})_2$ berdasarkan JCPDS 01-080-0656 (Gambar 4.1c). Hal ini mengindikasikan bahwa ada beberapa $\text{Cu}(\text{OH})_2$ yang belum berubah secara sempurna menjadi CuO. Pada analisis XRD menggunakan *software* X'Pert HighScore, tidak ditemukan fase yang berkaitan dengan Zn pada sampel CuO doping Zn. Hal ini menandakan seluruh dopan terintegrasi dengan baik ke dalam kisi CuO.

Parameter kisi dari CuO dihitung menggunakan persamaan berikut (Yathisha & Nayaka, 2017):

$$\frac{1}{d^2} = \frac{1}{\sin^2\beta} \left(\frac{h^2}{x^2} + \frac{k^2 \sin^2\beta}{y^2} + \frac{l^2}{z^2} - \frac{2hlc\cos\beta}{xz} \right) \quad (4.1)$$

$$V = xyz(\sin\beta) \quad (4.2)$$

dimana x , y , dan z adalah konstanta kisi, d adalah jarak antar bidang, β adalah sudut antar muka, dan h , k , l merupakan indeks Miller. Hasil perhitungan dinyatakan pada Tabel 4.1. Terlihat bahwa tidak terjadi perubahan yang signifikan pada parameter kisi seiring dengan bertambahnya doping Zn pada CuO. Hal ini dikarenakan radius ion Zn^{2+} yang hanya berbeda sedikit dengan ion Cu^{2+} .



Gambar 4.1 Pola XRD dari (a) CuO murni dan CuO doping Zn, (b) CuO berdasarkan JCPDS, (c) $\text{Cu}(\text{OH})_2$ berdasarkan JCPDS, dan (d) CuO murni dan CuO doping Zn (perbesaran)

Tabel 4.1 Parameter kisi dari CuO

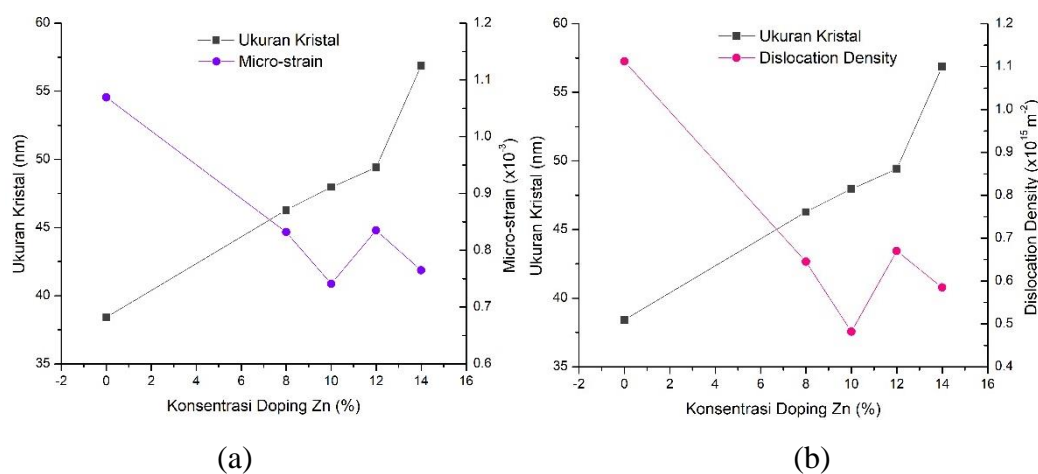
Sampel	Puncak 2 θ (°)	FWHM β (°)	<i>d</i> - <i>spacing</i> (Å)	Parameter kisi	Volume sel (Å) ³
CuO	32,235	0,368	2,777	x = 4,722 Å	81,80
	35,476	0,2676	2,531	y = 3,420 Å	
	38,547	0,1338	2,336	z = 5,132 Å β = 99,22°	
8%Zn-CuO	32,182	0,1171	2,782	x = 4,699 Å	81,67
	35,455	0,2175	2,532	y = 3,437 Å	
	38,622	0,2676	2,331	z = 5,128 Å β = 99,51°	
10%Zn-CuO	32,203	0,2007	2,780	x = 4,700 Å	81,574
	35,512	0,1338	2,528	y = 3,433 Å	
	38,569	0,2007	2,334	z = 5,129 Å β = 99,61°	
12%Zn-CuO	32,198	0,2676	2,780	x = 4,713 Å	81,648
	35,337	0,1004	2,540	y = 3,424 Å	
	38,565	0,2342	2,335	z = 5,127 Å β = 99,33°	
14%Zn-CuO	32,241	0,2676	2,777	x = 4,702 Å	81,708
	35,414	0,0836	2,535	y = 3,428 Å	
	38,578	0,2007	2,334	z = 5,142 Å β = 99,58°	

Ukuran kristal, *micro-strain*, dan *dislocation density* dihitung menggunakan persamaan (3.1), (3.2), dan (3.3) dan didapatkan hasilnya seperti pada Tabel 4.2. Terjadi peningkatan ukuran kristal dari 38,415 nm menjadi 56,892 nm, atau sebesar 48,1%, seiring dengan bertambahnya konsentrasi doping Zn pada CuO. Peningkatan ukuran kristal dapat dijelaskan oleh distorsi kisi yang terjadi karena doping Zn, dapat dikaitkan dengan hukum Vegard yang menyatakan bahwa

perubahan ukuran kristal dapat disebabkan oleh perbedaan radius ion dari ion pengganti dan ion yang digantikan (Kumar, Sharma, & Dahiya, 2017). Pada penelitian ini, ukuran kristal yang meningkat seiring peningkatan konsentrasi doping Zn dapat dikarenakan radius ion Zn^{2+} , sebagai ion pengganti, yang sedikit lebih besar dibandingkan dengan ion Cu^{2+} , sebagai ion yang terganti. Gambar 4.2a dan Gambar 4.2b mengindikasikan bahwa *micro-strain* berbanding lurus dengan *dislocation density*. Dislokasi adalah ketidakaturan dalam kristal yang muncul karena ketidakcocokan kisi dari satu bagian kristal ke bagian lainnya (Yathisha & Nayaka, 2017). Pada penelitian ini, nilai *dislocation density* dan *micro-strain* bervariasi seiring dengan meningkatnya konsentrasi doping Zn.

Tabel 4.2 Ukuran kristal, *micro-strain*, dan *dislocation density* dari CuO

Sampel	Ukuran kristal (nm)	<i>Micro-strain</i> ϵ ($\times 10^{-3}$)	<i>Dislocation density</i> δ ($\times 10^{15} m^{-2}$)
CuO	38,415	1,069	1,112
8%Zn-CuO	46,284	0,832	0,645
10%Zn-CuO	47,954	0,741	0,482
12%Zn-CuO	49,405	0,835	0,670
14%Zn-CuO	56,892	0,765	0,585



Gambar 4.2 Hubungan antara ukuran kristal dengan (a) *micro-strain* dan (b) *dislocation density*

