



TUGAS AKHIR - TF 181801

**FABRIKASI *DYE SENSITIZED SOLAR CELL* (DSSC) TIPE P
DENGAN FOTOKATODA Cu_2O NANOCUBE**

**RACHMA PUTRI ANGGRAINI
NRP. 02311640000102**

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

***FABRICATION OF P TYPE DYE SENSITIZED SOLAR CELL
(DSSC) WITH Cu_2O NANOCUBE PHOTOCATODES***

**RACHMA PUTRI ANGGRAINI
NRP. 02311640000102**

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

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

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama : Rachma Putri Anggraini
NRP : 02311640000102
Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FT-IRS)
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "**FABRIKASI DYE SENSITIZED SOLAR CELL (DSSC) TIPE P DENGAN FOTOKATODA $\text{Cu}_2\text{O NANOCUBE}$** " 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, 09 Agustus 2020

Yang membuat pernyataan,



Rachma Putri Anggraini

NRP. 02311640000102

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR


FABRIKASI *DYE SENSITIZED SOLAR CELLS* (DSSC) TIPE P
DENGAN FOTOKATODA Cu_2O NANOCUBE

Oleh:

Rachma Putri Anggraini
NRP. 02311640000102

Surabaya, 10 Agustus 2020

Menyetujui,
Pembimbing I


Dr.-Ing. Doty Dewi Risanti, S.T.,M.T.
NIP. 19740903 199802 2 001

Mengetahui,

Kepala Departemen

Teknik Fisika FTI RS-ITS


Dr. Suyanto, S.T., M.T.
NIP. 19711113 199512 1 002

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

FABRIKASI DYE SENSITIZED SOLAR CELLS (DSSC) TIPE P DENGAN FOTOKATODA Cu_2O NANOCUBE

TUGAS AKHIR


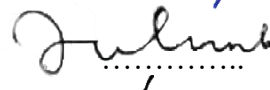


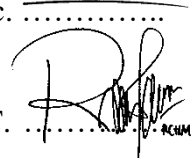
Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FT-IRS)
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

RACHMA PUTRI ANGGRAINI

NRP. 02311640000102

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

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

SURABAYA

2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

**FABRIKASI *DYE SENSITIZED SOLAR CELLS* (DSSC) TIPE P
DENGAN FOTOKATODA Cu_2O NANOCUBE**

Nama : Rachma Putri Anggraini
NRP : 02311640000102
Departemen : Teknik Fisika FTIRS - ITS
Dosen Pembimbing : Dr.-Ing.Doty Dewi Risanti, S.T.,M.T.

ABSTRAK

Cuprous oxide (Cu_2O) merupakan semikonduktor tipe p dengan *band gap* sekitar 1,8 eV-2,2 eV dimana sesuai untuk fotokatoda DSSC. Selain itu Cu_2O tidak beracun, banyak tersedia di alam, memiliki *band gap* yang dapat diubah-ubah. Pada penelitian ini dilakukan fabrikasi DSSC tipe p dengan semikonduktor Cu_2O sebagai fotokatoda. Ukuran Cu_2O divariasikan dengan mengubah konsentrasi NaOH pada sintesis. Cu_2O disintesis dengan prekursor $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ dan agen pereduksi asam askorbat dan NaOH. Hasil XRD dari Cu_2O menunjukkan bahwa struktur kristal Cu_2O adalah kubik. Variasi konsentrasi NaOH yang digunakan saat sintesis berpengaruh pada ukuran partikel yang terbentuk. Peningkatan konsentrasi NaOH menyebabkan meningkatnya ukuran partikel Cu_2O . Semakin kecil ukuran partikel *band gap* Cu_2O semakin bertambah besar. *Band gap* Cu_2O didapatkan sebesar 2,44 eV, 2,35 eV, 2,12 eV, 2,1 eV, dan 2,09 eV untuk variasi konsentrasi NaOH sebesar 0,075 M, 0,113 M, 0,188 M, 0,263 M, dan 0,3 M secara berturut-turut. Performansi DSSC didapatkan yang paling baik pada konsentrasi NaOH sebesar 0,3 M ditunjukkan dengan efisiensi sebesar 0,00119 %.

Kata kunci: fotokatoda, Cu_2O nanocube, efisiensi DSSC

Halaman ini sengaja dikosongkan

**FABRICATION OF P TYPE DYE SENSITIZED SOLAR CELL
(DSSC) WITH Cu_2O NANOCUBE PHOTOCATODES**

Name : Rachma Putri Anggraini
NRP : 02311640000102
Department : Engineering Physics INDSYS - ITS
Supervisors : Dr.-Ing.Doty Dewi Risanti, S.T.,M.T.

ABSTRACT

Cuprous oxide (Cu_2O) is a p-type semiconductor with a 1.8 eV-2.2 eV bandgap which has potential applications on DSSC photocathode. Cu_2O is non-toxic material, earth-abundant, and has a tunable bandgap. In this research, Cu_2O as photocathode in p-type DSSC was synthesized in various sizes. The size of the Cu_2O was tailored by adjusting the concentration of the NaOH solution. Cu_2O was synthesized by the reduction of $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ precursor using ascorbate acid and NaOH. XRD spectra exhibited that the Cu_2O structure is cubic. Increased NaOH concentration augments the Cu_2O particle size. Cu_2O optical band gap increases as particle size decreases. Obtained Cu_2O optical band gaps were 2.44 eV, 2.35 eV, 2.12 eV, 2.1 eV, and 2.09 eV for 0.075 M, 0.113 M, 0.188 M, 0.263 M, and 0.3 M NaOH concentrations, respectively. The highest DSSC efficiency obtained was 0.0019% for the sample reduced at 0.3 M solution of NaOH.

Keywords: *photocathode, Cu_2O nanocube, DSSC efficiency*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji Syukur atas berkat dan rahmat Allah SWT sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir yang berjudul “ **Fabrikasi *Dye Sensitized Solar Cell (DSSC)* dengan Fotokatoda $\text{Cu}_2\text{O Nanocube}$ “ . Selama penyusunan tugas akhir ini banyak pihak yang telah memberikan fasilitas, bantuan, dan motivasi kepada penulis. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:**

1. Bapak Dr. Suyanto ST, MT., selaku Kepala Departemen Teknik Fisika ITS.
2. Ibu Dr.-Ing Doty Dewi Risanti, ST, MT. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan dukungan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Ibu saya yang telah memberikan saya dukungan hingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Seluruh dosen Teknik Fisika- ITS yang telah memberikan pengajaran sehingga penulis memiliki bekal ilmu dan pengalaman untuk menyelesaikan tugas akhir dan nantinya untuk pasca kuliah.
5. Seluruh staf pegawai Departemen Teknik Fisika atas semua bentuk kerjasamanya selama masa kuliah.
6. Laboratorium Rekayasa Bahan dan Laboratorium Fotonik, Teknik Fisika ITS yang telah memberikan pinjaman alat dan fasilitas untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini serta Laboratorium XRD Departemen Material dan Metalurgi ITS telah membantu melakukan pengujian dalam Tugas Akhir ini
7. Rekan dalam mengerjakan Tugas Akhir, Chiara Arandani dan Winda Nur Azizah yang telah memberikan dukungan, menemani, dan teman berdiskusi dalam pengerjaan Tugas Akhir ini
8. Asisten laboratorium Rekayasa Bahan yang sering saya mintai bantuan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini
9. Mbak Dhila, Mas Haekal, Mas Matius serta alumni yang saya sering saya tanya saat mengerjakan Tugas Akhir ini
10. Maharani Sarah Holle yang memberikan dukungan serta teman perantaun yang masih di Surabaya saat mengerjakan Tugas Akhir ini

11. Rekan-rekan Teknik Fisika Angkatan 2016

Serta pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu-persatu. Semoga laporan tugas akhir ini dapat dipergunakan dengan sebaik-baiknya.

Surabaya, 30 Juni 2020

Penulis

DAFTAR ISI

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	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
1.5 Sistematika Laporan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	5
2.1 DSSC Tipe P.....	5
2.2 Cu_2O	6
2.3 Macam-Macam Morfologi Cu_2O	7
2.4 Faktor yang mempengaruhi ukuran Cu_2O	9
2.5 Metode-metode Pembuatan Cu_2O	10
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	13
3.1 Alat dan Bahan	14

3.2	Sintesis Cu ₂ O <i>Nanocube</i>	14
3.3	Karakterisasi Cu ₂ O <i>Nanocube</i>	15
3.4	Proses Perakitan DSSC	19
3.5	Pengujian Performansi DSSC	20
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		23
4.1	Pengujian XRD	23
4.2	Pengujian SEM	30
4.3	Pengujian UV-Vis.....	33
4.4	<i>Driving Force of Hole Injection</i>	36
4.5	Pengujian 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 Prinsip kerja p-type DSSC(Gong et al., 2017)	5
Gambar 2. 2 Struktur kristal Cu ₂ O (warna merah adalah atom oksigen dan warna orange merupakan atom Cu)(Wick & Tilley, 2015).....	6
Gambar 2. 3 Diagram level energi Cu ₂ O dari beberapa penelitian sebelumnya (Basnet & Zhao, 2016; Bessekhoud, Robert, & Weber, 2005; Kumar et al., 2019; Marschall, 2014; Sharma et al., 2014; M. Singh et al., 2018).....	7
Gambar 2. 4 SEM Cu ₂ O <i>nanocube</i> (Cao et al., 2014).....	8
Gambar 2. 5 TEM Cu ₂ O <i>hollow nanosphere</i> dengan <i>template</i> CTAB (Xu & Wang, 2007).....	8
Gambar 2.6 SEM nanopartikel Cu ₂ O yang disintesis pada suhu: a)120°C dan b) 140°C(Zhang & Cui, 2008).	9
Gambar 2.7 Ilustrasi sintesis <i>hollow Cu₂O nanocube</i> dari CuCl <i>micropowder</i> melalui <i>hydrolysis-based approach</i> (Liu et al., 2013).....	11
Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian.....	13
Gambar 3. 2 Larutan hasil sintesis dengan konsentrasi NaOH 0,075 M, 0,113 M, 0,188 M, 0,236 M, dan 0,3 M (dari kiri ke kanan)	15
Gambar 3.3 Diagram skematik difraksi sinar-X oleh kristal (kondisi Bragg) (Waseda, Matsubara, & Shinoda, 2011).....	16
Gambar 3. 4 Skema <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM)(Kaufmann, 2003)	17
Gambar 3. 5 Contoh Tauc plot Cu ₂ O (Ursu et al., 2018).....	18
Gambar 3. 6 Prinsip kerja pengujian Uv-Vis (De Caro, 2015).....	19
Gambar 3. 7 Kurva I-V ideal	21
Gambar 3. 8 Rangkaian ekuivalensi untuk pengujian DSSC (Ekasari, 2013).....	21
Gambar 4. 1 Pola XRD Cu ₂ O (a) dengan konsentrasi NaOH saat sintesis 0,3 M; 0,263 M; 0,188 M; 0,113 M; 0,075 M (b) JCPDS 00-005-0667....	24
Gambar 4. 2 Pola XRD Cu ₂ O pada orientasi bidang (111) menunjukkan pergeseran puncak ke sudut yang lebih rendah. Ukuran kristal yang terbentuk	

21 nm, 23 nm, 26 nm, 27 nm, dan 26 nm dari konsentrasi NaOH terendah ke terbesar.	25
Gambar 4. 3 Hubungan konsentrasi NaOH , parameter kisi, dan volume cell...	28
Gambar 4. 4 Williamson- Hall Plot dari Cu ₂ O dengan konsentrasi NaOH (a) 0,075 M , (b) 0,113 M, (c) 0,188 M, (d) 0,263 M, dan (e) 0,3 M.....	29
Gambar 4. 5 Hubungan antara konsentrasi NaOH dan ukuran kristal Cu ₂ O	30
Gambar 4. 6 SEM Cu ₂ O dengan 0,3 M NaOH pada perbesaran (a) 5000x dan (b) 50000xU.....	31
Gambar 4. 7 SEM Cu ₂ O dengan konsentrasi NaOH (a) 0,075 M (b) 0,113 M (c) 0,188 M (d) 0,263 M.....	32
Gambar 4. 8 SEM Cu ₂ O dengan perbesaran 10000x dengan konsentrasi NaOH (a) 0,263 M (b) 0,3 M	33
Gambar 4. 9 Spektrum absorpsi UV-vis.....	34
Gambar 4. 10 Tauc plot Cu ₂ O dengan konsentrasi NaOH (a) 0,075 M (b) 0,113 M (c) 0,188 M (d) 0,263 M (e) 0,3 M.....	35
Gambar 4. 11 Hubungan konsentrasi NaOH yang digunakan untuk sintesis Cu ₂ O terhadap <i>band gap</i> Cu ₂ O.....	36
Gambar 4. 12 Kurva J-V DSSC dengan fotokatoda Cu ₂ O.....	38
Gambar 4. 13 Rangkaian ekuivalen dioda tunggal dari sel surya(Ghani & Duke, 2011)	40

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Pengaruh konsentrasi PEG terhadap ukuran partikel Cu ₂ O(Gou & Murphy, 2004).	10
Tabel 2.2 Pengaruh konsentrasi PEG terhadap ukuran partikel Cu ₂ O(Gou & Murphy, 2004).	10
Tabel 4. 1 FWHM, persentase <i>kristal</i> , ukuran <i>kristal</i> , parameter kisi, dan volume <i>unit cell</i> Cu ₂ O	26
Tabel 4. 2 Rata-rata ukuran kristal, <i>microstrain</i> , dan densitas dislokasi Cu ₂ O....	30
Tabel 4. 3 Diameter Cu ₂ O nanopartikel dengan variasi penambahan konsentrasi NaOH menggunakan <i>software</i> ImageJ	31
Tabel 4. 4 Ukuran agregat dari Cu ₂ O	32
Tabel 4. 5 Energi Bebas Gibbs dari Cu ₂ O	37
Tabel 4. 6 Performansi DSSC dengan fotokatoda Cu ₂ O.....	39
Tabel 4. 7 Nilai hambatan karakteristik dan estimasi nilai Rs dan Rsh dari DSSC dengan fotokatoda Cu ₂ O.....	41

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi matahari merupakan salah satu solusi untuk pengganti dari energi yang berasal dari batu bara karena memiliki ketersediaan yang besar sekitar $1,4 \times 10^5$ TW energi di permukaan bumi (Karim et al., 2019). Energi matahari dapat dikonversi menjadi energi listrik menggunakan sel surya. Salah satu jenis sel surya adalah *Dye-sensitized solar cell* (DSSC) karena harga fabrikasi yang murah, mudah difabrikasi, konversi daya tinggi dan ramah lingkungan (Ursu, Vajda, & Miclau, 2019). DSSC konvensional (*Gratzel cell*) tersusun atas fotoanoda, *dye*, elektrolit, dan elektroda lawan. Efisiensi dari DSSC terakhir mencapai 14,3 % (Kakiage et al., 2015).

Penelitian untuk meningkatkan performansi DSSC terus dilakukan mulai dari mengganti *dye* yang digunakan, mengganti elektrolit yang digunakan, memodifikasi fotoanoda dari segi material maupun strukturnya, merencanakan elektroda, dan merencanakan struktur divisinya (Gong, Liang, & Sumathy, 2012; Gong et al., 2017). Rekayasa struktur divisinya yang berkembang akhir-akhir ini adalah DSSC tipe p akan tetapi efisiensinya lebih rendah dibandingkan DSSC tipe n. Efisiensi DSSC tipe-p yang terbaik dari penelitian yang telah dilakukan sebesar 2,5% untuk semikonduktor NiO (Perera et al., 2015). Walaupun efisiensinya rendah, pengembangan DSSC tipe p yang lebih efisien penting untuk diteliti karena katoda oksida tipe-p dapat diintegrasikan dengan anoda oksida tipe n untuk menghasilkan tandem sel surya yang diharapkan meningkatkan performansi dan mengurangi biaya pembuatan sel surya (Wei et al., 2016). Salah satu hal yang dapat dilakukan untuk meningkatkan performansi adalah mencari semikonduktor tipe p dengan karakteristik dan sifat yang sesuai.

Cuprous oxide (Cu_2O) merupakan semikonduktor tipe p dengan *band gap* sekitar 1,8 eV-2,2 eV dimana sesuai untuk fotokatoda DSSC (Du et al., 2014). Selain itu Cu_2O tidak beracun, banyak tersedia di alam, memiliki *band gap* yang dapat diubah-ubah (Bagal et al., 2019). Cu_2O dapat disintesis dengan metode *sonochemical*, elektrokimia, hidrotermal, solvotermal, *laser ablation*, *microwave*,

dan *wet-chemical* (Zhang & Cui, 2008). Sisi dkk menggunakan *wet-chemical* untuk mensintesis Cu_2O dan meneliti pengaruh morfologi Cu_2O *polygonal star* terhadap efisiensi DSSC tipe p. Didapatkan efisiensi sebesar 0,42% untuk DSSC dengan fotokatoda Cu_2O *polygonal star* (Du et al., 2014). Cu_2O memiliki beberapa morfologi *nanocube, octahedra, nanocages, hollowspheres, nanowire*, dll (Kuo, Chen, & Huang, 2007). Sifat optik, kimia, dan fisik dari Cu_2O dapat ditingkatkan dengan mengubah ukuran dan morfologinya (Karmakar, Biswas, & Kumbhakar, 2020). Perbedaan morfologi dari semikonduktor akan mempengaruhi kemampuan *light scattering* sehingga akan berpengaruh terhadap performansi DSSC. Oleh karena itu dilakukan fabrikasi DSSC tipe p dengan Cu_2O *nanocube* pada penelitian ini. Cu_2O *nanocube* struktur yang ideal yang memiliki kekuatan mekanik yang kuat serta jalur transport elektron yang baik dikarenakan kestabilan kimia dan konduktivitas listrik yang baik (Karmakar et al., 2020). Diharapkan pada penelitian ini dapat diketahui pengaruh penambahan NaOH pada sintesis Cu_2O terhadap ukuran Cu_2O dan performansi DSSC.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

- a) Bagaimana karakteristik optik material fotokatoda Cu_2O *nanocube* ?
- b) Bagaimana pengaruh konsentrasi NaOH pada sintesis Cu_2O *nanocube* terhadap efisiensi DSSC ?

1.3 Tujuan

Berdasarkan beberapa rumusan masalah diatas, tugas akhir ini bertujuan sebagai berikut :

- a) Mengetahui karakteristik optik material fotokatoda Cu_2O *nanocube*.
- b) Mengetahui pengaruh penambahan NaOH pada sintesis Cu_2O *nanocube* terhadap efisien DSSC.

1.4 Batasan Masalah

Berdasarkan latar belakang dan tujuan dari tugas akhir ini, terdapat batasan masalah sebagai berikut :

- a) Cu_2O disintesi dengan metode kopresepitasi yang telah dilakukan oleh Cao et al (2014).
- b) Prekursor yang digunakan adalah $\text{Cu}(\text{CH}_2\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ dari Merck
- c) Dye yang digunakan adalah N-719 dari Sigma Aldrich.
- d) Metode deposisi Cu_2O digunakan adalah metode *doctor blade* tanpa memperhatikan ketebalan Cu_2O
- e) Kaca konduktif yang digunakan adalah kaca FTO dan elektroda lawan menggunakan FTO dengan lapisan Pt yang ditambahkan dengan karbon.

1.5 Sistematika Laporan

Laporan ini terdiri dari lima bab dengan perincian sebagai berikut:

- a) Bab I berisikan tentang alasan yang melatarbelakangi penelitian, permasalahan yang diambil, tujuan yang ingin dicapai, serta batasan masalah dari tugas akhir.
- b) Bab II berisikan tentang tinjauan pustaka dan dasar teori mengenai DSSC tipe p dan fotokatoda Cu_2O .
- c) Bab III berisikan tentang rincian alat dan bahan yang digunakan, tahapan-tahapan yang dilakukan dalam penelitian untuk membuat DSSC dengan fotokatoda Cu_2O , serta penjelasan mengenai karakterisasi yang dilakukan.
- d) Bab IV berisikan analisis hasil karakterisasi fotokatoda Cu_2O dan DSSC yang dilakukan dan pembahasan.
- e) Bab V berisikan kesimpulan yang menjawab tujuan penelitian.

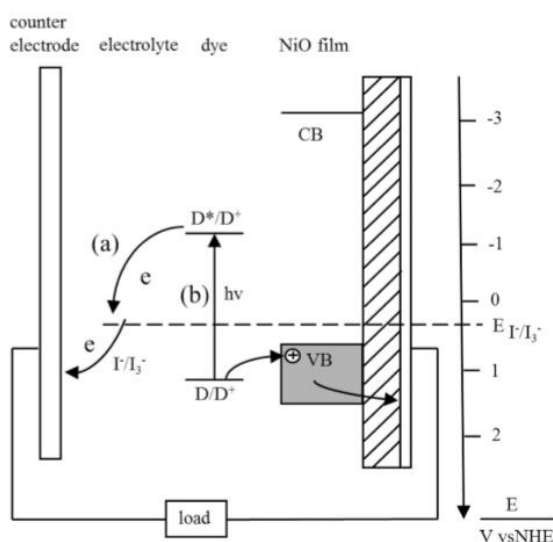
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 DSSC Tipe P

DSSC tipe-p memiliki prinsip kerja yang berbeda dengan DSSC tipe n. Pada DSSC tipe p katoda berperan sebagai elektroda kerja sedangkan anoda sebagai elektroda lawan. Struktur dari DSSC tipe p terdiri dari (1) kaca TCO (*Transparent Conducting Oxide*) (2) film semikonduktor tipe-p (3) pewarna (*dye*) sebagai absorber cahaya (4) elektrolit yang terdiri dari pasangan redoks. Semikonduktor tipe p yang telah digunakan sebagai katoda pada DSSC adalah NiO, CuO, Cu₂O, dan lain-lain.



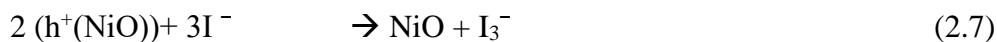
Gambar 2. 1 Prinsip kerja p-type DSSC(Gong et al., 2017)

Prinsip kerja DSSC tipe p berkebalikan dari DSSC tipe n dimana eksitasi *dye* oleh foton dari *ground state* (D) ke *excited state* (D*) diikuti oleh transfer elektron dari pita valensi semikonduktor tipe p ke *dye* (injeksi *hole* ke semikonduktor) (Benazzi et al., 2019). Transfer elektron dari pita valensi semikonduktor tipe p ke *dye* menyebabkan *dye* tereduksi (D⁻) dan *hole* akan ditransfer ke elektroda (Dini et al., 2015). Elektron dari *dye* tereduksi ditransfer ke elektrolit (I₃⁻) dan *dye* akan beregenerasi kembali ke *ground state*(Gong et al., 2017). Elektron dari elektrolit akan ditransfer ke elektroda lawan melalui reaksi oksidasi kemudian mengalir dari

anoda ke katoda sehingga terjadi siklus transfer elektron. Berikut persamaan reaksi pada DSSC dengan fotokatoda NiO:

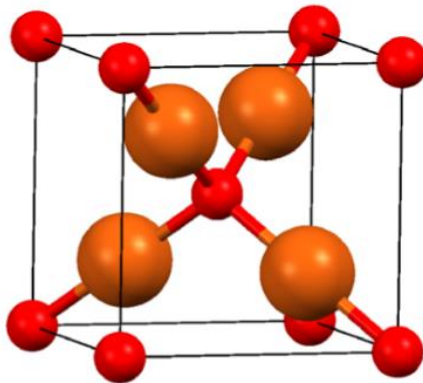


Rekombinasi dapat terjadi pada reaksi fotoelektrokimia pada DSSC. Rekombinasi dapat terjadi pada *dye* dan hole pada semikonduktor dan atau pada hole pada semikonduktor dan elektrolit.



2.2 Cu₂O

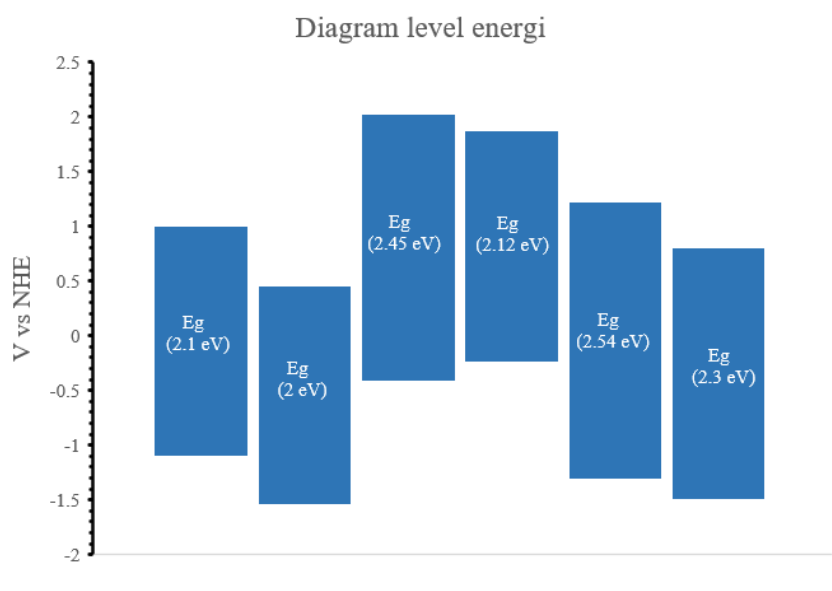
Cuprous oxide (Cu₂O) merupakan salah satu oksida dari tembaga yang memiliki fasa stabil . Bentuk oksida lainnya antar lain CuO (*cupric oxide*) dan Cu₄O₃ (*paramelaconite*). Cu₂O secara alami merupakan semikonduktor tipe p yang memiliki *direct band gap* sebesar 2,17 eV (*bulk material*) . Cu₂O memiliki struktur kristal kubik dengan dua sub-kisi yaitu sub-kisi FCC (*face-centered cubic*) dari kation tembaga dan sub-kisi BCC (*body-centered cubic*) untuk anion oksigen (Korzhevyy & Johansson, 2011). Gambar 2.2 merupakan struktur kristal Cu₂O dengan *space group* Pn3m (224) dan paramater kisi sebesar 4,2696 Å (Wick & Tilley, 2015).



Gambar 2. 2 Struktur kristal Cu₂O (warna merah adalah atom oksigen dan warna orange merupakan atom Cu)(Wick & Tilley, 2015).

Cu₂O memiliki konsentrasi pembawa sebesar $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ dan mobilitas hole sebesar $\sim 100 \text{ cm}^2/\text{V}$ pada temperatur ruang sehingga sesuai untuk aplikasi DSSC tipe p (Ursu et al., 2019). Dibandingkan dengan CuO ($\sim 0,1 \text{ cm}^2/\text{V}$), Cu₂O memiliki mobilitas hole ($\sim 100 \text{ cm}^2/\text{V}$) yang lebih besar (Gupta et al., 2018). Selain itu Cu₂O memiliki permitivitas yang besar $\epsilon \sim 7$ pada daerah cahaya tampak dan *near-infrared* (Yang et al., 2015).

Berdasarkan sifat-sifat yang dimiliki, Cu₂O nanomaterial dapat diaplikasikan pada sensor gas, fotokatalis, sel surya, dan baterai. *Band gap* nanomaterial Cu₂O yang kecil menyebabkan Cu₂O memiliki kemampuan mengabsorpsi energi foton yang tinggi sehingga cocok untuk aplikasi DSSC (Fasasi et al., 2018). Selain itu nanomaterial Cu₂O memiliki *tunable band gap*. *Band gap* Cu₂O yang didapatkan dari hasil penelitian sebelumnya dapat dilihat pada gambar 2.3

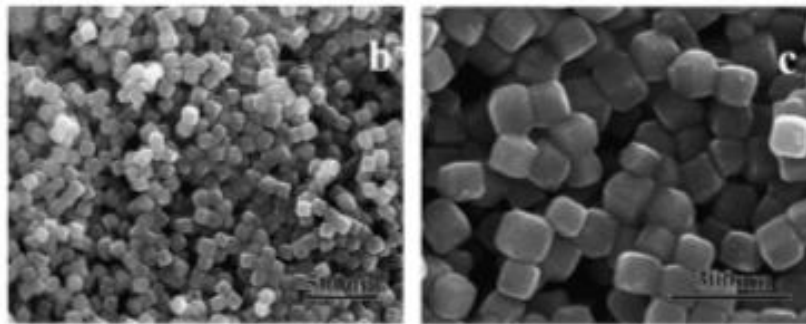


Gambar 2. 3 Diagram level energi Cu₂O dari beberapa penelitian sebelumnya (Basnet & Zhao, 2016; Bessekhouad, Robert, & Weber, 2005; Kumar et al., 2019; Marschall, 2014; Sharma et al., 2014; M. Singh et al., 2018)

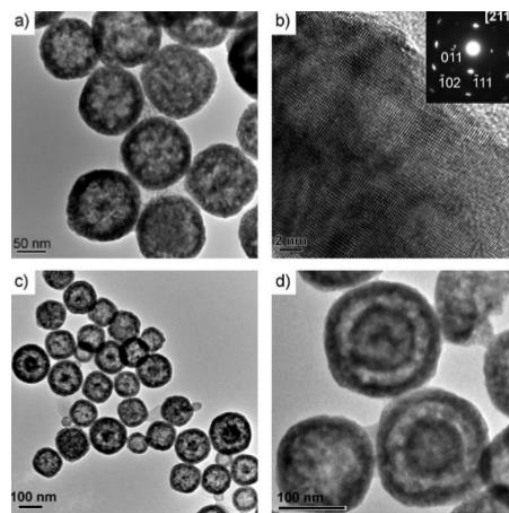
2.3 Macam-Macam Morfologi Cu₂O

Penelitian yang telah dilakukan menunjukkan Cu₂O memiliki berbagai struktur meliputi *nanocube* (Cao et al., 2014), *nanosphere* (Zhang et al., 2006), *octahedron*,

polygon star (Du et al., 2014), *nanotube* (Luo et al., 2005), *hollow cube* (Wang et al., 2009b), *hollow nanosphere* (Chang, Teo, & Zeng, 2005), dan lain-lain. Bentuk struktur morfologi dari Cu_2O dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain konsentrasi prekursor, konsentrasi dan jenis agen pereduksi, dan template yang digunakan. Penelitian sebelumnya menunjukkan variasi konsentrasi prekursor CuCl_2 dengan pereduksi NaBH_4 mempengaruhi struktur dari Cu_2O yang terbentuk antara lain *cubic*, *octahedron*, *truncated octahedron*, dan *truncated cubic* (Aguilar & Rosas, 2019). Agen pereduksi ascorbic acid dan hydrazine hydrate yang digunakan berhasil membentuk struktur Cu_2O yang berbeda yaitu *cubic* dan *octahedral* (Wang et al., 2009a).



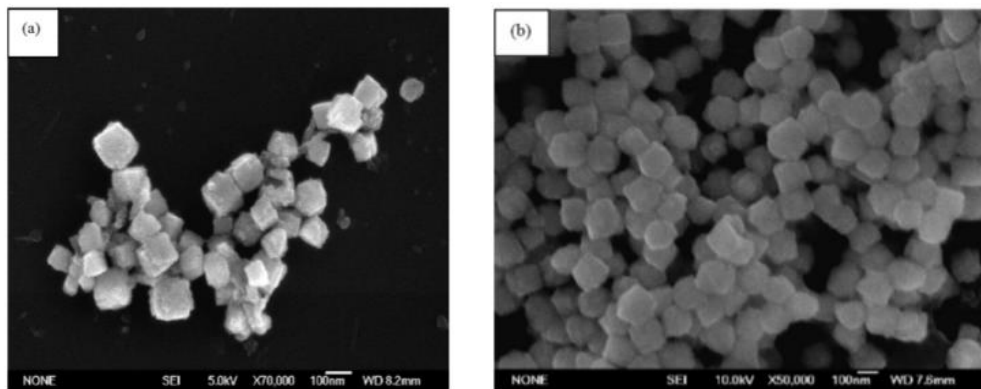
Gambar 2. 4 SEM Cu_2O *nanocube* (Cao et al., 2014)



Gambar 2. 5 TEM Cu_2O *hollow nanosphere* dengan *template* CTAB (Xu & Wang, 2007)

2.4 Faktor yang mempengaruhi ukuran Cu₂O

Ukuran Cu₂O yang terbentuk dipengaruhi oleh beberapa hal antara lain temperatur reaksi, konsentrasi prekursor, dan konsentrasi surfaktan. Temperatur reaksi diketahui mempengaruhi keseragaman ukuran Cu₂O yang telah disintesis dengan prekursor Cu(NO₃)₂·3H₂O (Zhang & Cui, 2008). Pada penelitian yang dilakukan oleh Zhang et al (2008) pada temperatur reaksi 140°C didapatkan Cu₂O *nanocube* yang seragam dapat dilihat pada gambar 2.6(b) sedangkan gambar 2.6(a) menunjukkan pada suhu 120°C belum terbentuk Cu₂O dengan ukuran yang seragam.