4.1.2 Hasil Uji SEM

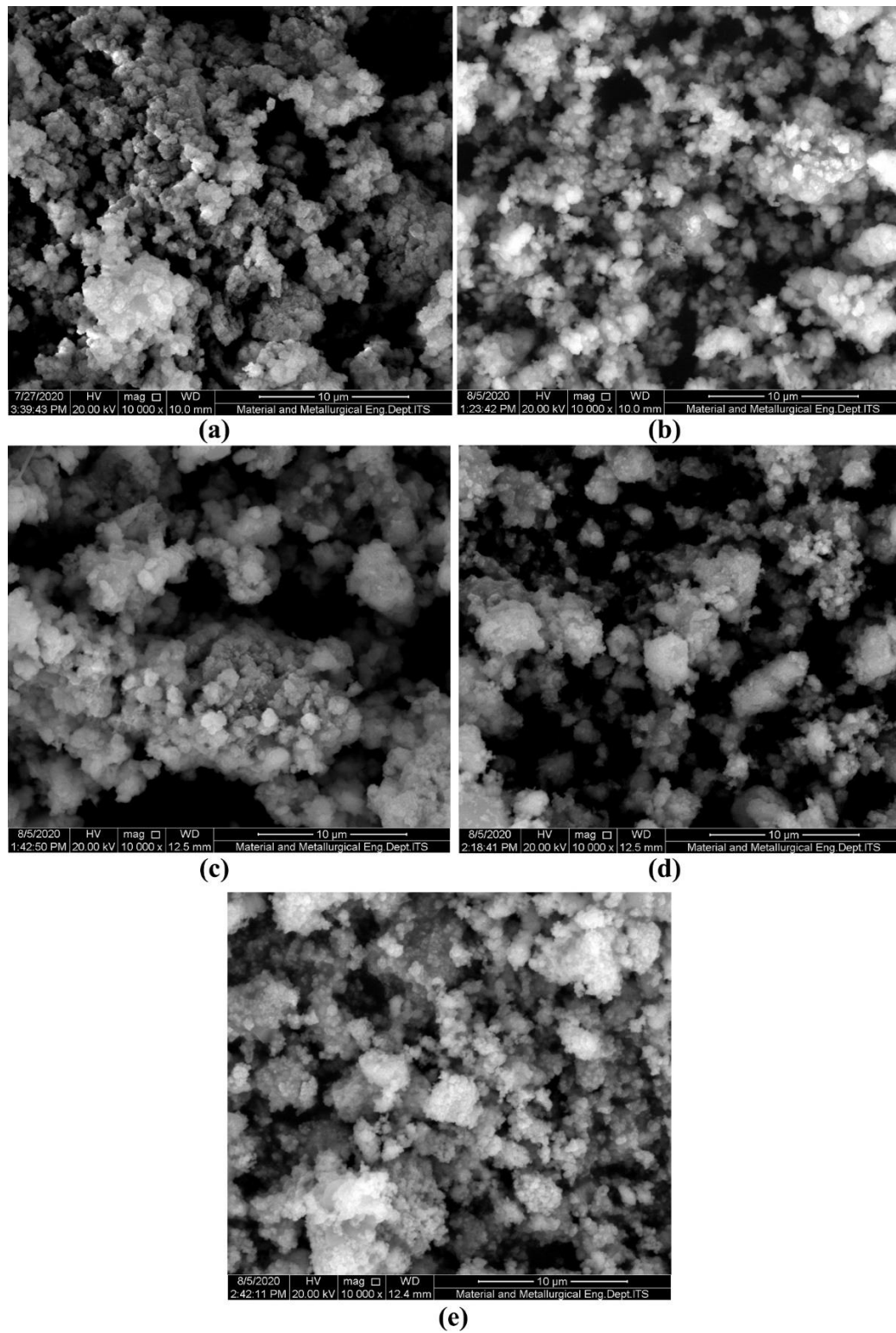
Hasil pengujian SEM menunjukkan morfologi nanopartikel CuO dengan variasi doping 0, 8, 10, 12, dan 14 mol% pada perbesaran 10.000x dan 20.000x dengan energi sinar elektron sebesar 20 kV seperti pada Gambar 4.3. Dapat dilihat bahwa setiap sampel memiliki ukuran dan bentuk yang beragam. Hal ini disebabkan oleh pertumbuhan anisotropik kristal CuO monoklinik yang terdiri dari ion O^{2-} dan Cu^{2+} yang tersusun secara bergantian sepanjang arah tertentu (Yathisha & Nayaka, 2017). Selain itu, terdapat pula aglomerasi, atau penggumpalan partikel, pada setiap sampel. Hal ini dikarenakan NaOH, sebagai elektrolit yang kuat, menetralkan muatan permukaan CuO dan menyebabkan terbentuknya agregat (Yathisha & Nayaka, 2017). Agregat akan menyebabkan luas permukaan yang lebih kecil, sehingga penyerapan pewarna pada CuO menjadi tidak maksimum, dan akan berpengaruh pada kemampuan pewarna dalam mengabsorpsi foton.

Berdasarkan hasil SEM, diameter partikel dapat diukur dengan menggunakan *software* ImageJ dan didapatkan hasil sebagai berikut:

Tabel 4.3 Ukuran partikel CuO murni dan CuO doping Zn

Sampel	Minimum (nm)	Maksimum (nm)	Rata-rata (nm)
CuO	174,93	1002,87	373,36
8%Zn-CuO	229,05	2429,43	637,92
10%Zn-CuO	184,17	1750,23	726,89
12%Zn-CuO	251,21	2869,71	888,69
14%Zn-CuO	191,31	2850,77	896,52

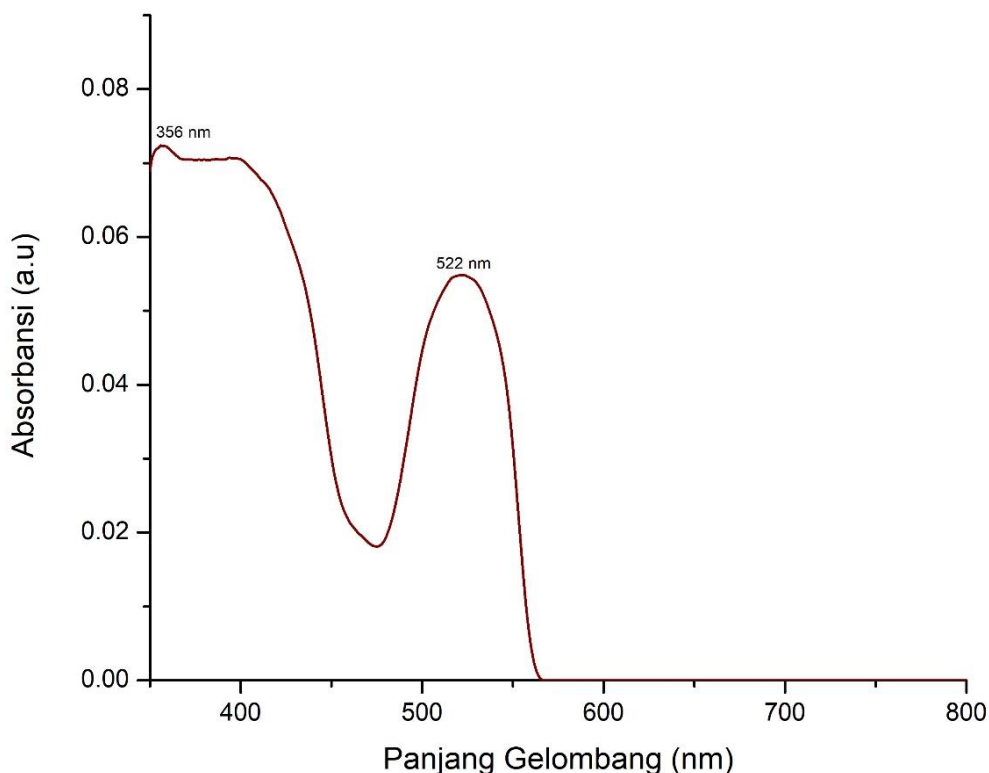
Pada umumnya, penambahan doping Zn tidak banyak berpengaruh terhadap morfologi CuO, tetapi akan memengaruhi ukuran partikelnya (Yathisha & Nayaka, 2017). Seperti yang dapat dilihat pada Tabel 4.3, penambahan doping Zn akan meningkatkan ukuran partikel CuO sebanyak 140,12%. Perbedaan ukuran partikel yang terjadi dapat diakibatkan oleh kelainan struktur molekul dan *micro-strain*, yang menyebabkan terjadinya perbedaan radius ionik atau klastering dari struktur nano (Jayaprakash, Srinivasan, Chandrasekaran, & Girija, 2014).



Gambar 4.3 Hasil SEM dari (a) CuO (b) 8%Zn-CuO (c) 10%Zn-CuO (d) 12%Zn-CuO dan (e) 14%Zn-CuO

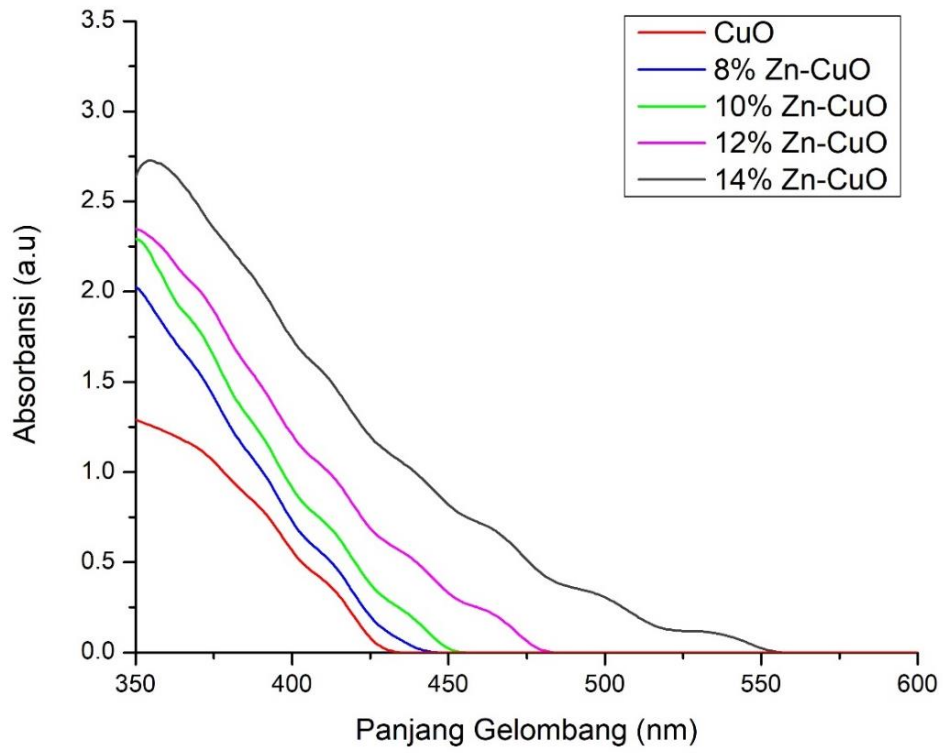
4.2 Hasil Karakterisasi UV-Vis

Pengujian UV-Vis dilakukan untuk mengetahui spektrum absorbansi pada pewarna N-719 dan nanopartikel CuO dan CuO doping Zn. Pewarna N-719 memiliki warna merah marun, atau merah *wine*, dan memiliki dua puncak absorpsi seperti pada Gambar 4.4, yaitu pada panjang gelombang 356 dan 522 nm.