Gambar 2. 6 SEM nanopartikel Cu₂O yang disintesis pada suhu: a)120°C dan b) 140°C(Zhang & Cui, 2008).

Pengaruh konsentrasi surfaktan terhadap ukuran partikel Cu₂O dapat dilihat pada penelitian Gou et al (2004). Pada penelitian tersebut menggunakan prekursor CuSO₄·5H₂O dan PEG 600 sebagai surfaktan. Variasi ukuran partikel yang didapatkan sekitar 25nm -200 nm dapat dilihat pada tabel 2.1. Semakin besar konsentrasi PEG berpengaruh pada semakin besarnya ukuran partikel Cu₂O. Pada penelitian tersebut juga menunjukkan urutan penambahan asam askorbat (AA) sebagai agen pereduksi dan NaOH juga mempengaruhi ukuran partikel yang terbentuk. Pada tabel 2.1 asam askorbat dan NaOH dicampurkan terlebih dahulu sebelum ditambahkan ke larutan prekursor sedangkan pada tabel 2.1 asam askorbat ditambahkan setelah penambahan NaOH.

Tabel 2. 1 Pengaruh konsentrasi PEG terhadap ukuran partikel Cu₂O(Gou & Murphy, 2004).

Exp.no	Cu ²⁺ (0,01 M)/mL	AA (0,1 M)/mL	PEG (0,05 M)/mL	NaOH (0,5 M)/mL	Average size/nm	Adding sequence
B1	4	1	8	3	>100	NaOH&AA
B2	4	1	4	3	80	NaOH&AA
B3	4	1	2	3	50	NaOH&AA
B4	4	1	1	3	25	NaOH&AA
B5	4	1	0,5	3	25	NaOH&AA
B6	4	1	0,25	3	25	NaOH&AA

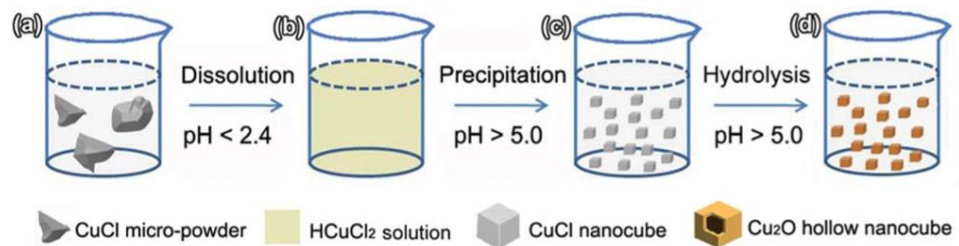
Tabel 2. 2 Pengaruh konsentrasi PEG terhadap ukuran partikel Cu₂O(Gou & Murphy, 2004).

Exp.no	Cu ²⁺ (0,01 M)/mL	AA (0,1 M)/mL	PEG (0,05 M)/mL	NaOH (0,5 M)/mL	Average size/nm	Adding sequence
C1	4	1	8	3	>300/agg	NaOH+AA
C2	4	1	4	3	80	NaOH+AA
C3	4	1	2	3	150	NaOH+AA
C4	4	1	1	3	200/6	NaOH+AA
C5	4	1	0,5	3	200/6	NaOH+AA
C6	4	1	0,25	3	200/6	NaOH+AA

2.5 Metode-metode Pembuatan Cu₂O

Kupro oksida (Cu₂O) merupakan salah satu semikonduktor tipe p yang memungkinkan aplikasi pada DSSC (Du et al., 2014). Pembuatan nanopartikel Cu₂O dapat dilakukan dalam berbagai metode. Pada penelitian sebelumnya, Cu₂O berhasil difabrikasi menggunakan metode hidrotermal sederhana pada suhu anil 400°C (Karmakar et al., 2020). Karmakar et al menggunakan larutan CuSO₄ sebagai prekursor dan C₆H₁₂O₆ sebagai agen pereduksi. Pada suhu tinggi Cu(OH)₂ yang

didapatkan dari reaksi prekursor dan NH_4OH akan direduksi oleh $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ menjadi Cu_2O nanopartikel yang berwarna kemerahan. Selain itu Cu_2O *nanocube* dapat dibuat dengan mereduksi $\text{Cu}(\text{OH})_2$ dengan $\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ pada larutan encer tanpa surfaktan menggunakan metode *wet-chemical* (Wang et al., 2004). Liu et al. memfabrikasi *hollow Cu₂O nanocube* melalui *hydrolysis-based approach* pada suhu ruang (Liu et al., 2013). Skema sintesis Cu_2O melalui metode *hydrolysis-based approach* dapat dilihat pada gambar 2.7.



Gambar 2. 7 Ilustrasi sintesis *hollow Cu₂O nanocube* dari *CuCl micropowder* melalui *hydrolysis-based approach* (Liu et al., 2013)

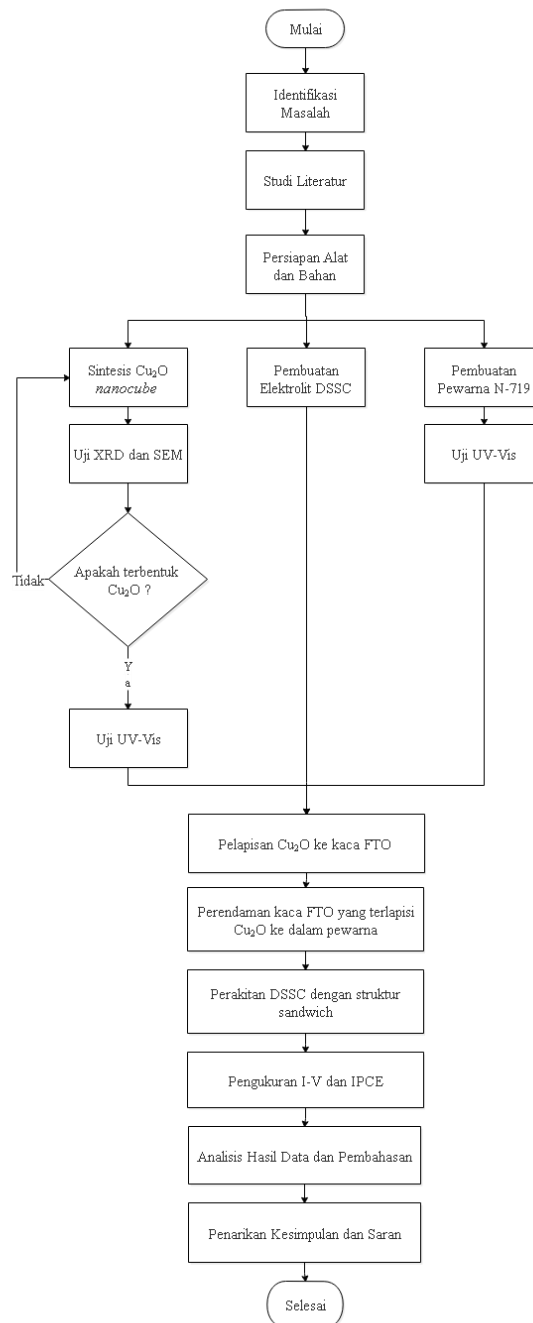
Metode solvothermal digunakan Shao et al untuk membuat Cu_2O *truncated octahedron* (Shao et al., 2014). Cara sintesis Cu_2O dengan metode solvothermal mirip dengan metode hidrotermal perbedaannya terdapat pada prekursor yang digunakan pada metode solvothermal tidak bersifat *aqueous*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Tahapan penelitian mengenai fabrikasi DSSC dengan fotokatoda Cu_2O dapat dilihat pada gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian

3.1 Alat dan Bahan

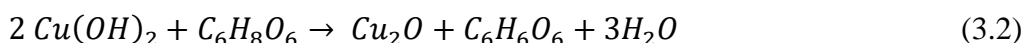
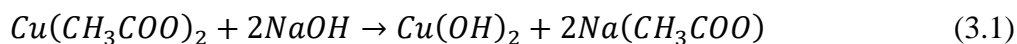
Peralatan yang digunakan adalah gelas beker, gelas ukur, pipet tetes, spatula, pinset, *magnetic stirrer*, timbangan digital, dan oven. Bahan yang digunakan untuk mensintesis Cu₂O adalah Cu(CH₃COO)₂ · H₂O (Merck), asam askorbat (Himedia), NaOH (Merck), dan aquades. Kaca konduktif yang digunakan adalah *FTO (Fluorine doped tin oxide) glass plate* (Dyesol.inc) dengan ketebalan 3,22 mm dan resistansi sebesar 8Ω/sq.

Bahan yang digunakan untuk membuat elektrolit adalah I₂, KI, acetonitrile, chlorofom, dan PEG 4000. Bahan yang digunakan untuk membuat pewarna adalah ruthenium N-719 dan ethanol.

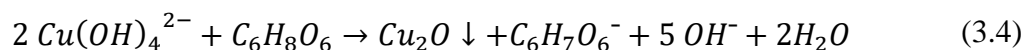
3.2 Sintesis Cu₂O Nanocube

Cu₂O disintesis dari prekursor Cu(CH₃COO)₂ · H₂O mengacu pada penelitian sebelumnya (Cao et al., 2014). Tembaga (II) asetat 0.005 M sebanyak 160 ml ditambahkan dengan campuran 0.009 M asam askorbat sebanyak 100 ml dan 0,113 M NaOH sebanyak 160 ml. Larutan kemudian diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 30 menit. Konsentrasi NaOH diubah-ubah sebesar 0,075 M, 0,188 M, 0,263 M, dan 0,3 M setiap sampelnya. Larutan terakhir yang berwarna kuning menunjukkan terbentuknya Cu₂O. Cu₂O dipisahkan dengan metode dekantasi. Endapan Cu₂O kemudian dicuci menggunakan aquades dan dikeringkan pada suhu 80°C selama 12 jam.

Persamaan reaksi kimia yang terjadi pada sintesis Cu₂O adalah sebagai berikut :



Pada konsentrasi OH⁻ yang tinggi, kompleks Cu(OH)₄²⁻ akan terbentuk (Sun et al., 2012).



Asam askorbat pada reaksi pembentukan Cu_2O berperan sebagai *mild reductant* sehingga Cu^{2+} tereduksi menjadi Cu^+ (Nikam et al., 2014).



Gambar 3. 2 Larutan hasil sintesis dengan konsentrasi NaOH 0,075 M, 0,113 M, 0,188 M, 0,236 M, dan 0,3 M (dari kiri ke kanan)

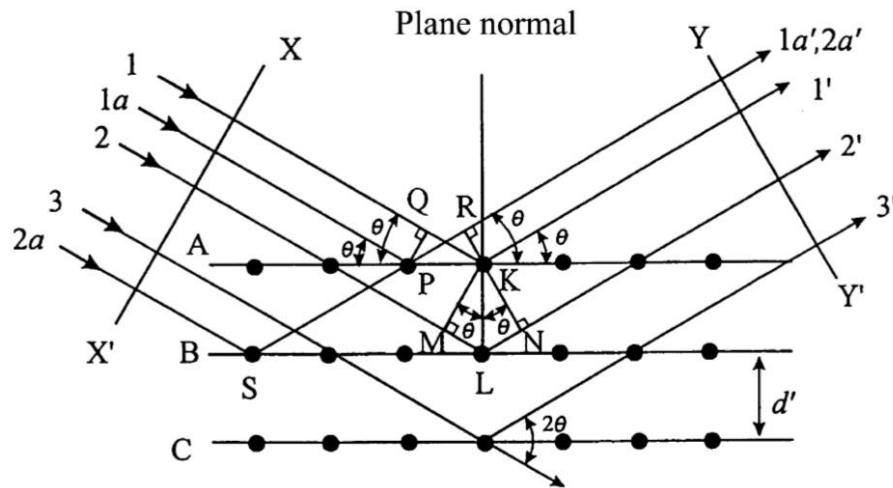
3.3 Karakterisasi Cu_2O Nanocube

3.3.1 Pengujian XRD

X-ray diffraction (XRD) digunakan untuk mengkarakterisasi material dengan memanfaatkan fenomena difraksi sinar-X. Fungsi dari XRD adalah untuk analisis komposisi fasa, struktur kristal, ukuran kristal, dan analisis mikrostruktur lainnya. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui hamburan intensitas sinar-X dari atom-atom dalam sampel yang diuji. Interaksi sinar-X yang datang dan sampel akan menghasilkan interferensi konstruktif jika memenuhi hukum Bragg sehingga intensitas berkas difraksi sinar-X dapat terdeteksi. Hukum Bragg menyatakan bahwa lintasan berkas difraksi sinar-X harus merupakan kelipatan panjang dinyatakan pada persamaan (3.5).

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (3.5)$$

n adalah urutan pantulan, λ adalah panjang gelombang sinar-X, d adalah jarak antar bidang pada kristal, dan θ adalah sudut difraksi.



Gambar 3. 3 Diagram skematik difraksi sinar-X oleh kristal (kondisi Bragg)
(Waseda, Matsubara, & Shinoda, 2011)

Pola difraksi pada setiap material berbeda-beda sehingga dari pola difraksi dapat diketahui material apa yang diuji. Data uji XRD yang berupa sudut 2θ dan intensitas yang nantinya diplot pada sumbu x dan y. Pada pola difraksi apabila didapatkan puncak yang sama dengan referensi menunjukkan material tersebut terdapat pada sampel yang diuji. Data hasil uji juga dapat digunakan untuk analisis diameter dari kristal menggunakan persamaan *Scherrer* berikut:

$$D_{hkl}(nm) = \frac{k\lambda(nm)}{\beta_{hkl}(\text{radian}) \times \cos \theta} \quad (3.6)$$

Dimana, k merupakan konstanta ($k=0,94$) (Patle et al., 2015), λ merupakan panjang gelombang sinar-X, β_{hkl} adalah *Full Width Half Maximum*, dan θ merupakan sudut difraksi Bragg. Selain itu dari data XRD dapat diketahui *lattice parameter* dari kristal. Untuk struktur kristal kubik *lattice parameter* (a) dapat dihitung menggunakan persamaan (3.7).

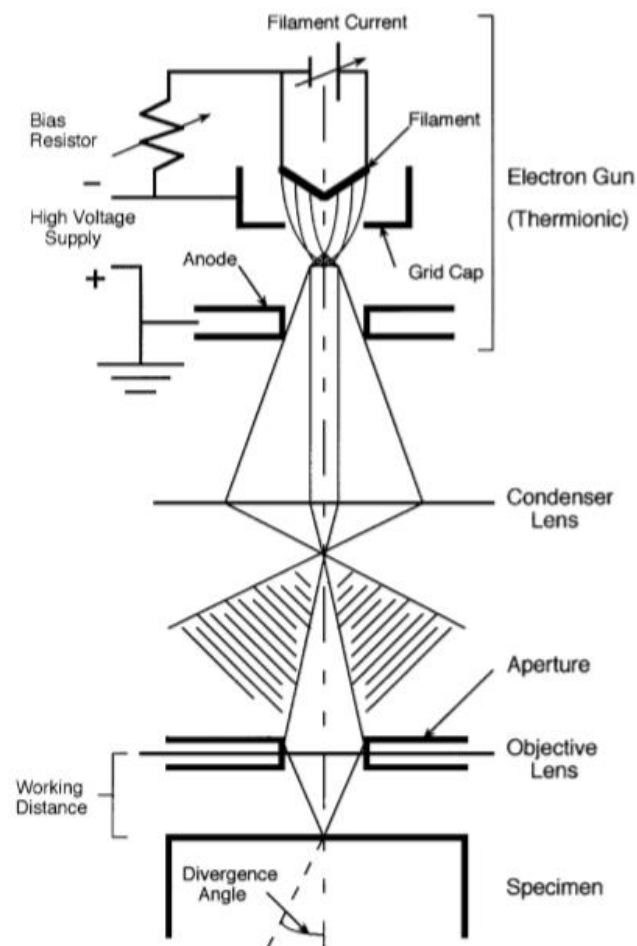
$$a = d_{hkl} \times \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \quad (3.7)$$

Dimana, d_{hkl} adalah jarak antar bidang kristal dihitung menggunakan persamaan 3.5 dan h, k, l adalah indeks miller (orientasi bidang kristal). *Lattice parameter* dapat digunakan untuk menghitung volum *cell*. Volume cell dari struktur kristal kubik dapat dihitung menggunakan persamaan (3.8).

$$V = a^3 \quad (3.8)$$

3.3.2 Pengujian SEM

Scanning Electron Microscopy (SEM) pada penelitian ini digunakan untuk mengetahui morfologi dan ukuran partikel dari Cu_2O yang terbentuk. Pengujian SEM dilakukan di Laboratorium Karakterisasi Material Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS. Pengambilan gambar diambil pada perbesaran 5000x, 10000x, 20000x, dan 50000x. Secara umum, pengujian SEM dapat digunakan untuk analisis mikrostruktur yang berhubungan dengan proses dan sifat dari material. Informasi yang didapatkan dari pengujian SEM antara lain fitur topografi, morfologi, distribusi fasa, orientasi kristal, dan keradaan serta lokasi dari cacat (*defects*)(Kaufmann, 2003).



Gambar 3. 4 Skema *Scanning Electron Microscope* (SEM)(Kaufmann, 2003)

3.3.3 Pengujian Uv-Vis

Uv-vis spektroskopi merupakan spektroskopi optik yang menggunakan cahaya pada rentang ultraviolet dan cahaya tampak. Uv-vis spektroskopi digunakan untuk mengetahui titik leleh, indeks bias, dan massa jenis dari sampel. Pada dasarnya uv-vis spektrofotometer mengukur intensitas cahaya yang melalui *cuvette* yang berisi larutan sampel. Intensitas cahaya tersebut dibandingkan dengan intensitas cahaya sebelum melewati sampel (I_0) sehingga didapatkan nilai transmitansi (T) (De Caro, 2015).

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (3.9)$$

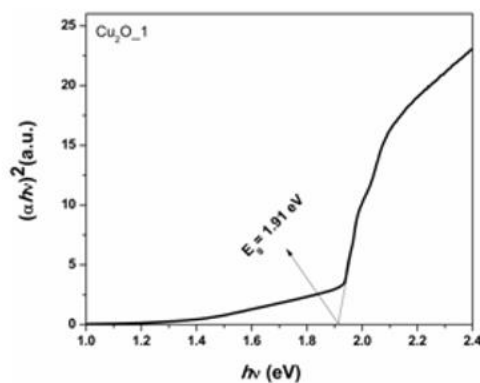
Nilai transmitansi tersebut dapat digunakan untuk menganalisis nilai absorbansi (A) dari sampel yang diuji.

$$A = -\log T \quad (3.10)$$

Nilai absorbansi dapat digunakan untuk menganalisis lebar celah pita optik (E_g) dari sampel dengan menggunakan persamaan Tauc sebagai berikut :

$$(\alpha h\nu)^n = C(h\nu - E_g) \quad (3.11)$$

dimana α , $h\nu$, dan C adalah koefisien absorpsi, energi foton, dan konstanta. Nilai $n = 2$ jika transisi terjadi secara langsung. Nilai E_g dapat ditentukan menggunakan metode Tauc dengan menarik garis yang bersinggungan dari plot $(\alpha h\nu)^2$ terhadap $h\nu$ (Karmakar et al., 2020).



Gambar 3. 5 Contoh Tauc plot Cu₂O (Ursu et al., 2018)

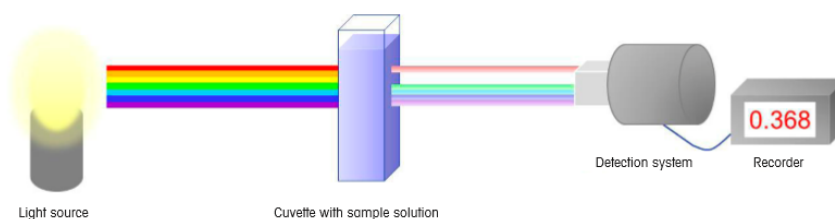
Nilai koefisien absorpsi α didapat dari perbandingan nilai koefisien ekstingsi (ϵ) dan panjang gelombang (λ).

$$\alpha = \frac{4\pi\epsilon}{\lambda} \quad (3.12)$$

Nilai koefisien ekstingsi (ϵ) didapatkan dari persamaan Lambert-Beer sebagai berikut :

$$A = \epsilon \cdot c \cdot d \quad (3.14)$$

dimana c dan d merupakan konsentrasi dari sampel dan lebar kuvet.



Gambar 3. 6 Prinsip kerja pengujian Uv-Vis (De Caro, 2015).

Pada penelitian ini, pengujian Uv-vis dilakukan menggunakan spektrofotometer SpectroVis Plus dari Vernier. Software yang digunakan untuk mengolah sinyal dari spektrofotometer adalah Logger Pro 3.8.7.

3.4 Proses Perakitan DSSC

3.4.1 Pembuatan Elektrolit

Elektrolit yang digunakan merupakan pasangan redoks iodida dan triiodida (I^-/I_3^-). Pembuatan elektrolit dilakukan dengan melarutkan 0,8 gram Kalium iodida ke dalam 10 ml *acetonitrile*. Larutan tersebut ditambahkan 0,127 gram iodida sambil diaduk hingga terlarut sempurna. Larutan elektrolit tersebut dicampurkan gel yang dibuat dengan melarutkan 7 gram PEG 4000 ke dalam 25 ml chloroform. Kemudian diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 1 jam dengan suhu 80°C.

3.4.2 Pembuatan Pewarna

Perwarna yang digunakan adalah ruthenium kompleks N-719 yang merupakan pewarna standar industri. Perwana ini memiliki warna merah marun dalam bentuk serbuk dengan rumus kimia $C_{58}H_{86}N_8O_8RuS_2$ (N-719). Penelitian ini menggunakan pewarna dengan konsentrasi 0,3 mM.

3.4.3 Fabrikasi DSSC

Fabrikasi DSSC dimulai dengan pembuatan pasta Cu_2O dengan melarutkan 0,03gram sampel ke 0,01 ml ethanol kemudian diaduk hingga homogen. Pasta Cu_2O dilapiskan ke kaca FTO menggunakan metode *doctor blade*. Luas aktif fotokatoda yang digunakan seluas 0,5 cm x 0,5 cm. Kaca FTO yang sudah terlapisi Cu_2O kemudian dianneling pada suhu 80°C selama 2 jam (Du et al., 2014). Kaca FTO tersebut kemudian dilarutkan kedalam pewarna ruthenium kompleks N-719 selama 24 jam.

3.5 Pengujian Performansi DSSC

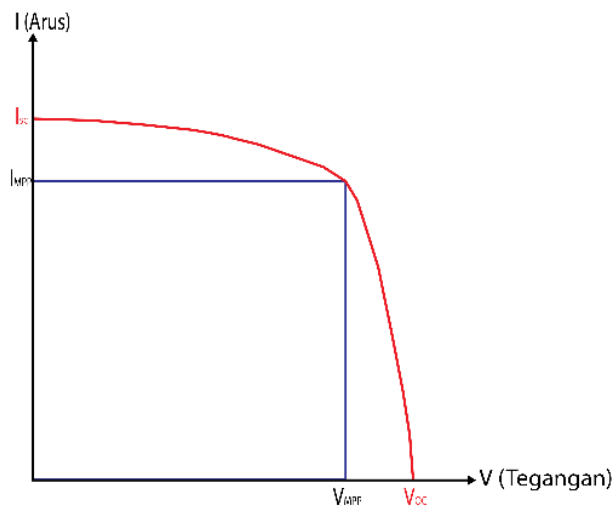
Performansi DSSC dapat ditentukan dari nilai efisiensinya. Nilai efisiensi DSSC dapat diketahui dengan melakukan pengukuran arus dan tegangan sehingga didapatkan kurva yang menyatakan hubungan tegangan dan arus (kurva I-V). Informasi yang bisa didapatkan dari kurva I-V adalah nilai tegangan *Maximum Power Point* (V_{MPP}), arus *Maximum Power Point* (I_{MPP}), tegangan *open-circuit* (V_{OC}), arus *short-circuit* (I_{SC}). Ada beberapa parameter yang didapatkan pada kurva I-V yaitu daya maksimum (P_{MAX}) dan *fill factor* (FF).

Nilai *fill factor* ditunjukkan oleh nilai luasan terbesar dibawah kurva. Nilai *fill factor* dapat dihitung dengan persamaan (3.15).

$$FF = \frac{V_{MPP}I_{MPP}}{V_{OC}I_{SC}} \quad (3.15)$$

Nilai P_{MAX} didapatkan dengan perhitungan perkalian nilai *fill factor* dengan nilai tegangan *open-circuit* (V_{OC}) dan arus *short-circuit* (I_{SC})

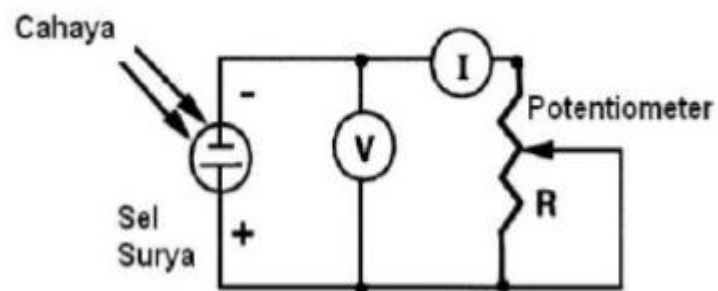
$$P_{MAX} = V_{OC}I_{SC}FF \quad (3.16)$$



Gambar 3. 7 Kurva I-V ideal

Apabila nilai P_{MAX} dan *fill factor* telah diketahui maka nilai efisiensi (η) didapatkan dengan cara pembagian nilai P_{MAX} dari hasil perhitungan dengan nilai P_{Cahaya} dari hasil pengukuran.

$$\eta = \frac{P_{MAX}}{P_{Cahaya}} \quad (3.17)$$



Gambar 3. 8 Rangkaian ekivalensi untuk pengujian DSSC (Ekasari, 2013)

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

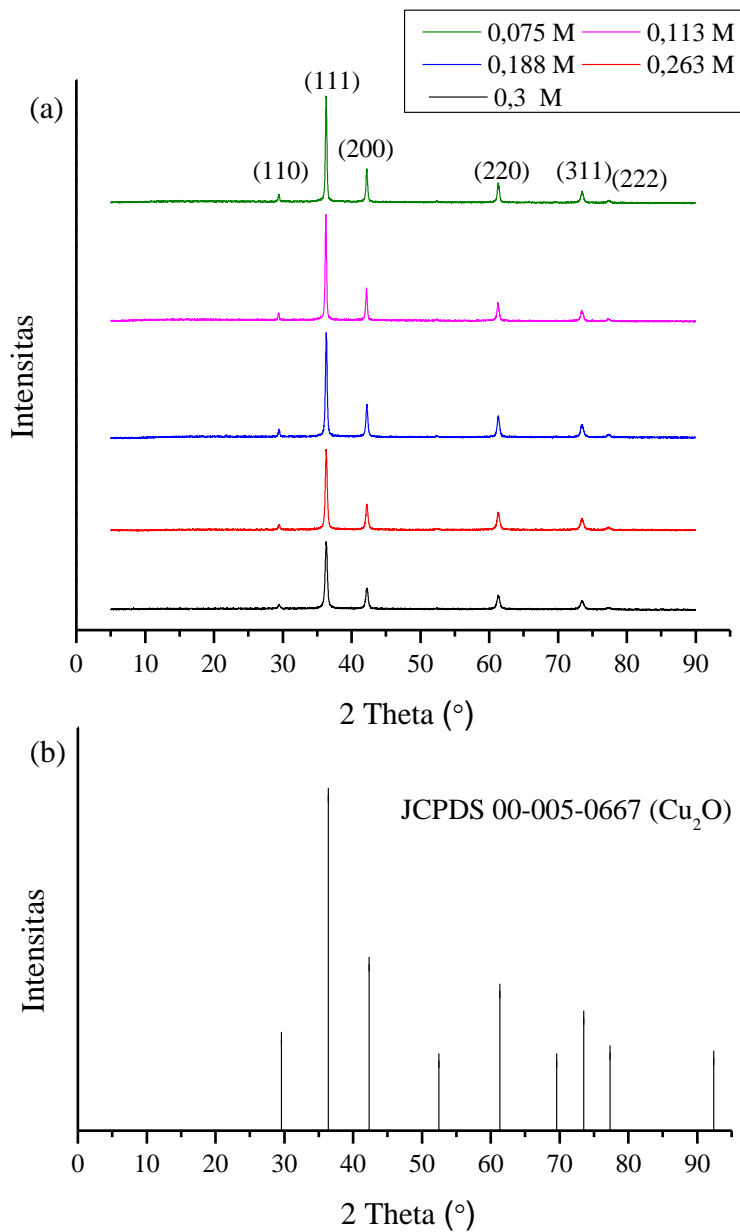
4.1 Pengujian XRD

Kupro oksida (Cu_2O) yang digunakan untuk fotokatoda DSSC pada penelitian ini disintesis dengan metode presipitasi seperti pada penelitian sebelumnya (Cao et al., 2014). Cu_2O disintesis dari prekursor $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ dan agen pereduksi asam askorbat. Pada sintesis Cu_2O , dilakukan variasi penambahan konsentrasi NaOH saat sintesis untuk mendapatkan ukuran partikel yang berbeda. Pola XRD (*X-ray Diffraction*) pada gambar 4.1 menunjukkan puncak-puncak yang bersesuaian dengan pola XRD referensi Cu_2O JCPDS 00-005-0667. Cu_2O berdasarkan JCPDS 00-005-0667 memiliki puncak pada sudut 2θ : $29,56^\circ$, $36,42^\circ$, $42,30^\circ$, $52,46^\circ$, $61,35^\circ$, $73,53^\circ$, dan $77,33^\circ$. Sampel Cu_2O yang diuji memiliki bidang orientasi kristal (110), (111), (200), (220), (311), dan (222). Bidang (211) dan (310) tidak ditemukan pada sampel Cu_2O hasil sintesis. Dapat diketahui dari pola XRD, Cu_2O yang terbentuk murni tanpa adanya impuritas ditunjukkan tidak adanya puncak selain puncak milik Cu_2O . Puncak yang tajam dan sempit (tidak melebar) menunjukkan kiralinitas yang tinggi.

Cu_2O memiliki struktur kristal kubik dengan 2 *sublattice* yaitu FCC (*face-centered cubic*) dan BCC (*body-centered cubic*). Pada pola XRD dapat dianalisis puncak (111) dan (311) menunjukkan struktur kristal yang terbentuk adalah FCC. Terbentuknya struktur kristal FCC ditunjukkan dari nilai h , k , l yang bernilai semuanya ganjil atau semuanya genap. Sedangkan struktur kristal BCC ditunjukkan dari penjumlahan h , k , l bernilai genap. Sehingga dapat diidentifikasi pada puncak (110) terbentuk Cu_2O dengan struktur kristal BCC (Callister & Rethwisch, 2014). Berdasarkan urutan *Bravais lattice* puncak (111), (200), (220), (311), (222) secara urutan memiliki kesesuaian dengan struktur kristal FCC.

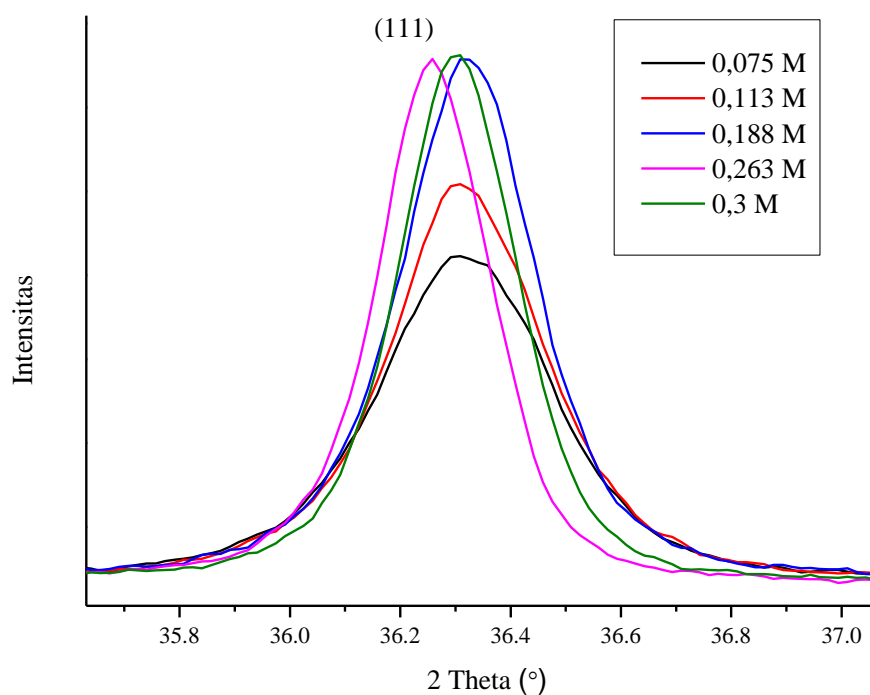
Ukuran kristal rata-rata dari Cu_2O dapat diketahui dari perhitungan menggunakan persamaan Debye-Scherrer. Didapatkan ukuran rata-rata kristal sebesar 18,8 nm, 20,7 nm, 23,7 nm, 28,5 nm, dan 27,1 nm untuk variasi konsentrasi NaOH sebesar 0,075 M, 0,113 M, 0,188 M, 0,263 M, dan 0,3 M secara berturut-turut. Ukuran kristal dari setiap bidang orientasi dapat dilihat pada tabel 4.1. Ukuran

kristal meningkat seiring peningkatan konsentrasi NaOH kecuali pada konsentrasi NaOH sebesar 0,3 M. Hal ini disebabkan laju nukleasi Cu_2O lebih cepat pada sistem yang memiliki perbedaan konsentrasi Cu^+ dan OH^- yang tinggi (Badr & Epstein, 2017). Hubungan konsentrasi NaOH dan ukuran kristal dapat dilihat pada gambar 4.5. Sedangkan hubungan konsentrasi NaOH, parameter kisi, dan volume cell dapat dilihat pada gambar 4.3.