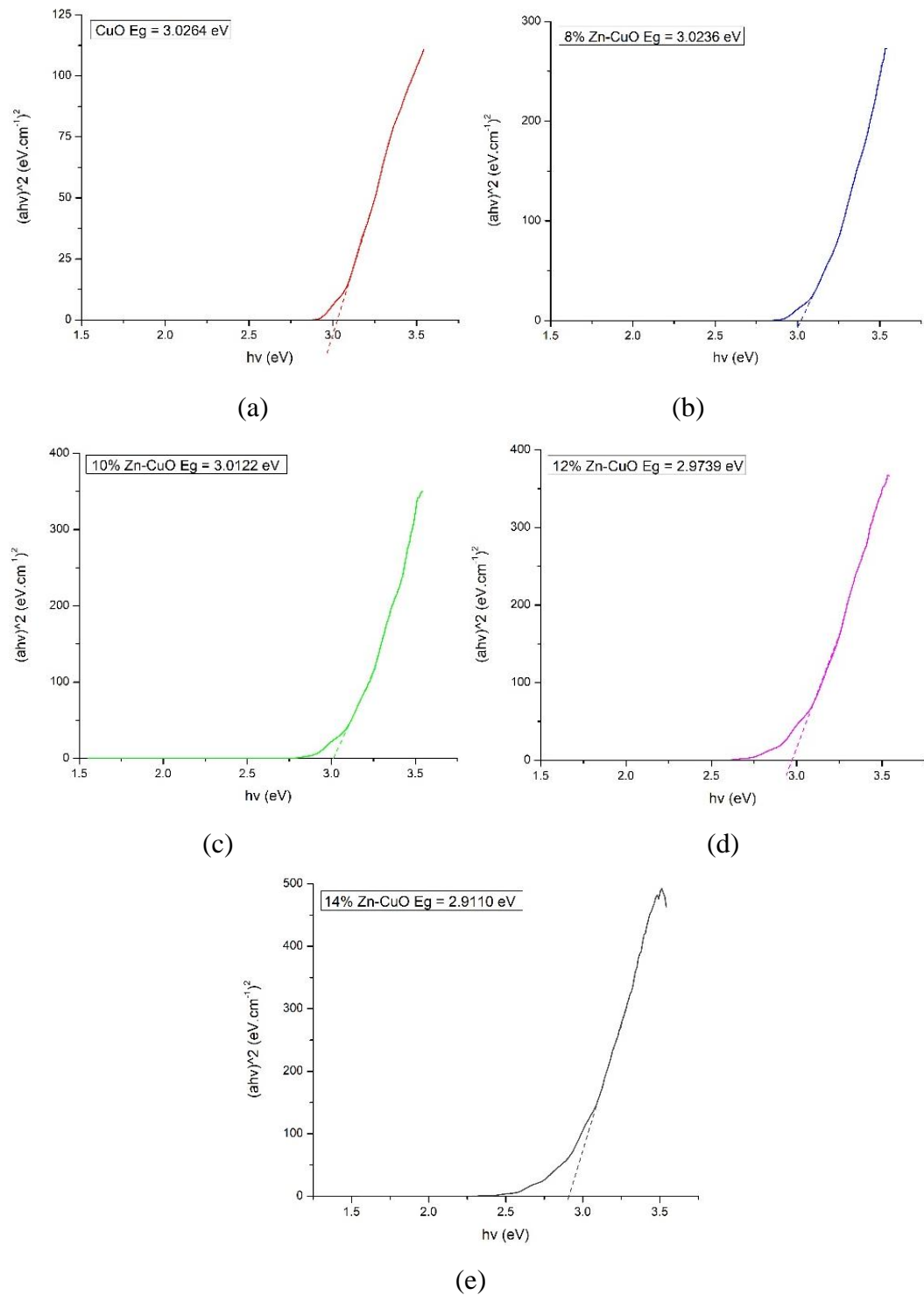


Gambar 4.4 Spektrum absorbansi UV-Vis pewarna N-719

Gambar 4.5 menunjukkan spektrum absorbansi nanopartikel CuO dan CuO doping Zn pada rentang panjang gelombang 350-800 nm. Terlihat pada grafik tersebut bahwa CuO memiliki tingkat absorbansi terendah dengan rentang panjang gelombang tersempit, yaitu 350-450 nm. Tingkat absorbansi tertinggi adalah 14%Zn-CuO dengan rentang panjang gelombang terlebar, yaitu 350-550 nm. Doping Zn menyebabkan terjadinya *red shift*, atau perubahan absorbansi ke panjang gelombang yang lebih tinggi, dan juga pelebaran pada puncak absorpsi ke arah cahaya tampak. Hasil pengujian UV-Vis dapat digunakan untuk mengetahui celah pita energi dengan menggunakan plot Tauc seperti pada Gambar 4.6 dengan menggunakan persamaan (3.6) dan (3.7).



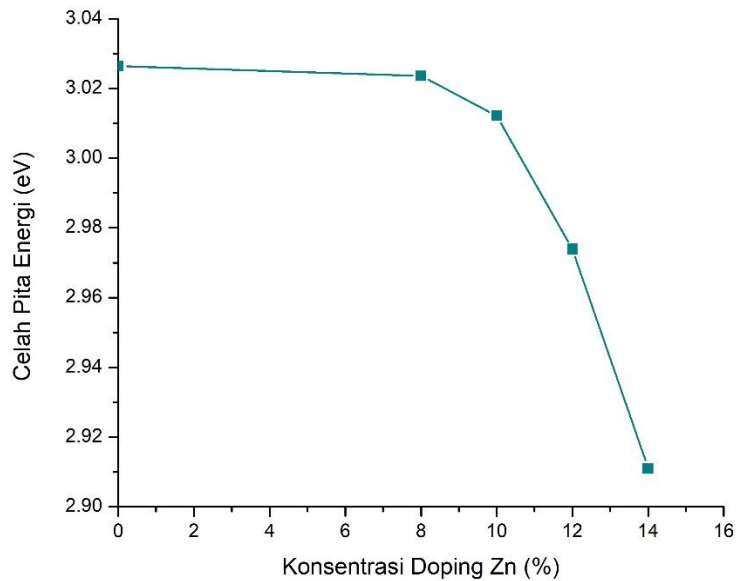
Gambar 4.5 Perbandingan spektrum absorbansi UV-Vis CuO dan CuO doping Zn



Gambar 4.6 Spektrum celah pita energi (a) CuO (b) 8%Zn-CuO (c) 10%Zn-CuO (d) 12%Zn-CuO (e) 14%Zn-CuO

Berdasarkan plot Tauc, didapatkan celah pita energi CuO dan CuO doping Zn berkisar pada 2,9-3,02 eV, dimana celah pita energi terlebar dimiliki oleh CuO dan

celah pita energi tersempit dimiliki oleh 14%Zn-CuO. Perbandingan celah pita energi terhadap perbedaan konsentrasi dapat dilihat pada Gambar 4.7.



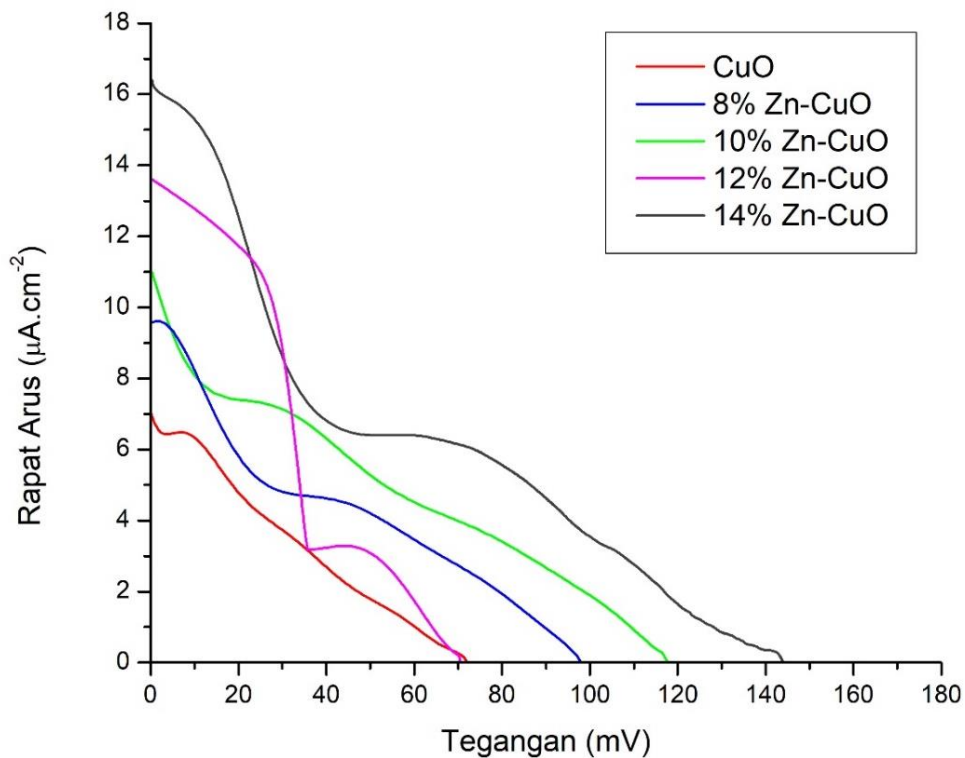
Gambar 4.7 Pengaruh konsentrasi Zn terhadap celah pita energi CuO