Gambar 4. 1 Pola XRD Cu_2O (a) dengan konsentrasi NaOH saat sintesis 0,3 M; 0,263 M; 0,188 M; 0,113 M; 0,075 M (b) JCPDS 00-005-0667

Puncak pada sudut 2θ dari Cu_2O dari hasil sintesis menunjukkan pergeseran ke arah sudut yang lebih rendah terhadap puncak sudut 2θ referensi. Pelebaran puncak dan pergeseran puncak ke arah sudut yang lebih rendah menunjukkan ukuran kristal yang lebih kecil (Song, Chan, & Rodenbough, 2016). Pada gambar 4.2 menunjukkan pelebaran puncak mengindikasikan terbentuknya kristal yang lebih kecil pada bidang orientasi (111). Pelebaran puncak dan pergeseran puncak juga dapat disebabkan oleh adanya cacat pada kisi (dislokasi) dan adanya regangan (*strain*). Pada bidang orientasi (111), sampel Cu_2O dengan penambahan konsentrasi 0,075 M NaOH saat sintesis memiliki puncak paling lebar dan ukuran kristal yang paling kecil menunjukkan pelebaran puncak akibat ukuran kristal.



Gambar 4. 2 Pola XRD Cu_2O pada orientasi bidang (111) menunjukkan pergeseran puncak ke sudut yang lebih rendah. Ukuran kristal yang terbentuk 21 nm, 23 nm, 26 nm, 27 nm, dan 26 nm dari konsentrasi NaOH terendah ke terbesar.

Secara umum *X-ray line broadening* diakibatkan oleh tiga faktor utama yaitu efek instrument, ukuran kristal, dan regangan kisi lokal (*local lattice strain*)(Shafi

& Bose, 2015). Kontribusi ukuran kristal dan regangan kisi tidak dapat dipisahkan sehingga untuk menganalisis pengaruh ukuran kristal dan regangan kisi pada *X-ray line broadening* digunakan metode Williamson-Hall (W-H) plot. Hubungan antara *lattice strain* atau *micro-strain* dan ukuran kristal terhadap *line broadening* ditunjukkan pada persamaan Williamson-Hall.

$$\beta_{hkl} \cos \theta_{hkl} = \frac{k\lambda}{D} + 4\varepsilon \sin \theta_{hkl} \quad (4.1)$$

dengan β_{hkl} adalah FWHM (*Full Width at Half Maximum*), k adalah *shape factor* (k=0,94), λ adalah panjang gelombang X-ray, D adalah ukuran kristal, ε adalah *lattice strain*, dan θ_{hkl} adalah sudut Bragg. W-H plot merupakan plot $\beta_{hkl} \cos \theta_{hkl}$ pada sumbu y dan $\sin \theta_{hkl}$ pada sumbu x. Ukuran kristal dapat diketahui dari perpotongan pada sumbu y dan *lattice strain* dapat diketahui dari kemiringan grafik pada W-H plot. W-H plot dari sampel Cu₂O dapat dilihat pada gambar 4.4.

Tabel 4. 1 FWHM, persentase *kristal*, ukuran *kristal*, parameter kisi, dan volume *unit cell* Cu₂O

Sampel	Puncak 2 Theta (°)	Orientasi Bidang	FWHM β (derajat)	Perse- ntase * kristal	D (ukuran kristal) (nm)**	Paramet er Kisi (Å) dan Volume (Å ³)
1 (0,075M NaOH)	29,474	(110)	0,453	4%	17,744	$a = 4,277$ $V=78,24$
	36,309	(111)	0,375	58%	21,013	
	42,241	(200)	0,423	18%	18,326	
	61,292	(220)	0,483	11%	14,789	
	73,424	(311)	0,601	7%	11,077	
	77,334	(222)	0,663	2%	9,771	
2 (0,113M NaOH)	29,424	(110)	0,349	4%	22,992	$a = 4,278$ $V=78,29$
	36,292	(111)	0,337	58%	23,390	
	42,208	(200)	0,385	17%	20,121	
	61,275	(220)	0,480	12%	14,873	

Sampel	Puncak 2 Theta (°)	Orientasi Bidang	FWHM β (derajat)	Perse- ntase * kristal	D (ukuran kristal) (nm)**	Paramet er Kisi (Å) dan Volume (Å ³)
	73,474	(311)	0,565	7%	11,779	
	77,385	(222)	0,516	2%	12,563	
3 (0,188M NaOH)	29,490	(110)	0,294	4%	27,265	$a = 4,275$ $V = 7,13$
	36,325	(111)	0,297	59%	26,561	
	42,241	(200)	0,335	17%	23,104	
	61,309	(220)	0,435	11%	16,420	
	73,474	(311)	0,532	7%	12,499	
	77,301	(222)	0,538	1%	12,061	
4 (0,263M NaOH)	29,390	(110)	0,272	4%	29,538	$a = 4,281$ $V = 78,46$
	36,258	(111)	0,246	61%	32,023	
	42,174	(200)	0,281	17%	27,520	
	61,242	(220)	0,373	10%	19,141	
	73,458	(311)	0,480	6%	13,869	
	77,351	(222)	0,450	1%	14,416	
5 (0,3 M NaOH)	29,438	(110)	0,297	4%	27,043	$a = 4,277$ $V = 78,24$
	36,297	(111)	0,259	60%	30,443	
	42,234	(200)	0,293	18%	26,473	
	61,261	(220)	0,387	10%	18,566	
	73,457	(311)	0,457	6%	14,560	
	77,329	(222)	0,537	1%	12,081	

*menggunakan persamaan RIR (*Reference Intensity Ratio*)

**menggunakan persamaan Debye-Scherrer

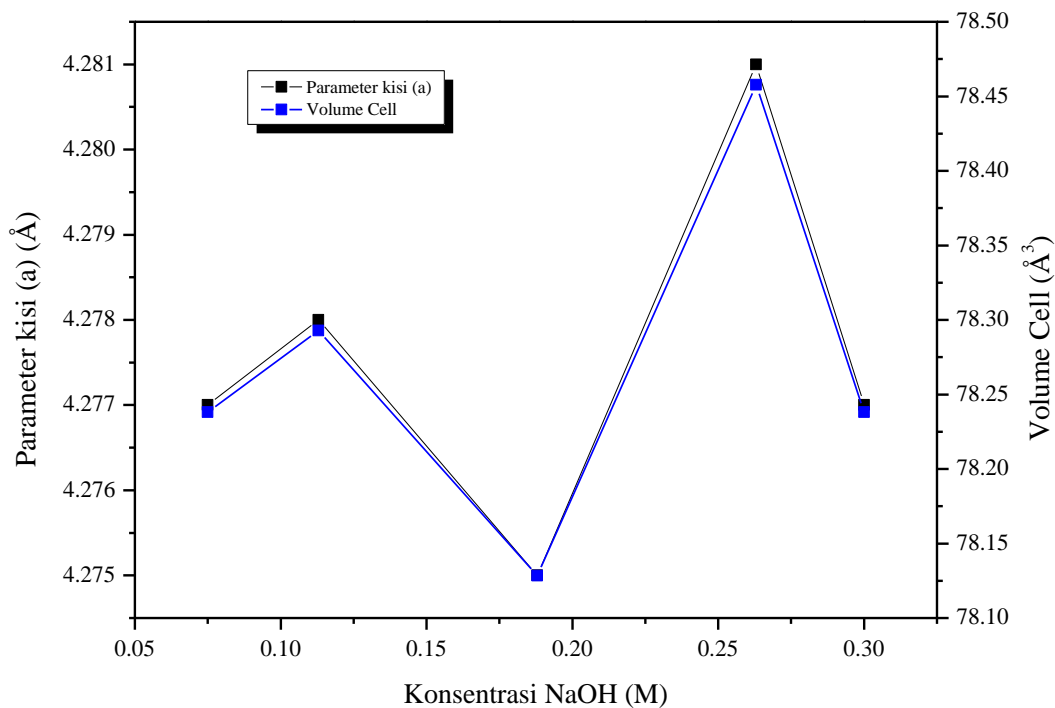
Dari Williamson- Hall plot diketahui nilai *microstrain* dari sampel Cu₂O sebesar 0,0012 , 0,0013 , 0,0018, 0,0015, dan 0,0016 untuk konsentrasi NaOH sebesar 0,075 M, 0,113 M, 0,188 M, 0,263 M, dan 0,3 M secara beturut-turut.

Adanya *microstrain* disebabkan oleh cacat kristal seperti dislokasi dan cacat titik (*point defects*) (Irfan, Racik, & Anand, 2018).

Densitas dislokasi (δ) merepresentasikan jumlah cacat (*defect*) pada sampel yang menunjukkan panjang dislokasi garis per unit volume kristal dihitung menggunakan persamaan (4.2) (Baturay et al., 2016; Bindu & Thomas, 2014).

$$\delta = \frac{1}{D^2} \quad (4.2)$$

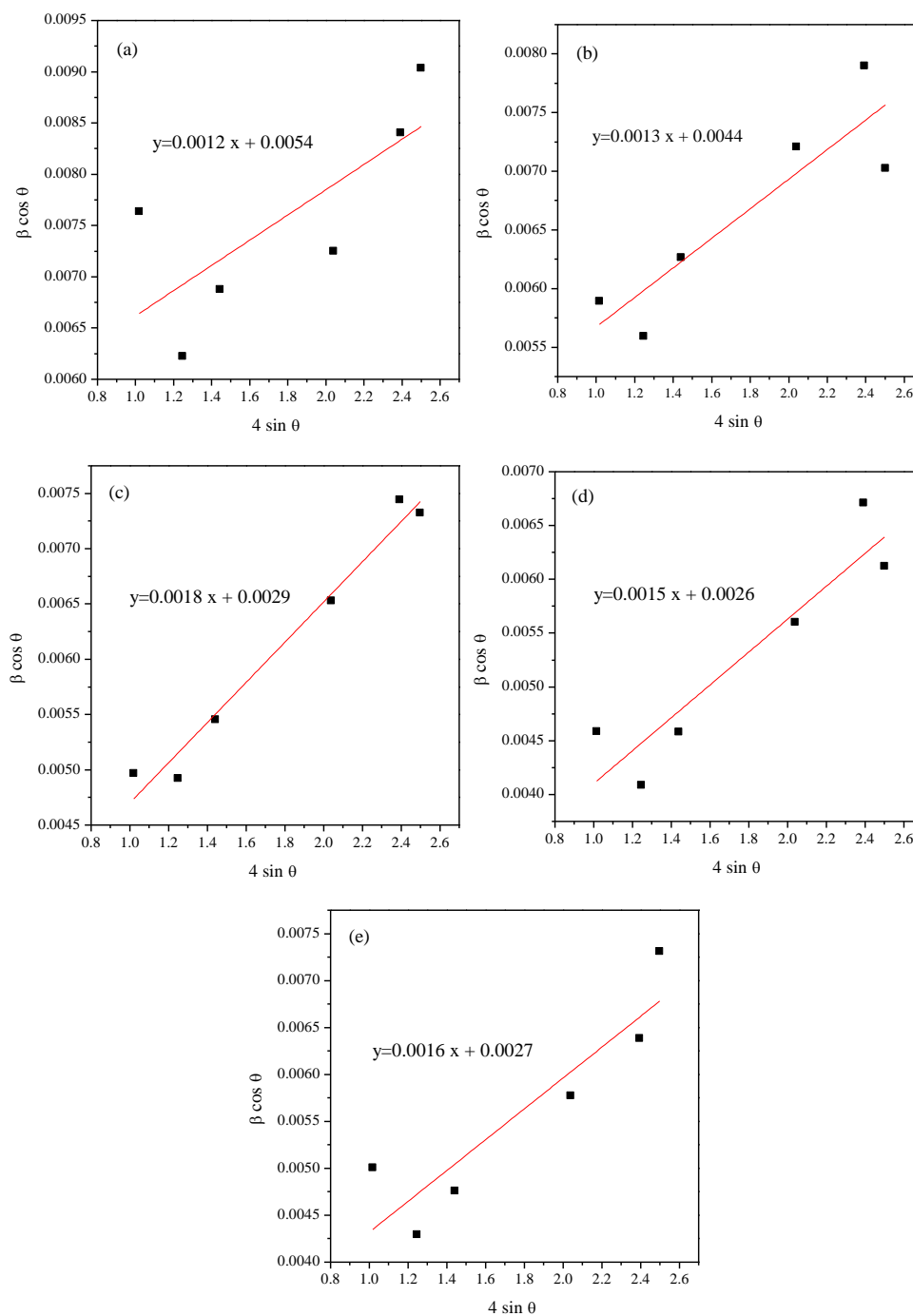
Hasil perhitungan densitas dislokasi dari sampel Cu_2O dapat dilihat pada tabel 4.2. Pada tabel 4.2 dapat dilihat densitas dislokasi berkurang seiring berkurangan ukuran kristal Cu_2O . Jumlah cacat yang direpresentasikan oleh densitas dislokasi nantinya akan berpengaruh pada performansi dari DSSC.



Gambar 4. 3 Hubungan konsentrasi NaOH , parameter kisi, dan volume cell

Berdasarkan pola difraksi material, cacat pada material yang mungkin terjadi diklasifikasikan menjadi dua. Cacat jenis pertama meliputi cacat titik, dislokasi kecil yang berulang, dan endapan yang menyebabkan perubahan pada *integral intensity*, pergeseran posisi puncak, dan *diffuse scattering*. Cacat jenis

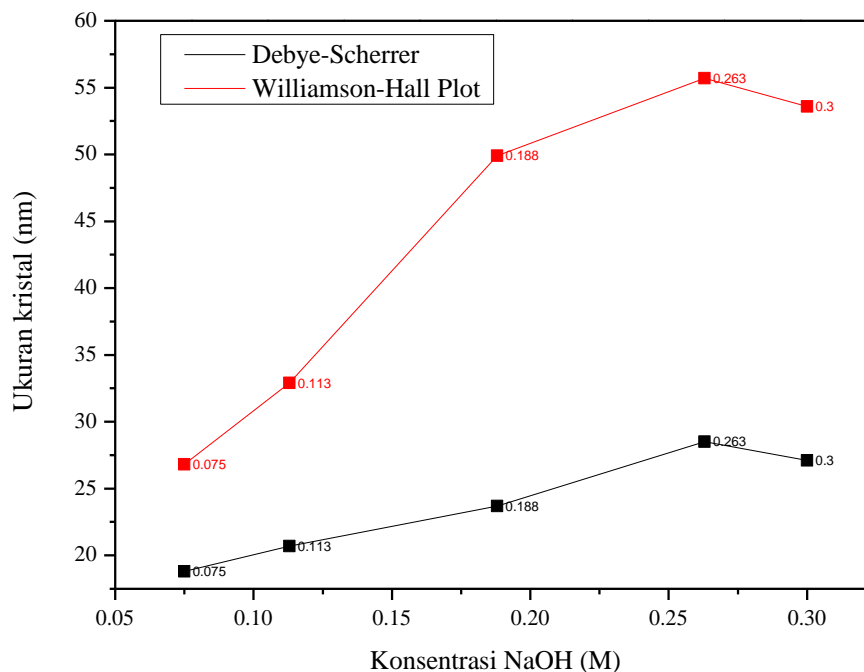
kedua yaitu cacat yang menyebabkan pergeseran asimetris puncak. Cacat yang termasuk pada jenis kedua ini adalah dislokasi, disklinasi, dipole disklinasi, *stacking faults*, *twins fault*, *boundaries*, *long cylinder-like chains of impurities*, dan lain-lain (Shafi & Bose, 2015).



Gambar 4. 4 Williamson- Hall Plot dari Cu_2O dengan konsentrasi NaOH (a) 0,075 M, (b) 0,113 M, (c) 0,188 M, (d) 0,263 M, dan (e) 0,3 M

Tabel 4. 2 Rata-rata ukuran kristal, *microstrain*, dan densitas dislokasi Cu₂O

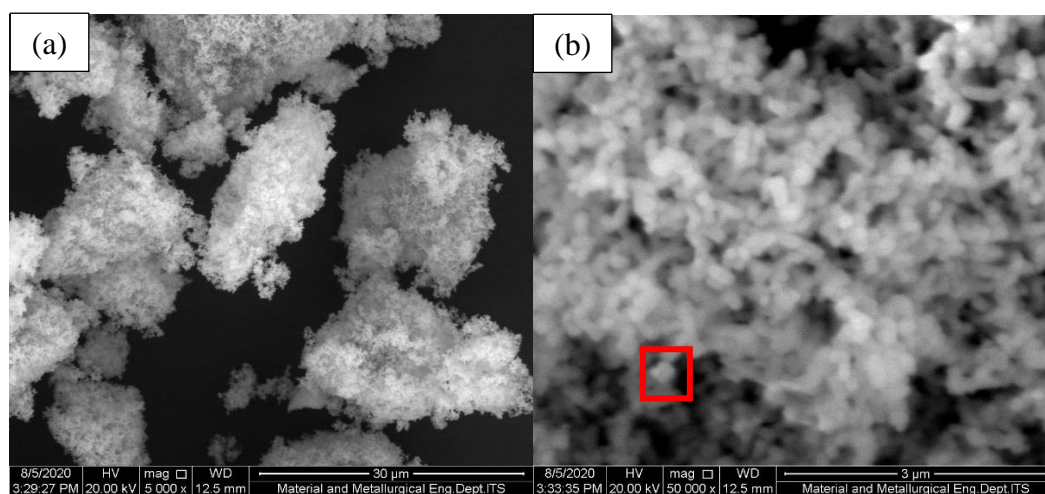
Sampel	Debye-Scherrer		Williamson-Hall Plot		
	Rata-rata ukuran kristal (nm)	Densitas dislokasi ($\delta \text{ nm}^{-2} \times 10^{-3}$)	Ukuran kristal (nm)	<i>Micro-strain</i> ($\epsilon \times 10^{-3}$)	Densitas dislokasi ($\delta \text{ nm}^{-2} \times 10^{-3}$)
1	18,8	4,2	26,8	1,2	1,39
2	20,7	3,2	32,9	1,3	0,92
3	23,7	2,6	49,9	1,8	0,40
4	28,5	1,9	55,7	1,5	0,32
5	27,1	2,2	53,6	1,6	0,35

**Gambar 4. 5** Hubungan antara konsentrasi NaOH dan ukuran kristal Cu₂O

4.2 Pengujian SEM

Scanning Electron Microscopy (SEM) dari Cu₂O menunjukkan terbentuknya morfologi nanopartikel namun menggumpal (terbentuk agregat). Hal ini menunjukkan bahwa terjadi proses aglomerasi saat sintesis sehingga terbentuk gumpalan. Saat konsentrasi NaOH 0,3 M terbentuk agregat dengan ukuran rata-rata

sebesar 11 μm dan ukuran partikel rata-rata sebesar 169 nm dengan bentuk partikel menyerupai kubus (Gambar 4.6 (a) dan (b)) . Ukuran partikel Cu_2O dan agregat pada konsentrasi NaOH lainnya dapat dilihat pada tabel 4.3 dan tabel 4.4. Dari tabel 4.3 dapat dilihat semakin besar konsentrasi NaOH, ukuran rata-rata partikel Cu_2O meningkat. Peningkatan konsentrasi NaOH menyebabkan ukuran partikel akan meningkat sampai konsentrasi NaOH tertentu kemudian mengalami penurunan karena adanya kompetisi antara reaksi redoks dan kompleksasi dari OH^- (Chen & Xue, 2012). Penambahan konsentrasi NaOH pada saat sintesis menyebabkan $\text{Cu}(\text{OH})_2$ dan $\text{Cu}(\text{OH})_4^{2-}$ yang terbentuk lebih banyak (Thoka, Lee, & Huang, 2019). Hal ini akan mempengaruhi laju reduksi Cu^{2+} , laju nukleasi , dan pertumbuhan Cu_2O seeds sehingga didapatkan ukuran yang berbeda(Cao et al., 2014).



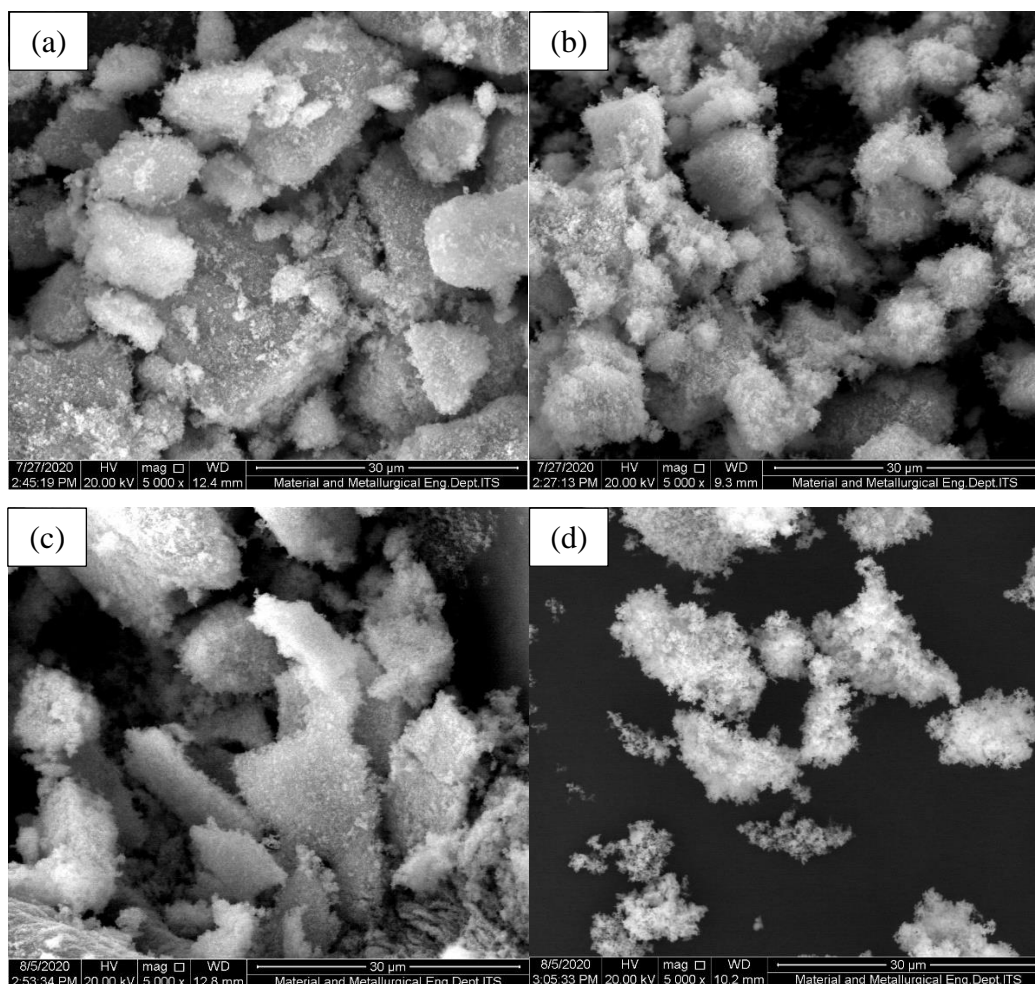
Gambar 4. 6 SEM Cu_2O dengan 0,3 M NaOH pada perbesaran (a) 5000x dan (b) 50000x

Tabel 4. 3 Diameter Cu_2O nanopartikel dengan variasi penambahan konsentrasi NaOH menggunakan *software* ImageJ

Sampel Cu_2O	Minimum (nm)	Maksimum (nm)	Rata-rata (nm)
NaOH 0,075 M	48	177	97
NaOH 0,113 M	71	184	119
NaOH 0,188 M	85	222	140
NaOH 0,263 M	101	256	162
NaOH 0,3M	129	252	169

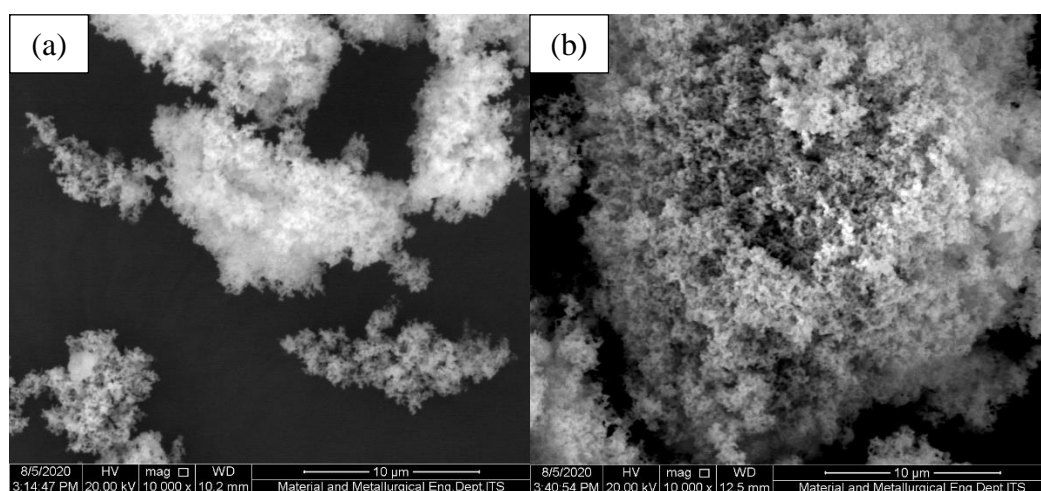
Tabel 4. 4 Ukuran agregat dari Cu_2O

Sampel Cu_2O	Minimum (μm)	Maksimum (μm)	Rata-rata (μm)
NaOH 0,075 M	2,5	15,5	7,3
NaOH 0,113 M	3,2	13,5	7,1
NaOH 0,188 M	4,2	17,9	10,9
NaOH 0,263 M	4,6	17,6	8,3
NaOH 0,3 M	4,9	23,5	11

**Gambar 4. 7** SEM Cu_2O dengan konsentrasi NaOH (a) 0,075 M (b) 0,113 M (c) 0,188 M (d) 0,263 M

Saat konsentrasi NaOH sebesar 0,075 M dan 0,113 M terbentuk agregat yang saling menempel (gambar 4.7(a) dan (b)). Sedangkan pada konsentrasi NaOH

0,188 M terdapat agregat yang berbentuk pipih-lebar seperti lembaran kecil (gambar 4.7 (c)). Pada konsentrasi NaOH sebesar 0,263 M dan 0,3 M agregat yang terbentuk seperti gumpalan yang saling lepas sehingga batas antar agregat terlihat jelas (gambar 4.7(d);gambar 4.6(a)). Agregat yang terbentuk menyebabkan ukuran Cu_2O menjadi lebih besar pada skala mikro sehingga akan mengurangi kemampuan penyerap pewarna oleh semikonduktor. Penyerapan pewarna yang rendah akan mempengaruhi *light harvesting* yang rendah sehingga *photocurrent* yang dihasilkan DSSC akan rendah (Al-kahlout, 2015). Terbentuknya agregat memungkinkan terbentuknya cacat pada material semakin tinggi dapat dilihat pada analisis XRD menunjukkan nilai densitas dislokasi yang tinggi.



Gambar 4. 8 SEM Cu_2O dengan perbesaran 10000x dengan konsentrasi NaOH (a) 0,263 M (b) 0,3 M

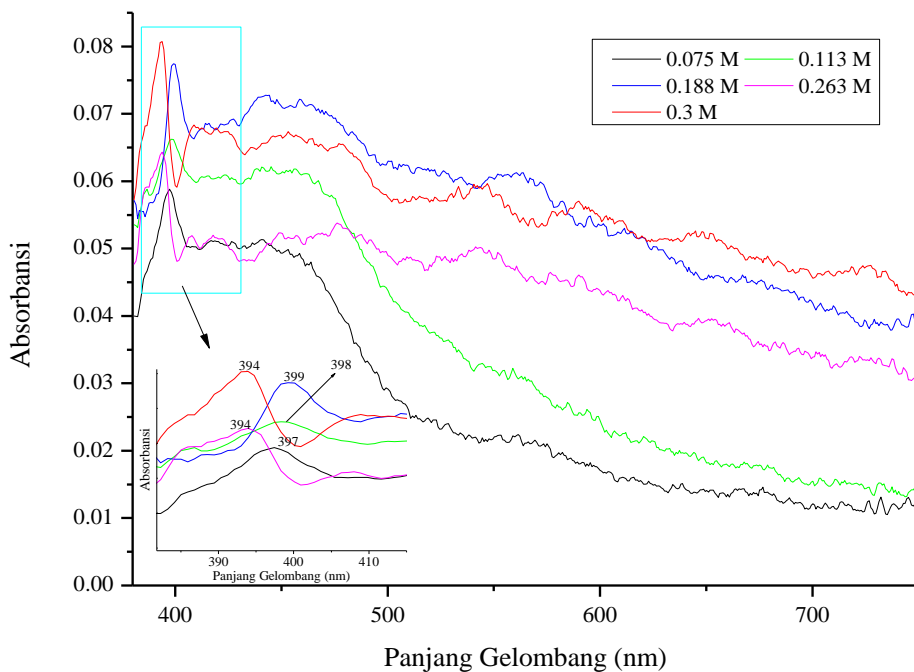
Pada perbesaran 10000x Cu_2O dengan 0,3 M NaOH memiliki porositas yang lebih tinggi dibandingkan konsentrasi NaOH 0,263 M (gambar 4.8). Sedangkan pada konsentrasi NaOH 0,075 M, 0,113 M, dan 0,188 M agregat yang terbentuk lebih padat. Porositas dari Cu_2O mempengaruhi penyerapan pewarna oleh semikonduktor sehingga berpengaruh pada *photocurrent* yang dihasilkan DSSC.

4.3 Pengujian UV-Vis

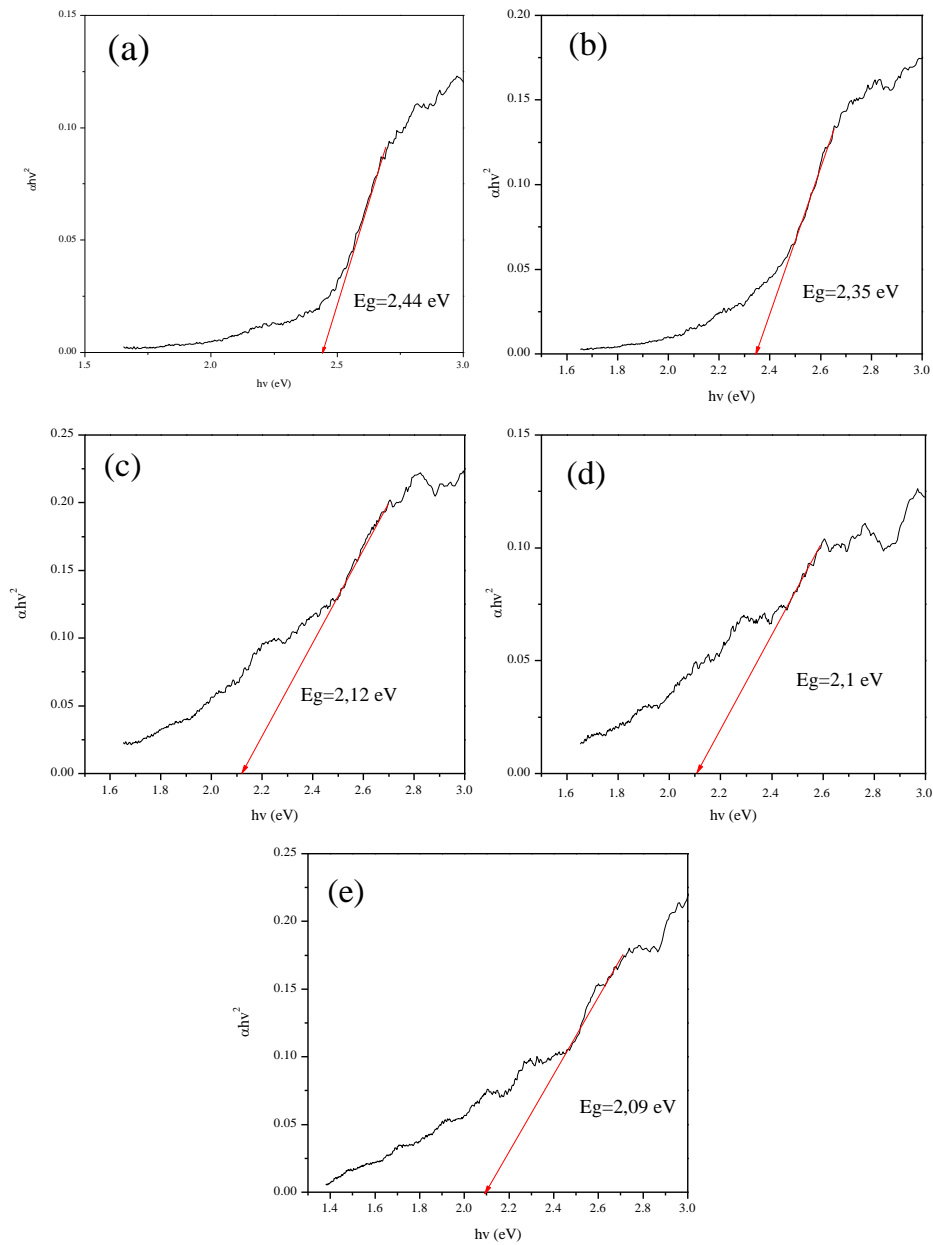
Untuk mengetahui pengaruh konsentrasi NaOH terhadap sifat optik Cu_2O dilakukan pengujian UV-vis pada panjang gelombang 380 nm-750 nm. Hasil pengujian UV-vis berbentuk spektrum absorbansi cahaya pada gambar 4.9. Spektrum uv-vis dari Cu_2O dengan konsentrasi NaOH 0,075 M, 0,113 M, 0,188 M,

0,263 M, dan 0,3 M memiliki puncak pada panjang gelombang 397 nm, nm, 398 399 nm, 394 nm dan 394 nm secara berturut-turut. Nilai absorbansi tertinggi dimiliki oleh Cu₂O dengan konsentrasi NaOH 0,3 M.