Berdasarkan Gambar 4.7, peningkatan konsentrasi Zn akan memperkecil celah pita energi CuO. Pada penelitian ini, didapatkan bahwa doping Zn akan menurunkan celah pita energi CuO sebesar 3,817%. Berdasarkan penelitian sebelumnya (Yathisha & Nayaka, 2017), celah pita energi berbanding terbalik dengan ukuran kristal dan juga ukuran partikel, sehingga celah pita energi pada penelitian ini menyempit dikarenakan ukuran kristal dan partikel CuO yang membesar seiring dengan peningkatan konsentrasi doping Zn. Celah pita energi akan memengaruhi performansi DSSC, dimana celah pita energi yang sempit akan menyebabkan arus *short circuit* yang tinggi, dikarenakan banyaknya elektron yang dihasilkan.

4.3 Hasil Uji I-V

Pengukuran tegangan dan arus dilakukan untuk mengetahui performansi DSSC. Tegangan dan arus yang didapatkan kemudian diolah menjadi grafik rapat arus terhadap tegangan seperti pada Gambar 4.8. Hasil grafik tersebut tidaklah ideal. Hal tersebut dikarenakan adanya resistansi seri dan paralel dalam DSSC. Resistansi paralel diduga karena adanya rekombinasi elektron, sedangkan resistansi seri dikarenakan resistansi kaca TCO dan elektrolit (Huang, et al., 2009). Ketika

resistansi serinya terlalu besar, arus *short circuit* (I_{SC}) akan mengecil dan ketika resistansi paralelnya terlalu kecil, tegangan *open circuit* (V_{OC}) akan mengecil. Terlihat bahwa kurva J-V memiliki dua puncak seperti huruf S, hal tersebut dapat dikarenakan pengaruh kecepatan rekombinasi permukaan, dimana semakin lambat rekombinasi yang terjadi, bentuk S akan semakin jelas dan akan memengaruhi efisiensi DSSC (Wagenpfahl, Rauh, Binder, Deibel, & Dyakonov, 2010).



Gambar 4.8 Perbandingan kurva J-V CuO dan CuO doping Zn

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, maka performansi DSSC dalam bentuk efisiensi dapat dihitung menggunakan persamaan (2.10), sehingga didapatkan hasil sebagai berikut:

Tabel 4.4 Performansi DSSC dengan CuO doping Zn sebagai fotokatoda

Sampel	V _{oc} (mV)	J _{sc} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	P _{max} (nW)	P _{sun} (mW/cm ²)	FF	η (%)
CuO	72,1	7,2	30,49	74,87	0,2349	0,000163
8%Zn-CuO	98	9,6	55,26	78,62	0,2349	0,000281
10%Zn-CuO	117,7	10,8	72,84	75,38	0,2292	0,000387
12%Zn-CuO	70,6	13,6	76,52	78,31	0,3188	0,000391
14%Zn-CuO	144	16,1	117,15	79,05	0,2504	0,000748

Dapat terlihat jelas dari Tabel 4.4 di atas bahwa terjadi kenaikan efisiensi seiring dengan kenaikan konsentrasi Zn. Kenaikan efisiensi yang terjadi akibat doping Zn adalah sebesar 358,9%. Efisiensi yang tinggi dikarenakan nilai V_{oc} dan J_{sc} yang tinggi pula. Peningkatan nilai V_{oc}, kecuali pada doping 12%, dikarenakan energi fermi pada CuO mendekati ke pita valensi, sehingga jarak antara energi fermi CuO dengan potensial redoks elektrolit semakin besar. Nilai J_{sc} semakin besar pula dikarenakan terjadinya penyempitan celah pita energi CuO. Nilai P_{sun} tidak sama dikarenakan iradiansi matahari yang tidak sama persis setiap harinya dan yang cenderung berkurang seiring dengan bertambah siang hari. Nilai P_{sun} akan memengaruhi efisiensi DSSC sesuai dengan persamaan (2.10), dimana P_{sun} yang kecil akan menyebabkan efisiensi yang besar dan begitu pula sebaliknya. Sedangkan untuk pengambilan data I-V dalam kondisi gelap, tidak ada arus yang dihasilkan. *Dark current* berasal dari fluktuasi termal, dikarenakan fluktuasi termal memiliki energi yang cukup untuk menghasilkan elektron dengan cara yang sama seperti dilakukan foton (Anonim, 2017). Elektron yang dihasilkan dari fluktuasi termal merupakan gangguan yang tidak diinginkan, sehingga ketika tidak ada arus pada pengujian I-V kondisi gelap, dapat disimpulkan bahwa CuO murni dan CuO doping Zn yang telah disintesis sudah baik.

Selain dengan pengujian I-V, performansi DSSC juga dapat diketahui melalui pengujian IPCE (*Incident Photon to Current Conversion Efficiency*), yaitu pengujian yang mengukur seberapa efektif DSSC dalam mengkonversi foton

menjadi arus berdasarkan tiap panjang gelombang. Akan tetapi, pada penelitian ini, uji IPCE tidak dapat dilakukan dikarenakan arus yang dihasilkan sangat kecil, menyebabkan multimeter tidak dapat membaca keluaran.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, kesimpulan yang dapat diambil adalah sebagai berikut:

- CuO doping Zn telah berhasil disintesis dengan metode *facile chemical*, yaitu dengan prekursor $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ dan ZnCl_2 .
- Doping Zn menyebabkan terjadinya peningkatan ukuran kristal CuO sebesar 48,1%, peningkatan ukuran partikel sebesar 140,12%, *red shift* pada spektrum absorbansi, dan penyempitan celah pita energi CuO sebanyak 3,817% seiring dengan bertambahnya konsentrasi Zn.
- Terjadi peningkatan efisiensi DSSC sebesar 358,9% dengan bertambahnya konsentrasi doping Zn pada CuO.

5.2 Saran

Saran penulis untuk penelitian berikutnya, yaitu:

- Menggunakan elektrolit dan/atau pewarna yang berbeda agar dapat dilakukan perbandingan hasil.
- Pengambilan data I-V dilakukan dengan solar simulator agar hasil lebih baik.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Akhtar, K., Khan, S. A., Khan, S. B., & Asiri, A. M. (2018). Scanning Electron Microscopy: Principle and Applications in Nanomaterials Characterization. In S. K. Sharma (Ed.), *Handbook of Materials Characterization* (pp. 113-146). Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG.
- Anonim. (2017, Mei 25). *What is Spectrometer Dark Current?* Dipetik Juli 15, 2020, dari StellarNet: <https://www.stellarnet.us/what-is-spectrometer-dark-current/>
- Benazzi, E., Mallows, J., Summers, G. H., Black, F. A., & Gibson, E. A. (2019). Developing Photocathode Materials for p-type Dye-Sensitized Solar cells. *Journal of Materials Chemistry C*, 7(34), 10409-10445. doi:10.1039/C9TC01822K
- Callister, Jr., W. D., & Rethwisch, D. G. (2014). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (9 ed.). Hoboken, New Jersey, United States of America: Wiley.
- Cudenec, Y., & Lecerf, A. (2003). The transformation of Cu(OH)₂ into CuO, revisited. *Solid State Sciences*, 5(11), 1471-1474. doi:10.1016/j.solidstatesciences.2003.09.009
- Gong, J., Sumathy, K., Qiao, Q., & Zhou, Z. (2017). Review on dye-sensitized solar cells (DSSCs): Advanced techniques and research trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 234-246. doi:10.1016/j.rser.2016.09.097
- Goyal, C. P., Goyal, D., Rajan, S. K., Ramgir, N. S., Shimura, Y., Navaneethan, M., . . . Ponnusamy, S. (2020). Effect of Zn Doping in CuO Octahedral Crystals towards Structural, Optical, and Gas Sensing Properties. *Crystals*, 10(188), 1-16. doi:10.3390/cryst10030188
- Honsberg, C., & Bowden, S. (2019). *Solar Cell Efficiency*. Dipetik Juli 12, 2020, dari PVEducation: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/solar-cell-efficiency>
- Huang, Y., Dai, S., Chen, S., Zhang, C., Sui, Y., Xiao, S., & Hu, L. (2009). Theoretical modeling of the series resistance effect on dye-sensitized solar