Nilai absorbansi cahaya pada hasil pengujian UV-vis dapat digunakan untuk mengetahui nilai *optical band gap* dari Cu₂O dengan metode *Tauc Plot*. Nilai *optical band gap* didapatkan dengan menarik garis ekstrapolasi pada daerah linier ($h\nu$) dari grafik hubungan sebagai absis ke sumbu $(\alpha h\nu)^2 = 0$ (Ursu et al., 2018). *Optical band gap* Cu₂O didapatkan sebesar 2,44 eV, 2,35 eV, 2,12 eV, 2,1 eV, dan 2,09 eV untuk variasi konsentrasi NaOH sebesar 0,075 M, 0,113 M, 0,188 M, 0,263 M, dan 0,3 M secara berturut-turut pada *Tauc plot* Cu₂O gambar 4.10. *Optical band gap* Cu₂O *nanocube* yang disintesis pada penelitian ini tidak jauh berbeda dibandingkan dengan *optical band gap* Cu₂O yaitu sebesar 2,17 eV untuk *bulk material* (Singh et al., 2007). *Optical band gap* yang didapat tidak jauh dari penelitian Cu₂O *nanocube* dengan *room temperature synthesis* yaitu sebesar 2,34 eV (Wang et al., 2004). Untuk perbandingan *band gap* Cu₂O dari penelitian lain dapat dilihat pada tabel 4.4.



Gambar 4. 9 Spektrum absorbansi UV-vis

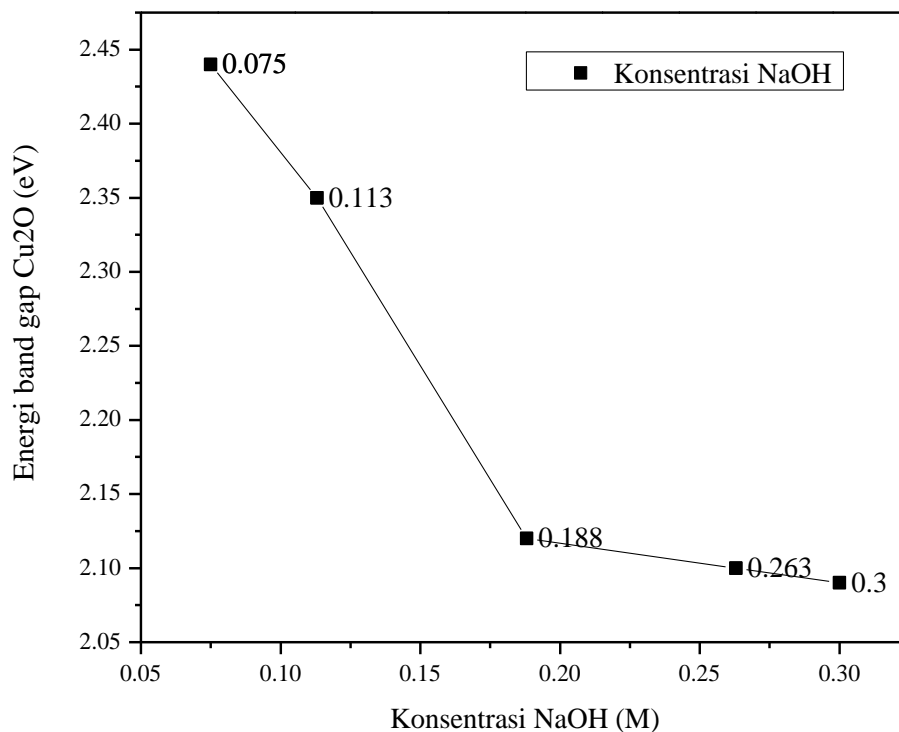


Gambar 4. 10 Tauc plot Cu₂O dengan konsentrasi NaOH (a) 0,075 M (b) 0,113 M (c) 0,188 M (d) 0,263 M (e) 0,3 M

Spektrum asorbansi dari Uv-vis dapat digunakan untuk mengetahui ukuran dari Cu₂O dilihat dari pergeseran intensitas absorbansi pada panjang gelombang warna merah ke *near-infrared*. Pada panjang tersebut seharusnya tidak ada cahaya yang terserap namun pada spektrum hasil absorbansi hasil uji menunjukkan terdapat penyerapan. Hal ini dapat dijelaskan dengan teori *Mie Scattering* dimana suatu partikel yang memiliki ukuran mendekati/sama dengan panjang gelombang cahaya

yang datang maka *resonant scattering* akan terjadi (Zhang et al., 2008). *Resonant scattering* ini dibaca oleh spektrofotometer sebagai absorbansi cahaya sehingga spektrum absorbansi bergeser ke atas (tidak berhimpit dengan sumbu x). Dapat disimpulkan apabila ada pergeseran spektra absorbansi pada panjang gelombang yang seharusnya tidak terdapat absorbansi adalah efek ukuran partikel yang besarnya sesuai dengan panjang gelombang cahaya. Hal ini sesuai dengan hasil pengujian SEM dimana didapatkan ukuran partikel yang lebih besar dikarenakan terjadi proses aglomerasi.

Hubungan konsentrasi NaOH yang digunakan untuk sintesis Cu₂O terhadap nilai *optical band gap* Cu₂O dapat dilihat pada gambar 4.11. Semakin kecil konsentrasi NaOH maka semakin besar nilai *optical band gap*-nya.



Gambar 4. 11 Hubungan konsentrasi NaOH yang digunakan untuk sintesis Cu₂O terhadap *band gap* Cu₂O.

4.4 *Driving Force of Hole Injection*

Kesesuaian level energi semikonduktor dan pewarna menentukan performansi dari DSSC sehingga perlu dilakukan analisis. Level energi antara semikonduktor pada fotokatoda dan pewarna mempengaruhi *driving force of hole*

injection dari DSSC. *Driving force of hole injection* akan mempengaruhi J_{sc} yang dihasilkan oleh DSSC tipe p. *Driving force of hole injection* dapat dianalisis menggunakan persamaan Rehm-Weller pada persamaan (4.4). Persamaan (4.4) menyatakan energi bebas Gibbs dari injeksi *hole* (ΔG_{inj}).

$$\Delta G_{inj} = e[E_{VB}(Cu_2O) - (E_{0-0}Dye + E_{red} Dye)] \quad (4.4)$$

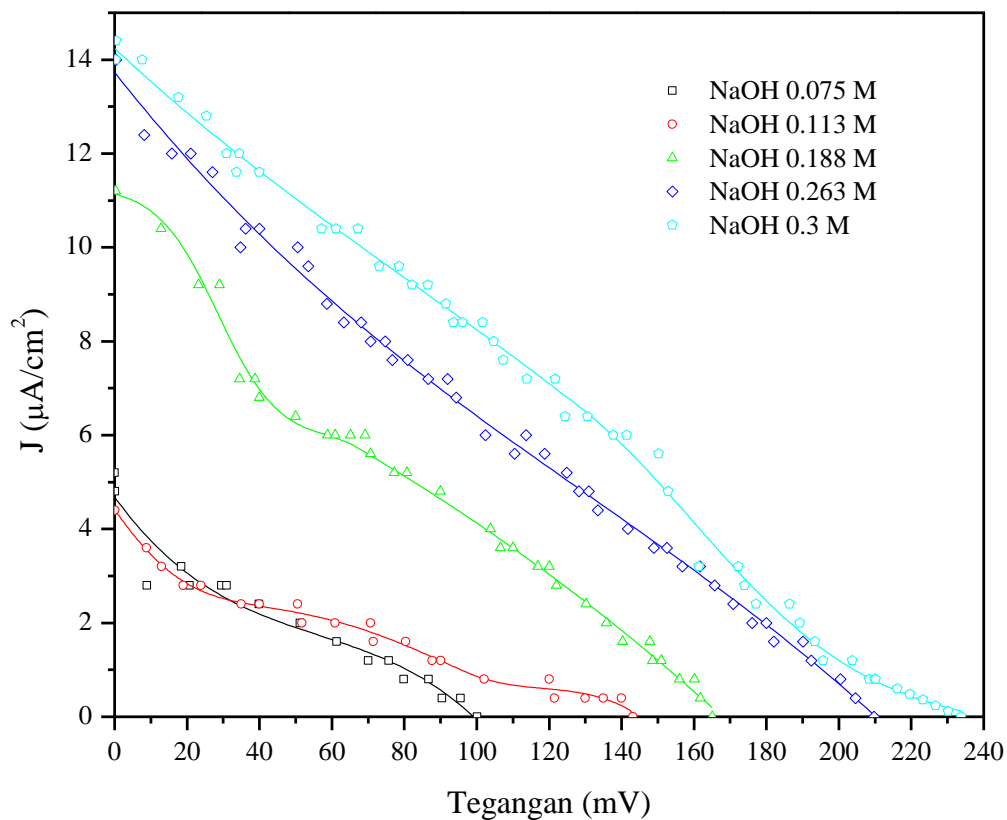
Dimana $E_{VB}(Cu_2O)$ adalah potensial dari pita valensi Cu_2O , E_{0-0} adalah energi dari pewarna, E_{red} adalah potensial reduksi dari pewarna (Pellegrin et al., 2011). Cu_2O dari beberapa penelitian yang telah dilakukan pada tabel 4.5 memiliki energi bebas Gibbs injeksi (ΔG_{inj}) yang eksergonik ditunjukkan dengan nilai ΔG_{inj} yang negatif. Untuk ΔG_{inj} yang negatif menunjukkan bahwa pewarna yang digunakan sesuai dengan level energi dari Cu_2O . Sehingga Cu_2O memungkinkan untuk dijadikan material fotokatoda dari DSSC

Tabel 4. 5 Energi Bebas Gibbs dari Cu_2O

No	$E_{VB} Cu_2O$ (V vs NHE)	$E_g Cu_2O$ (eV)	E_{0-0} (V) N719 dalam Etanol	E_{red} (V)	$\Delta G_{inj}(eV)$
1	1 (Marschall, 2014)	2,1	2,03 (Kim et al., 2014)	-0,6 (Daeneke et al., 2011)	-0,43
2	0,46 (Bessekhouad et al., 2005)	2			-0,97
3	2,03 (M. Singh et al., 2018)	2,45			0,6
4	1,88 (Kumar et al., 2019)	2,12			0,45
5	1,23	2,54			-0,2

No	E_{VB} Cu ₂ O (V vs NHE)	E_g Cu ₂ O (eV)	E_{0-0} (V) N719 dalam Etanol	E_{red} (V)	ΔG_{inj} (eV)
	(Basnet & Zhao, 2016)				
6	0,8 (Sharma et al., 2014)	2,3			-0,63

4.5 Pengujian I-V



Gambar 4. 12 Kurva J-V DSSC dengan fotokatoda Cu₂O

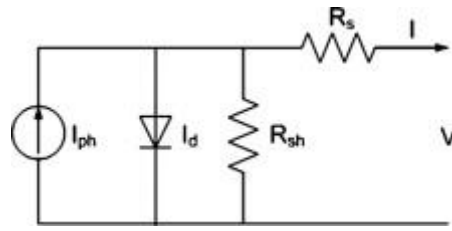
Gambar 4.12 menunjukkan kurva rapat arus dan tegangan dari DSSC dengan fotokatoda Cu₂O dengan variasi konsentrasi NaOH pada saat sintesis. Dari kurva rapat arus dan tegangan didapatkan nilai V_{oc} (tegangan *open circuit*), J_{sc} (arus *short circuit*), P_{max} (daya maksimum yang dihasilkan) dan nilai FF (*fill factor*). Efisiensi

terbesar didapatkan pada Cu₂O dengan konsentrasi NaOH 0,3 M pada saat sintesis yaitu sebesar 0,00119% dengan J_{sc} sebesar 14,24 (μA.cm⁻²) dan V_{oc} sebesar 233,7 mV. Performansi secara keseluruhan dari setiap sampel Cu₂O dapat dilihat pada tabel 4.6. Pada tabel 4.6 menunjukkan semakin besar konsentrasi NaOH yang digunakan nilai efisiensinya semakin tinggi. Hal ini menunjukkan hubungan terhadap nilai absorbansi cahaya dari Cu₂O. Sedangkan untuk pengukuran I-V pada kondisi gelap tidak menghasilkan arus. Berdasarkan analisis termodinamik, dapat dipastikan arus yang terukur berasal dari injeksi *hole* yang telah dibahas sebelumnya.

Tabel 4. 6 Performansi DSSC dengan fotokatoda Cu₂O

Fotokatoda Cu₂O dengan konsentrasi NaOH	V_{oc} (mV)	J_{sc} (μA.cm⁻²)	P_{max} (μW)	P_{cahaya} (W.m⁻²)	FF(%)	η
0,075 M	100,1	4,68	0,0247	747,2145	21,0627	0,00013%
0,113 M	143,1	4,4	0,0318	792,6470	20,2120	0,00017%
0,188 M	165	11,13	0,1044	772,0588	22,7394	0,00057%
0,263 M	209,7	13,73	0,1609	763,9706	22,3563	0,00089%
0,3 M	233,7	14,24	0.2129	755,8823	25,5935	0,00119%

Kurva J-V pada gambar 4.12 tidak menunjukkan kurva yang ideal. Hal ini disebabkan adanya hambatan parasit yaitu hambatan seri (R_s) dan hambatan paralel (R_{sh}) pada DSSC. Hambatan seri pada DSSC mewakili hambatan kaca TCO, elektrolit, dan elektroda lawan (Liu et al., 2010). Sedangkan hambatan paralel mewakili cacat kristal pada permukaan maupun *bulk* semikonduktor dan jalur alternatif yang lebih konduktif lainnya sehingga arus yang mengalir pada rangkaian beban berkurang (Dhass, Natarajan, & Ponnusamy, 2012; Sara, 2017). Pada sel surya ideal, hambatan seri bernilai nol (tidak ada hambatan seri) dan hambatan paralel bernilai tak hingga (Yuhas & Yang, 2009). Pada gambar 4.13 menunjukan rangkaian ekuivalen sel surya menggunakan dioda tunggal.