- cell performance. *Applied Physics Letters*, 95(243503), 1-3.
doi:10.1063/1.3270532
- International Renewable Energy Agency. (2012). Solar Photovoltaics. In *RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGIES: COST ANALYSIS SERIES* (Vol. 1). IRENA.
- Iqbal, J., Jan, T., Ul-Hassan, S., Ahmed, I., Mansoor, Q., Ali, M. U., . . . Ismail, M. (2015). Facile synthesis of Zn doped CuO hierarchical nanostructures: Structural, optical and antibacterial properties. *AIP Advances*, 5(127112), 1-8. doi:10.1063/1.4937907
- Jayaprakash, J., Srinivasan, N., Chandrasekaran, P., & Girija, E. K. (2014). Synthesis and characterization of cluster of grapes like pure and Zinc-doped CuO nanoparticles by sol-gel method. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 136, 1803-1806. doi:10.1016/j.saa.2014.10.087
- Jiang, T., Bujoli-Doeuff, M., Farré, Y., Pellegrin, Y., Gautron, E., Boujtita, M., . . . Odobel, F. (2016). CuO nanomaterials for p-type dye-sensitized solar cells. *Royal Society of Chemistry Advances*, 6(114), 112765-112770. doi:10.1039/C6RA17879K
- Kalowekamo, J., & Baker, E. (2009). Estimating the manufacturing cost of purely organic solar cells. *Solar Energy*, 83(8), 1224-1231. doi:10.1016/j.solener.2009.02.003
- Kumar, P., Sharma, A., & Dahiya, S. (2017). Structural and Optical Study of Zn doped CuO Nano Particles Synthesized by Sol Gel Method. *International Journal of Theoretical & Applied Sciences*, 9(2), 114-118.
- Li, L., Yang, Y., Fan, R., Jiang, Y., Wei, L., Shi, Y., . . . Cao, W. (2014). A simple modification of near-infrared photon-to-electron response with fluorescence resonance energy transfer for dye-sensitized solar cells. *Journal of Power Sources*, 264, 254-261. doi:10.1016/j.jpowsour.2014.04.100
- Mokobi, F. (2020, Maret 8). *Scanning Electron Microscope (SEM)*. Dipetik Juli 13, 2020, dari Microbe Notes: <https://microbenotes.com/scanning-electron-microscope-sem/#scanning-electron-microscope-sem-definition>

- Nesa, M., Momin, M. A., Sharmin, M., & Bhuiyan, A. H. (2020). Structural, optical and electronic properties of CuO and Zn doped CuO: DFT based First-principles calculations. *Chemical Physics*, 528, 1-5. doi:10.1016/j.chemphys.2019.110536
- Odobel, F., Pellegrin, Y., Gibson, E. A., Hagfeldt, A., Smeigh, A. L., & Hammarström, L. (2012). Recent advances and future directions to optimize the performances of p-type dye-sensitized solar cells. *Coordination Chemistry Reviews*, 256, 2414-2423. doi:10.1016/j.ccr.2012.04.017
- Prabhin, V. S., Jeyasubramanian, K., Romulus, N. R., & Singh, N. N. (2017). Fabrication of dye sensitized solar cell using chemically tuned CuO nanoparticles prepared by sol-gel method. *Archives of Materials Science and Engineering*, 83(1), 5-9.
- Qin, P. (2010). *The Study of Organic Dyes for p-Type DyeSensitized Solar Cells*. KTH Royal Institute of Technology, Chemical Science and Engineering. Stockholm: TRITA-CHE-Report.
- Rawal, N., Vaishaly, A. G., Sharma, H., & Mathew, B. B. (2015). Dye Sensitized Solar Cells: The Emerging Technology. *Energy and Power Engineering Science*, 2(2), 46-52. doi:10.12966/epes.05.03.2015
- Sharafeldin, M. O. (2019). *Synthesis and characterization of Zinc (Zn) doped by Copper Oxide (CuO) nanoparticles and it's Applications in Dye Sensitized Solar Cells (DSSCs)*. M.Sc Thesis, Al-Neelain University, Department of Physics, Khartoum.
- Sonia, S., Annsi, I. J., Kumar, P. S., Mangalaraj, D., Viswanathan, C., & Ponpandian, N. (2015). Hydrothermal synthesis of novel Zn doped CuO nanoflowers as an efficient photodegradation material for textile dyes. *Materials Letters*, 144, 127-130. doi:10.1016/j.matlet.2015.01.026
- Sumikura, S., Mori, S., Shimizu, S., Usami, H., & Suzuki, E. (2008). Photoelectrochemical characteristics of cells with dyed and undyed nanoporous p-type semiconductor CuO electrodes. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 194, 143-147. doi:10.1016/j.jphotochem.2007.07.035

- Tran, T. H., & Nguyen, V. T. (2014). Copper Oxide Nanomaterials Prepared by Solution Methods, Some Properties, and Potential Applications: A Brief Review. *International Scholarly Research Notices*, 2014, 1-14. doi:10.1155/2014/856592
- Wagenfahl, A., Rauh, D., Binder, M., Deibel, C., & Dyakonov, V. (2010). S-shaped current-voltage characteristics of organic solar devices. *Physical Review B*, 82, 1-8. doi:10.1103/PhysRevB.82.115306
- Yathisha, R. O., & Nayaka, Y. A. (2017). Structural, optical and electrical properties of zinc incorporated copper oxide nanoparticles: doping effect of Zn. *J. Mater. Sci.*, 53(1), 678-691. doi:10.1007/s10853-017-1496-5

LAMPIRAN

LAMPIRAN A. Hasil Uji XRD

Tabel A.1 Daftar puncak CuO murni

Pos. [$^{\circ}$ 2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [$^{\circ}$ 2Th.]	d-spacing [\AA]	Rel. Int. [%]
16,0372	949,22	0,184	5,52664	100
17,5482	192,72	0,1338	5,05404	20,3
22,5441	26,26	0,2676	3,94406	2,77
25,9342	66,01	0,4015	3,43568	6,95
27,6066	40,8	0,2676	3,23123	4,3
29,4462	27,85	0,4015	3,03342	2,93
31,3335	291,33	0,3346	2,85488	30,69
32,2351	777,68	0,368	2,77706	81,93
34,4295	45,5	0,1004	2,60492	4,79
35,4755	289,27	0,2676	2,53048	30,47
38,5473	260,87	0,1338	2,3356	27,48
39,5199	634,99	0,3346	2,28034	66,9
42,3253	33,27	0,4015	2,13546	3,51
45,3328	74,92	0,1004	2,00054	7,89
48,6806	46,89	0,2676	1,8705	4,94
49,9109	136,36	0,4015	1,82724	14,37
53,5522	108,37	0,4015	1,71127	11,42
57,1989	40,52	0,4015	1,61054	4,27
61,5072	74,65	0,2676	1,50766	7,86
65,8924	38,49	0,8029	1,41755	4,05
68,2737	70,05	0,4684	1,3738	7,38
75,2369	42,73	0,5353	1,263	4,5
82,4542	14,63	0,8029	1,16978	1,54

Tabel A.2 Daftar puncak 8% Zn-CuO

Pos. [$^{\circ}$ 2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [$^{\circ}$ 2Th.]	d-spacing [\AA]	Rel. Int. [%]
16,0618	1457,27	0,1338	5,51823	100
18,7138	100,05	0,3346	4,74178	6,87
25,8663	59,55	0,3346	3,44454	4,09
27,2234	43,14	0,2007	3,27584	2,96
30,7521	177,65	0,3346	2,90752	12,19

Pos. [$^{\circ}2\theta$.]	Height [cts]	FWHM Left [$^{\circ}2\theta$.]	d-spacing [\AA]	Rel. Int. [%]
31,5739	469,65	0,0836	2,83369	32,23
32,182	947,81	0,1171	2,78152	65,04
35,4554	325,38	0,2175	2,53187	22,33
38,622	402,29	0,2676	2,33126	27,61
39,5482	688,95	0,2448	2,27689	47,28
39,7022	650,6	0,1224	2,27404	44,64
44,1022	43,21	0,408	2,05176	2,96
45,3319	141,08	0,204	1,99892	9,68
47,5498	36,15	0,4896	1,91073	2,48
48,6692	91,66	0,2448	1,86936	6,29
49,944	160,19	0,4896	1,82459	10,99
53,3784	178,36	0,2448	1,71501	12,24
56,4189	49,48	0,3264	1,62958	3,4
58,2431	38	0,3264	1,58282	2,61
61,5304	106,11	0,3264	1,5059	7,28
66,1082	68,11	0,2448	1,41228	4,67
67,7717	91,25	0,408	1,3816	6,26
72,2813	19,86	0,9792	1,3061	1,36
74,8843	34,47	0,9792	1,26702	2,37

Tabel A.3 Daftar puncak 10% Zn-CuO

Pos. [$^{\circ}2\theta$.]	Height [cts]	FWHM Left [$^{\circ}2\theta$.]	d-spacing [\AA]	Rel. Int. [%]
16,0346	752,24	0,1171	5,52754	100
17,4551	197,55	0,1673	5,08078	26,26
18,8522	40,27	0,5353	4,70728	5,35
25,9589	27,11	0,5353	3,43246	3,6
30,1601	49,71	0,2342	2,96323	6,61
31,5924	374,54	0,1338	2,83207	49,79
32,2025	732,43	0,2007	2,7798	97,37
35,5115	419,57	0,1338	2,528	55,78
38,5687	374,52	0,2007	2,33436	49,79
39,5739	539,06	0,2676	2,27735	71,66
41,4974	46,25	0,2007	2,17613	6,15
44,1756	36,21	0,2676	2,05022	4,81
45,3602	145,57	0,2342	1,99939	19,35
48,6239	75,59	0,2007	1,87255	10,05
49,9285	121,54	0,3346	1,82664	16,16
53,3592	147,23	0,6022	1,717	19,57

Pos. [$^{\circ}$ 2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [$^{\circ}$ 2Th.]	d-spacing [\AA]	Rel. Int. [%]
56,3576	56,19	0,2007	1,63256	7,47
58,3206	25,7	0,8029	1,58221	3,42
61,4772	100,5	0,2007	1,50832	13,36
62,9769	24,78	0,4015	1,47597	3,29
66,1422	58,86	0,8029	1,4128	7,82
67,7287	76,29	0,8029	1,38352	10,14
72,165	10,71	0,8029	1,309	1,42
75,2034	50,11	0,2676	1,26348	6,66

Tabel A.4 Daftar puncak 12%Zn-CuO

Pos. [$^{\circ}$ 2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [$^{\circ}$ 2Th.]	d-spacing [\AA]	Rel. Int. [%]
16,0272	1203,82	0,2007	5,53008	100
17,4264	274,19	0,0669	5,08907	22,78
25,1554	29,78	0,1171	3,54025	2,47
25,9395	46,42	0,4015	3,43498	3,86
30,1967	89,15	0,2676	2,95972	7,41
31,534	566,88	0,0669	2,83719	47,09
32,1976	863,58	0,2676	2,78021	71,74
35,3373	464,65	0,1004	2,54005	38,6
38,5648	425,62	0,2342	2,33459	35,36
39,5607	615,78	0,2342	2,27808	51,15
41,4416	72,33	0,1673	2,17893	6,01
45,2998	155,61	0,0836	2,00192	12,93
46,8041	31,98	0,4015	1,94102	2,66
48,5815	89,9	0,3346	1,87408	7,47
49,8358	135,37	0,3346	1,82982	11,25
53,4529	142,32	0,5353	1,71422	11,82
56,3829	70,08	0,2676	1,63189	5,82
58,0759	38,12	0,4015	1,58829	3,17
61,4404	100,25	0,2676	1,50914	8,33
65,6794	101,63	0,1004	1,42163	8,44
67,5187	76,42	0,3346	1,38731	6,35
72,1319	20,96	0,8029	1,30952	1,74
75,1277	70,39	0,2007	1,26457	5,85

Tabel A.5 Daftar puncak 14%Zn-CuO

Pos. [$^{\circ}$ 2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [$^{\circ}$ 2Th.]	d-spacing [\AA]	Rel. Int. [%]
16,0695	1467,22	0,1171	5,51562	100
17,4073	158,03	0,2676	5,09461	10,77
18,788	97,77	0,2676	4,72322	6,66
19,4759	41,01	0,2676	4,55793	2,8
25,8697	50,33	0,2007	3,4441	3,43
30,6909	197,73	0,1673	2,91318	13,48
32,2407	916,8	0,2676	2,77659	62,49
35,4138	336,11	0,0836	2,53474	22,91
38,5778	353,92	0,2007	2,33383	24,12
39,5893	616,18	0,2342	2,2765	42
44,3826	34,3	0,6691	2,04113	2,34
45,3294	36,92	0,2007	2,00068	2,52
48,5979	61,22	0,2676	1,87349	4,17
49,8982	145,14	0,5353	1,82767	9,89
53,4699	155,93	0,3346	1,71371	10,63
56,2716	38,33	0,5353	1,63485	2,61
58,2055	24,86	0,3346	1,58506	1,69
61,3718	95,27	0,2676	1,51066	6,49
66,0349	54,89	0,2676	1,41484	3,74
67,8901	111,04	0,2676	1,38062	7,57
76,3886	18,34	0,6691	1,2468	1,25

LAMPIRAN B. JCPDS CuO dan Cu(OH)₂

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	-1	1	0	2.75300	32.497	8.0
2	-1	1	1	2.52700	35.496	100.0
3	0	0	2	2.52700	35.496	100.0
4	1	1	1	2.32300	38.731	91.0
5	2	0	0	2.31000	38.958	28.0
6	-1	1	2	1.96140	46.249	2.0
7	-2	0	2	1.86730	48.727	20.0
8	1	1	2	1.77690	51.381	1.0
9	0	2	0	1.71280	53.453	6.0
10	2	0	2	1.58050	58.337	9.0
11	-1	1	3	1.50560	61.535	15.0
12	0	2	2	1.41840	65.787	8.0
13	-3	1	1	1.40960	66.250	11.0
14	1	1	3	1.37850	67.945	9.0
15	-2	2	0	1.37590	68.091	11.0
16	3	1	1	1.30380	72.429	5.0
17	0	0	4	1.26490	75.032	5.0
18	-2	2	2	1.26210	75.227	6.0
19	-2	0	4	1.19610	80.183	2.0

Gambar B.1 JCPDS 00-045-0937

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	2	0	5.29650	16.725	80.6
2	0	2	1	3.73090	23.831	100.0
3	1	1	0	2.83930	31.483	4.6
4	0	0	2	2.62820	34.066	68.8
5	1	1	1	2.49810	35.920	35.7
6	0	4	1	2.36500	38.017	12.7
7	0	2	2	2.35430	38.196	19.5
8	1	3	0	2.26260	39.808	66.6
9	1	3	1	2.07820	43.512	8.4
10	1	1	2	1.92870	47.060	3.4
11	0	4	2	1.86550	48.777	0.1
12	0	6	0	1.76550	51.737	4.7
13	1	5	0	1.72020	53.205	18.8
14	1	3	2	1.71470	53.389	41.1
15	0	6	1	1.67360	54.808	3.7

16	0	2	3	1.66350	55.169	0.4
17	1	5	1	1.63490	56.219	13.2
18	1	1	3	1.49110	62.209	8.1
19	2	0	0	1.47360	63.032	7.6
20	0	6	2	1.46550	63.420	4.2
21	0	4	3	1.46130	63.624	3.4
22	1	5	2	1.43930	64.714	15.1
23	2	2	0	1.41960	65.724	2.7
24	1	3	3	1.38530	67.567	1.8
25	2	2	1	1.37050	68.396	6.0
26	1	7	0	1.34620	69.808	0.1
27	0	8	0	1.32410	71.148	3.9
28	0	0	4	1.31410	71.773	3.3
29	1	7	1	1.30410	72.410	4.8
30	2	0	2	1.28530	73.642	7.3
31	0	8	1	1.28530	73.642	7.3
32	0	2	4	1.27540	74.309	1.3
33	2	4	1	1.25070	76.034	2.8
34	2	2	2	1.24910	76.149	3.1
35	0	6	3	1.24360	76.546	1.3
36	1	5	3	1.22750	77.737	3.2

Gambar B.2 JCPDS 01-080-0656

LAMPIRAN C. Perhitungan Parameter Kristal

Tabel C.1 CuO murni

k	λ (nm)	2θ (°)	β (°)	D (nm)	ε ($\times 10^{-3}$)	δ ($\times 10^{15} \text{ m}^{-2}$)
0,89	0,15406	32,2351	0,368	22,22131	1,54259	2,02517
		35,4755	0,2676	30,82260	1,11212	1,05260
		38,5473	0,1338	62,20082	0,55109	0,25847
Rata-rata				38,4149	1,06860	1,11208

Tabel C.2 8%Zn-CuO

k	λ (nm)	2θ (°)	β (°)	D (nm)	ε ($\times 10^{-3}$)	δ ($\times 10^{15} \text{ m}^{-2}$)
0,89	0,15406	32,182	0,1171	69,82362	0,49093	0,20511
		35,4554	0,2175	37,92030	0,90396	0,69543
		38,622	0,2676	31,10751	1,10193	1,03340
Rata-rata				46,28381	0,83227	0,64465

Tabel C.3 10%Zn-CuO

k	λ (nm)	2θ (°)	β (°)	D (nm)	ε ($\times 10^{-3}$)	δ ($\times 10^{15} \text{ m}^{-2}$)
0,89	0,15406	32,2025	0,2007	40,74125	0,84137	0,60246
		35,5115	0,1338	61,65139	0,55600	0,26310
		38,5687	0,2007	41,46992	0,82658	0,58148
Rata-rata				47,95419	0,74132	0,48235

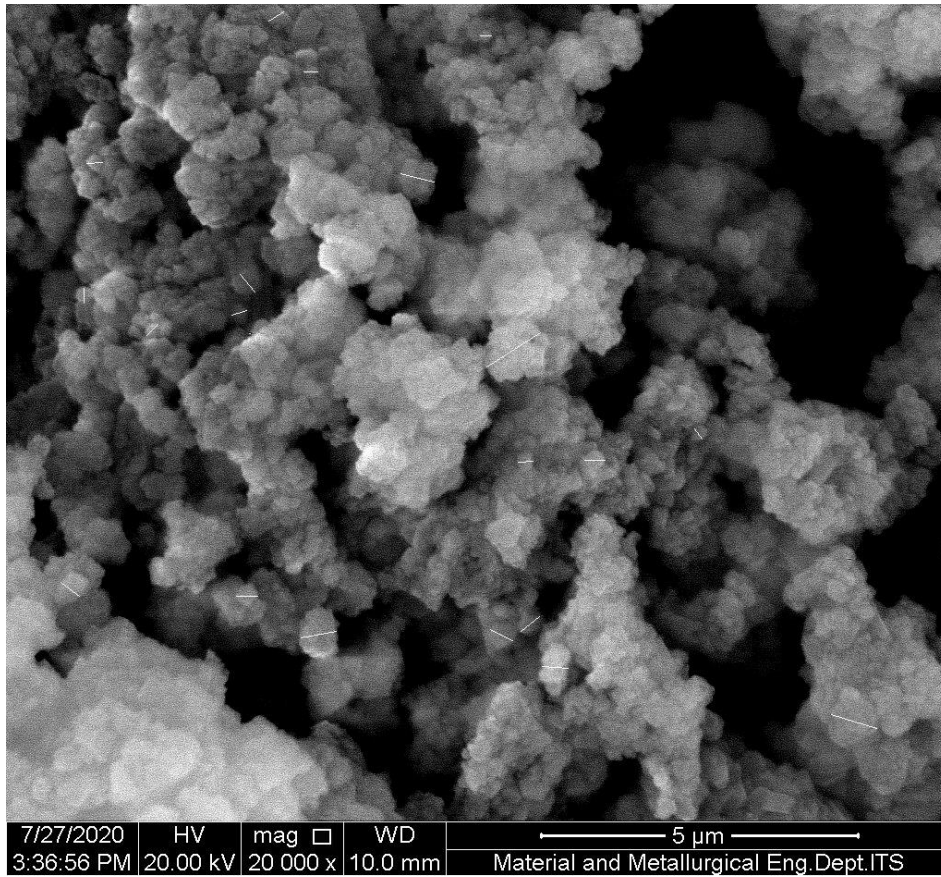
Tabel C.4 12%Zn-CuO

k	λ (nm)	2θ (°)	β (°)	D (nm)	ε ($\times 10^{-3}$)	δ ($\times 10^{15} \text{ m}^{-2}$)
0,89	0,15406	32,1976	0,2676	30,55556	1,12184	1,07107
		35,3373	0,1004	82,12104	0,41741	0,14828
		38,5648	0,2342	35,53764	0,96456	0,79181
Rata-rata				49,40475	0,834605	0,67039

Tabel C.5 14%Zn-CuO

k	λ (nm)	2θ (°)	β (°)	D (nm)	ε ($\times 10^{-3}$)	δ ($\times 10^{15} \text{ m}^{-2}$)
0,89	0,15406	32,2407	0,2676	30,55888	1,12171	1,07084
		35,4138	0,0836	98,64483	0,34749	0,10277
		38,5778	0,2007	41,47108	0,82656	0,58145
Rata-rata				56,8916	0,76526	0,585018

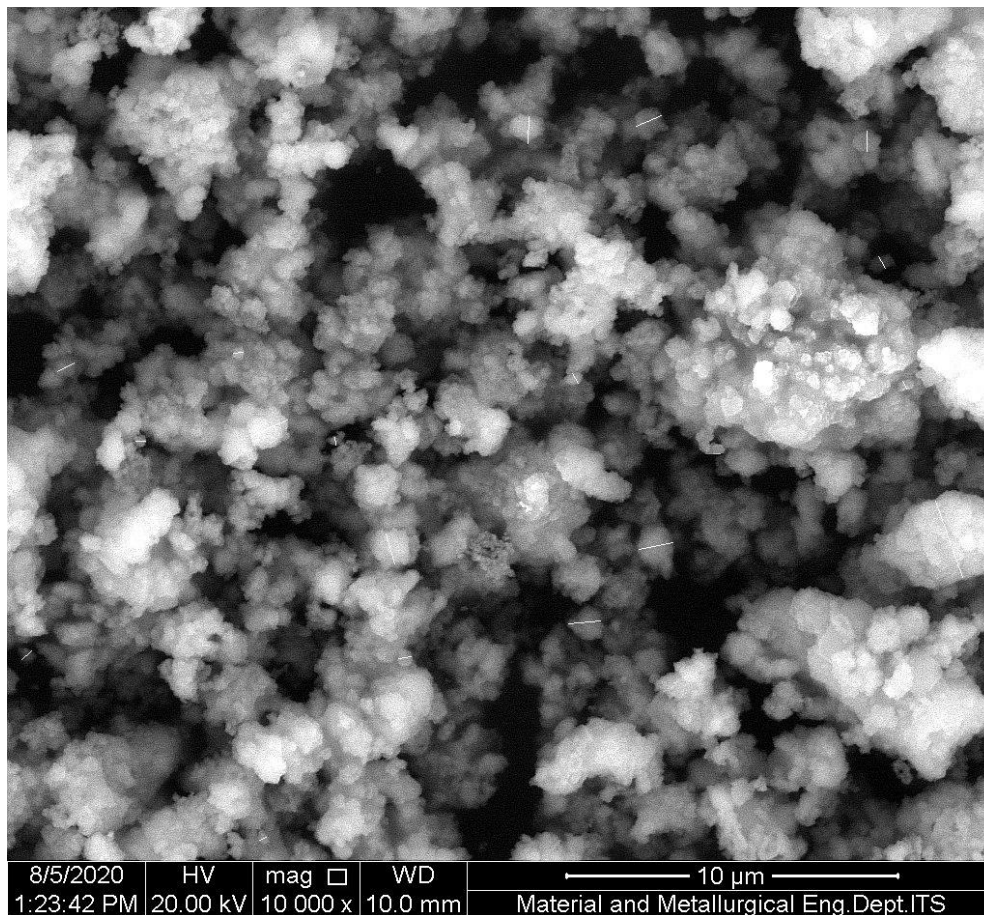
LAMPIRAN D. Perhitungan Ukuran Partikel dengan ImageJ



Gambar D.1 Perhitungan diameter partikel CuO murni

Tabel D.1 Ukuran partikel CuO murni

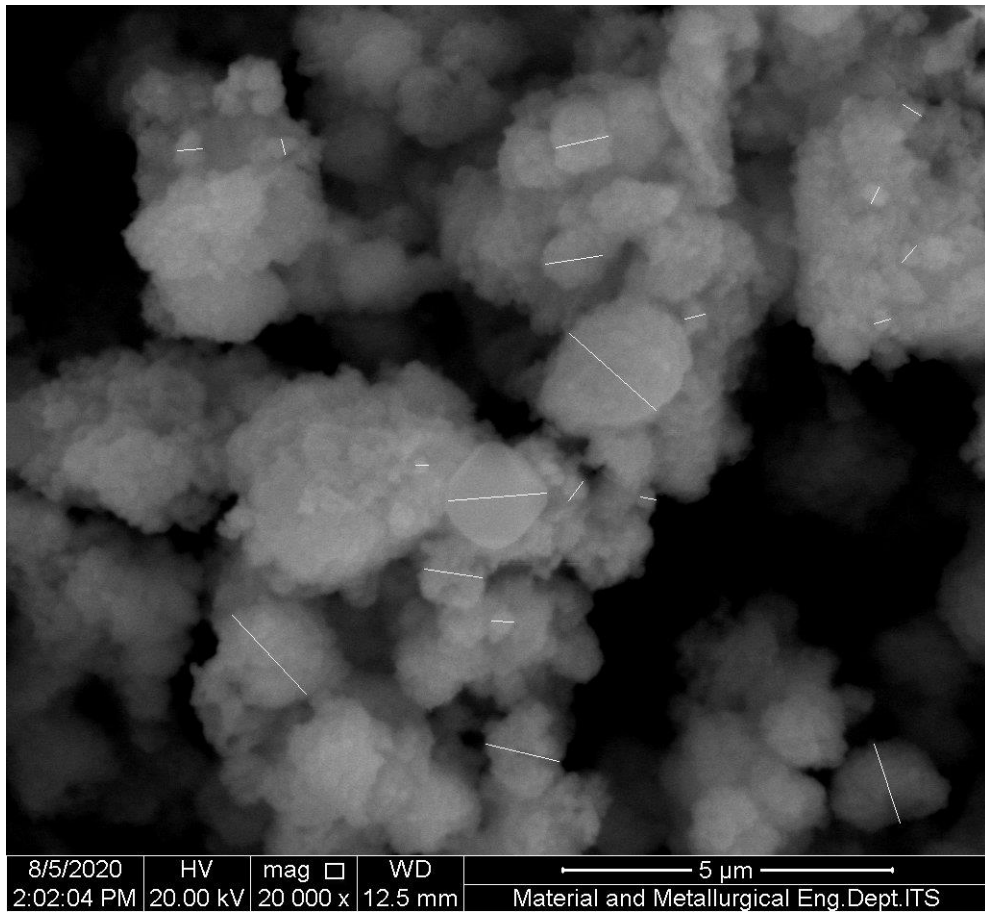
	Length (nm)		Length (nm)
1	279,176	13	408,749
2	564,622	14	744,904
3	391,149	15	532,12
4	383,606	16	325,559
5	340,171	17	191,487
6	208,941	18	226
7	253,419	19	174,927
8	241,248	20	1002,869
9	363,117	Mean	373,358
10	357,44	SD	205,156
11	243,973	Min	174,927
12	233,691	Max	1002,869



Gambar D.2 Perhitungan diameter partikel 8%Zn-CuO

Tabel D.2 Ukuran partikel 8%Zn-CuO

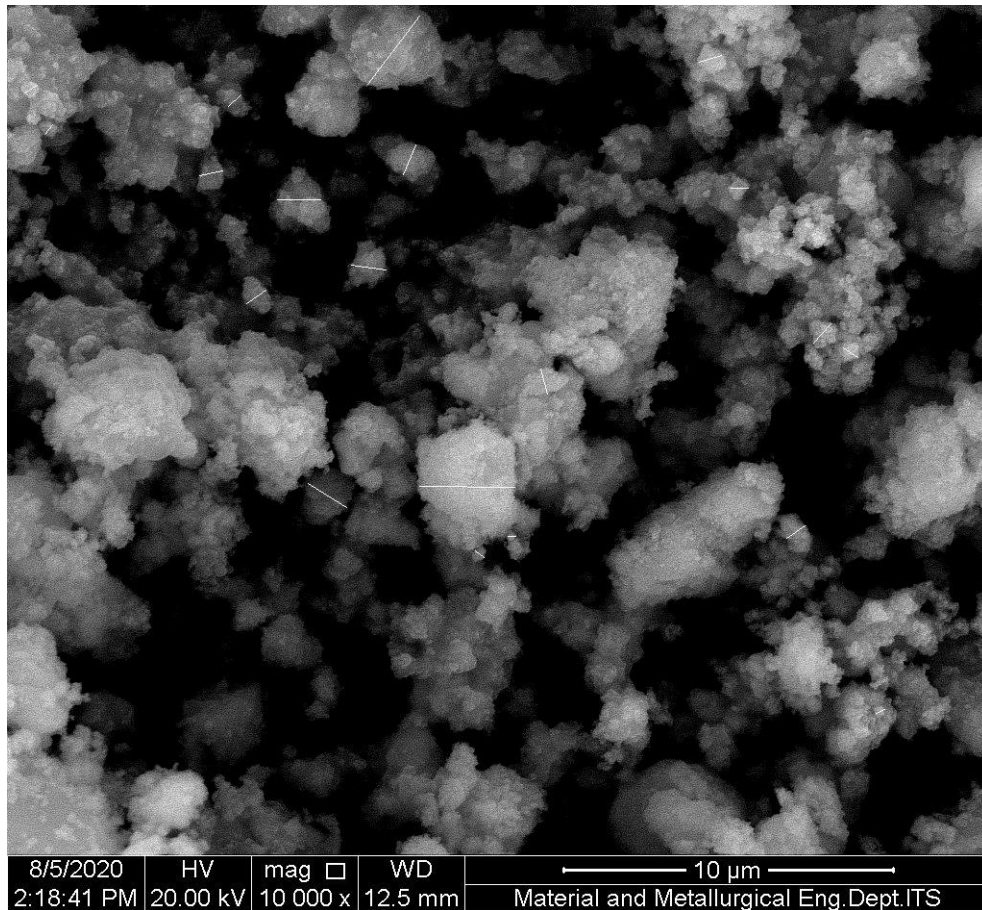
	Length (nm)		Length (nm)
1	812,758	13	374,365
2	562,133	14	314,613
3	297,896	15	260,164
4	608,696	16	275,458
5	395,575	17	2429,428
6	1032,732	18	935,653
7	940,38	19	1168,443
8	229,049	20	831,662
9	349,708	Mean	637,914
10	232,337	SD	518,374
11	403,851	Min	229,049
12	303,388	Max	2429,428



Gambar D.3 Perhitungan diameter partikel 10%Zn-CuO

Tabel D.3 Ukuran partikel 10%Zn-CuO

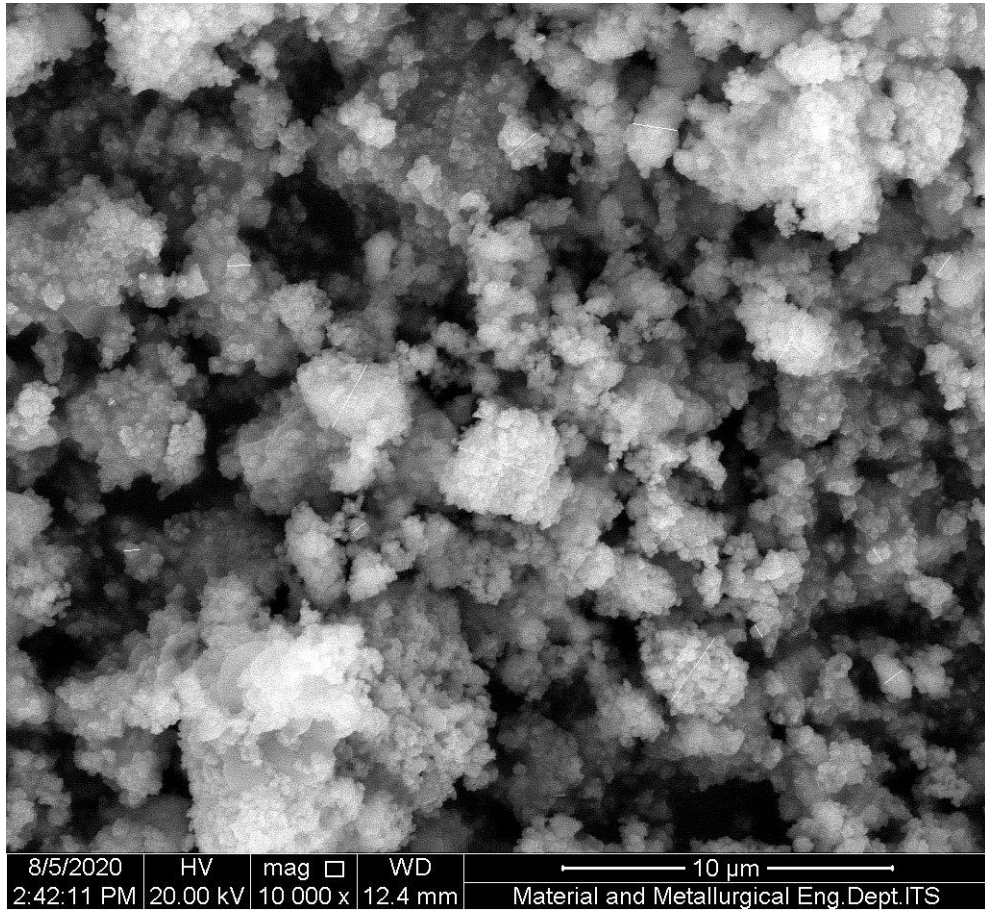
	Length (nm)		Length (nm)
1	1254,808	13	260,234
2	1486,561	14	329,529
3	1486,561	15	257,559
4	811,126	16	1750,232
5	307,951	17	1634,964
6	386,095	18	327,761
7	245,616	19	326,631
8	867,478	20	184,172
9	236,611	Mean	726,886
10	366,764	SD	544,139
11	1135,211	Min	184,172
12	881,849	Max	1750,232



Gambar D.4 Perhitungan diameter partikel 12%Zn-CuO

Tabel D.4 Ukuran partikel 12%Zn-CuO

	Length (nm)		Length (nm)
1	2869,712	13	723,368
2	2585,566	14	968,849
3	1067,851	15	371,196
4	759,853	16	780,459
5	712,687	17	514,532
6	328,538	18	1373,647
7	460,941	19	251,208
8	707,626	20	1314,01
9	659,221	Mean	888,685
10	522,097	SD	702,48
11	289,533	Min	251,208
12	512,806	Max	2869,712



Gambar D.5 Perhitungan diameter partikel 14% Zn-CuO

Tabel D.5 Ukuran partikel 14% Zn-CuO

	Length (nm)		Length (nm)
1	2850,766	13	247,652
2	2153,723	14	1331,091
3	202,956	15	191,31
4	681,314	16	1223,243
5	371,698	17	2303,436
6	412,025	18	751,701
7	668,122	19	1720,675
8	456,49	20	1042,852
9	443,511	Mean	896,524
10	195,786	SD	792,688
11	223,818	Min	191,31
12	458,301	Max	2850,766

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Chiara Arandani, lahir di Jakarta pada tanggal 27 Agustus 1998 dan merupakan anak bungsu dari 2 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan di SD Charitas, SMP Charitas, SMA Charitas, kemudian melanjutkan studinya ke Departemen Teknik Fisika ITS pada tahun 2016. Pada tahun 2020 penulis melaksanakan tugas akhir sebagai syarat menyelesaikan studi S1 dengan judul Pengaruh Doping Zn pada CuO Sebagai Fotokatoda *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC) Tipe P. Bagi pembaca yang memiliki saran, kritik, atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir ini, dapat menghubungi penulis melalui email chiaraarandani@gmail.com.