Gambar 4. 13 Rangkaian ekuivalen dioda tunggal dari sel surya(Ghani & Duke, 2011)

Untuk mengetahui nilai R_s dan R_{sh} pada DSSC dapat digunakan pendekatan dengan persamaan berikut:

$$FF = FF_0 \left\{ \left(1 - 1.1r_s + \frac{r_s^2}{5.4} \right) \right\} \left\{ 1 - \frac{v_{oc} + 0.7FF_0}{v_{oc}r_{sh}} \left[1 - 1.1r_s + \frac{r_s^2}{5.4} \right] \right\} \quad (4.2)$$

dengan mendefinisikan nilai r_s (*normalized series resistance*) sebagai R_s/R_{CH} , r_{sh} (*normalized shunt resistance*) sebagai R_{sh}/R_{CH} , v_{oc} (*normalized voltage*) sebagai $v_{oc} = V_{oc}/(nkT/q)$, FF sebagai nilai *fill factor* yang dipengaruhi oleh hambatan parasit, dan FF_0 sebagai nilai *fill factor* yang tidak dipengaruhi oleh hambatan parasit(Green, 1992; Honsberg & Bowden, 2019). Pada rangkaian ekuivalen solar sel umumnya, hambatan karakteristik (R_{CH}) dari sel surya dapat ditentukan dari turunan dari kurva J-V sehingga dapat dirumuskan pada persamaan (4.3).

$$R_{CH} = \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \quad (4.3)$$

R_{CH} merupakan hambatan dari sel surya saat mencapai daya maksimum. Jika hambatan seri jauh lebih besar dari atau hambatan paralel jauh lebih kecil dari R_{CH} , maka akan mengurangi performansi DSSC (Yuhas & Yang, 2009). Estimasi nilai hambatan seri dan paralel pada DSSC dengan fotokatoda Cu_2O dapat dilihat pada tabel 4.5. Nilai estimasi didapatkan dari simulasi pada pveducation.org menggunakan persamaan (4.2)(Honsberg & Bowden, 2019).

Nilai hambatan seri yang besar mempengaruhi perpindahan elektron (dari elektrolit ke elektroda lawan, kaca TCO ke semikonduktor) pada kondisi *short circuit* dan mempermudah terjadinya rekombinasi pada DSSC. Sedangkan hambatan paralel menunjukkan adanya rekombinasi pada daerah cacat kristal

sehingga elektron atau hole terjebak pada *energy state* di daerah *forbidden* (Honsberg & Bowden, 2019).

Tabel 4. 7 Nilai hambatan karakteristik dan estimasi nilai R_s dan R_{sh} dari DSSC dengan fotokatoda Cu_2O

Fotokatoda Cu_2O dengan konsentrasi NaOH	R_{CH} (Ω)	R_s (Ω)	R_{sh} (Ω)
0,075 M	85556	34000	101500
0,113 M	130090	50000	120800
0,188 M	59299	23700	63500
0,263 M	61092	24400	60400
0,3 M	65646	26250	77560

Berdasarkan hasil uji XRD dan uji I-V dapat dianalisis pengaruh cacat kristal (dislokasi) terhadap efisiensi DSSC. Dislokasi pada Cu_2O biasanya diakibatkan kekosongan atom Cu (*copper vacancy*) (Chen, 2013). *Copper vacancy* berkontribusi pada hambatan paralel dari DSSC. Cu_2O dengan konsentrasi NaOH sebesar 0,075 M memiliki densitas dislokasi yang paling tinggi dibandingkan Cu_2O dengan variasi konsentrasi NaOH lainnya sebesar $1,39 \times 10^{-3} \text{ nm}^{-2}$ yang menyebabkan nilai FF yang rendah. Sedangkan hambatan seri yang tinggi dapat disebabkan ukuran butir yang kecil pada kristal Cu_2O dan mobilitas pembawa muatan yang rendah (Chen, 2013).

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan analisa penelitian yang telah dilakukan maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

- a. Penambahan konsentrasi NaOH berpengaruh pada meningkatnya ukuran partikel. Semakin kecil ukuran partikel maka nilai *band gap* semakin besar. Didapatkan energi celah pita optik Cu₂O sebesar 2,44 eV, 2,35 eV, 2,12 eV, 2,1 eV, dan 2,09 eV untuk variasi konsentrasi NaOH sebesar 0,075 M, 0,113 M, 0,188 M, 0,263 M, dan 0,3 M secara berturut-turut.
- b. Performansi DSSC didapatkan yang paling baik pada konsentrasi NaOH sebesar 0,3 M ditunjukkan dengan efisiensi DSSC sebesar 0,00119 %. Penambahan konsentrasi NaOH mempengaruhi nilai band gap dari Cu₂O sehingga memungkinkan menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian yang lebih lanjut adalah sebagai berikut :

- a. Penggunaan jenis pewarna untuk Cu₂O disesuaikan dengan pita energi dari Cu₂O sehingga dapat meningkatkan efisiensi DSSC
- b. Lama perendaman fotokatoda Cu₂O ke dalam pewarna perlu diperhatikan
- c. Dianalisis sifat elektrokimia dari semikonduktor, pewarna, dan elektrolit.
- d. Pengukuran Uv-vis dilakukan pada *thin-film*.
- e. Dilakukan pengujian dengan FESEM untuk mengetahui lebih jelas morfologi dari Cu₂O

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Aguilar, M. S., & Rosas, G. (2019). Facile synthesis of Cu₂O particles with different morphologies. *Journal of Solid State Chemistry*, 270(May 2018), 192–199. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2018.11.019>
- Al-kahlout, A. (2015). Thermal treatment optimization of ZnO nanoparticles-photoelectrodes for high photovoltaic performance of dye-sensitized solar cells. *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*, 17, 66–72. <https://doi.org/10.1016/j.jaubas.2014.02.004>
- Badr, L., & Epstein, I. R. (2017). Size-controlled synthesis of Cu₂O nanoparticles via reaction-diffusion. *Chemical Physics Letters*, 669, 17–21. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2016.11.050>
- Bagal, I. V, Chodankar, N. R., Afifi, M., Waseem, A., Ali, M., Kim, D., & Ryu, S. (2019). Science Direct Cu₂O as an emerging photocathode for solar water splitting - A status review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(39), 21351–21378. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.06.184>
- Basnet, P., & Zhao, Y. (2016). Tuning the Cu_xO nanorod composition for efficient visible light induced photocatalysis. *Catalysis Science and Technology*, 6(7), 2228–2238. <https://doi.org/10.1039/c5cy01464f>
- Baturay, S., Tombak, A., Kaya, D., & Selim, Y. (2016). Modification of electrical and optical properties of CuO thin films by Ni doping. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s10971-015-3953-4>
- 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. <https://doi.org/10.1039/c9tc01822k>
- Bessekhouad, Y., Robert, D., & Weber, J. V. (2005). Photocatalytic activity of Cu₂O/TiO₂, Bi₂O₃/TiO₂ and ZnMn₂O₄/TiO₂ heterojunctions. *Catalysis Today*, 101(3-4 SPEC. ISS.), 315–321. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2005.03.038>
- Bindu, P., & Thomas, S. (2014). Estimation of lattice strain in ZnO nanoparticles : X-ray peak profile analysis. *Journal of Theoretical and Applied Physics*, 8,

- 123–134. <https://doi.org/10.1007/s40094-014-0141-9>
- Callister, J. W. D., & Rethwisch, D. G. (2014). *Materials Science and Engineering* (9th ed.; D. Sayre, Ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Cao, Y., Xu, Y., Hao, H., & Zhang, G. (2014). Room temperature additive-free synthesis of uniform Cu₂O nanocubes with tunable size from 20 nm to 500 nm and photocatalytic property. *Materials Letters*, *114*, 88–91. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2013.09.102>
- Chang, Y., Teo, J. J., & Zeng, H. C. (2005). Formation of colloidal CuO nanocrystallites and their spherical aggregation and reductive transformation to hollow Cu₂O nanospheres. *Langmuir*, *21*(3), 1074–1079. <https://doi.org/10.1021/la0476711>
- Chen, K., & Xue, D. (2012). pH-assisted crystallization of Cu₂O: chemical reactions control the evolution from nanowires to polyhedra. *CrystEngComm*, *14*, 8068–8075. <https://doi.org/10.1039/c2ce26084k>
- Chen, L. (2013). Review of preparation and optoelectronic characteristics of Cu₂O-based solar cells with nanostructure. *Materials Science in Semiconductor Processing*, *16*(5), 1172–1185. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2012.12.028>
- Daeneke, T., Kwon, T. H., Holmes, A. B., Duffy, N. W., Bach, U., & Spiccia, L. (2011). High-efficiency dye-sensitized solar cells with ferrocene-based electrolytes. *Nature Chemistry*, *3*(3), 211–215. <https://doi.org/10.1038/nchem.966>
- De Caro, C. (2015). UV / VIS Spectrophotometry. In *Mettler-Toledo International*.
- Dhass, A. D., Natarajan, E., & Ponnusamy, L. (2012). Influence of shunt resistance on the performance of solar photovoltaic cell. *2012 International Conference on Emerging Trends in Electrical Engineering and Energy Management (ICETEEEM)*, 382–386. <https://doi.org/10.1109/ICETEEEM.2012.6494522>
- Dini, D., Halpin, Y., Vos, J. G., & Gibson, E. A. (2015). The influence of the preparation method of NiOx photocathodes on the efficiency of p-type dye-sensitized solar cells. *Coordination Chemistry Reviews*, *304–305*, 179–201. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2015.03.020>
- Du, S., Cheng, P., Sun, P., Wang, B., Cai, Y., Liu, F., ... Lu, G. (2014). Highly efficiency p-type dye sensitized solar cells based on polygonal star-

- morphology Cu₂O material of photocathodes. *Chemical Research in Chinese Universities*, 30(4), 661–665. <https://doi.org/10.1007/s40242-014-4020-3>
- Ekasari, V. G. Y. (2013). Fabrikasi Dssc dengan Dye Ekstrak Jahe Merah (Zingiber Officinale Linn Var. Rubrum) Variasi Larutan TiO₂ Nanopartikel Berfase Anatase dengan Teknik Pelapisan Spin Coating. *Jurnal Sains Dan Seni ITS*, 2(1), B15–B20. <https://doi.org/10.12962/j23373520.v2i1.2513>
- Fasasi, A. Y., Osagie, E., Pelemo, D., Obiajunwa, E., Ajenifuja, E., Ajao, J., ... Adeoye, A. E. (2018). Effect of Precursor Solvents on the Optical Properties of Copper Oxide Thin Films Deposited Using Spray Pyrolysis for Optoelectronic Applications. *American Journal of Materials Synthesis and Processing*, 3(2), 12–22. <https://doi.org/10.11648/j.ajmsp.20180302.12>
- Ghani, F., & Duke, M. (2011). Numerical determination of parasitic resistances of a solar cell using the Lambert W-function. *Solar Energy*, 85(9), 2386–2394. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.07.001>
- Gong, J., Liang, J., & Sumathy, K. (2012). Review on dye-sensitized solar cells (DSSCs): Fundamental concepts and novel materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 5848–5860. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.04.044>
- 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(September), 234–246. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.097>
- Gou, L., & Murphy, C. J. (2004). Controlling the size of Cu₂O nanocubes from 200 to 25 nm. *Journal of Materials Chemistry*, 735–738. <https://doi.org/10.1039/b311625e>
- Green, M. A. & U. of N. S. W. (1992). *Solar cells : operating principles, technology and system applications*. University of New South Wales Kensington, N.S.W.
- Gupta, D., Meher, S. R., Illyaskutty, N., & Alex, Z. C. (2018). Facile synthesis of Cu₂O and CuO nanoparticles and study of their structural, optical and electronic properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 743, 737–745. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.01.181>
- Honsberg, C., & Bowden, S. (2019). Impact of Both Series and Shunt Resistance.

- Retrieved June 25, 2020, from <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/impact-of-both-series-and-shunt-resistance>
- Irfan, H., Racik, K. M., & Anand, S. (2018). Microstructural evaluation of CoAl_2O_4 nanoparticles by Williamson–Hall and size–strain plot methods. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 6(1), 54–62. <https://doi.org/10.1080/21870764.2018.1439606>
- Kakiage, K., Aoyama, Y., Yano, T., Oya, K., Fujisawa, J. I., & Hanaya, M. (2015). Highly-efficient dye-sensitized solar cells with collaborative sensitization by silyl-anchor and carboxy-anchor dyes. *Chemical Communications*, 51(88), 15894–15897. <https://doi.org/10.1039/c5cc06759f>
- Karim, N. A., Mehmood, U., Zahid, H. F., & Asif, T. (2019). Nanostructured photoanode and counter electrode materials for efficient Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs). *Solar Energy*, 185(January), 165–188. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.057>
- Karmakar, S., Biswas, S., & Kumbhakar, P. (2020). Optical, structural, and catalytic properties of synthesized Cu_2O nanocubes. *Indian Journal of Physics*. <https://doi.org/10.1007/s12648-020-01714-6>
- Kaufmann, E. N. (2003). *Characterization of Materials*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Kim, J. J., Kang, M., Kwak, O. K., Yoon, Y. J., Min, K. S., & Chu, M. J. (2014). Fabrication and characterization of dye-sensitized solar cells for greenhouse application. *International Journal of Photoenergy*, 2014(II). <https://doi.org/10.1155/2014/376315>
- KorzHAVYI, P. A., & Johansson, B. (2011). Literature review on the properties of cuprous oxide Cu_2O and the process of copper oxidation. *Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co*, (October), 8–22.
- Kumar, S., Pal, S., Kuntail, J., Kumar De, A., & Sinha, I. (2019). Construction of a Visible Light Z-scheme Photocatalyst: Curcumin Functionalized $\text{Cu}_2\text{O}/\text{Ag}$ Nanocomposites. *ChemistrySelect*, 4(36), 10709–10718. <https://doi.org/10.1002/slct.201902612>
- Kuo, C. H., Chen, C. H., & Huang, M. H. (2007). Seed-mediated synthesis of monodispersed Cu_2O nanocubes with five different size ranges from 40 to 420

- nm. *Advanced Functional Materials*, 17(18), 3773–3780. <https://doi.org/10.1002/adfm.200700356>
- Liu, H., Zhou, Y., Klulinich, S., Li, J.-J., Qiao, S.-Z., & Du, X.-W. (2013). Scalable synthesis of hollow Cu₂O nanocubes with unique optical properties via a simple hydrolysis-based approach. *Journal of Materials Chemistry A*, 1(2), 302–307. <https://doi.org/10.1039/c2ta00138a>
- Liu, W., Hu, L., Dai, S., Guo, L., Jiang, N., & Kou, D. (2010). The effect of the series resistance in dye-sensitized solar cells explored by electron transport and back reaction using electrical and optical modulation techniques. *Electrochimica Acta*, 55(7), 2338–2343. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2009.11.065>
- Luo, F., Wu, D., Gao, L., Lian, S., Wang, E., Kang, Z., ... Xu, L. (2005). Shape-controlled synthesis of Cu₂O nanocrystals assisted by Triton X-100. *Journal of Crystal Growth*, 285(4), 534–540. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2005.09.032>
- Marschall, R. (2014). Semiconductor composites: Strategies for enhancing charge carrier separation to improve photocatalytic activity. *Advanced Functional Materials*, 24(17), 2421–2440. <https://doi.org/10.1002/adfm.201303214>
- Nikam, A. V., Arulkashmir, A., Keishnamoorthy, K., Kulkarni, A. A., & Prasad, B. L. V. (2014). pH-Dependent Single-Step Rapid Synthesis of CuO dan Cu₂O Nanoparticles from Same Precursor. *Crystal Growth & Design*. <https://doi.org/doi.org/10.1021/cg500394p>
- Patle, L. B., Labhane, P. K., Huse, V. R., & Chaudhari, A. L. (2015). Structural Analysis of Cu Doped TiO₂ Nanoparticles using Williamson-Hall Method. *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*, 5(5), 66–70.
- Pellegrin, Y., Le Pleux, L., Blart, E., Renaud, A., Chavillon, B., Szuwarski, N., ... Odobel, F. (2011). Ruthenium polypyridine complexes as sensitizers in NiO based p-type dye-sensitized solar cells: Effects of the anchoring groups. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 219(2–3), 235–242. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2011.02.025>
- Perera, I. R., Daeneke, T., Makuta, S., Yu, Z., Tachibana, Y., Mishra, A., ...

- Spiccia, L. (2015). Application of the tris(acetylacetonato)iron(III)/(II) redox couple in p-type dye-sensitized solar cells. *Angewandte Chemie - International Edition*, 54(12), 3758–3762. <https://doi.org/10.1002/anie.201409877>
- Sara, I. D. (2017). Effects of shunt and series resistances on the performance of a tandem solar cell. *Proceedings - 2017 International Conference on Electrical Engineering and Informatics: Advancing Knowledge, Research, and Technology for Humanity, ICELTICS 2017, 2018-Janua(ICELTICS)*, 159–162. <https://doi.org/10.1109/ICELTICS.2017.8253257>
- Shafi, P. M., & Bose, A. C. (2015). Impact of crystalline defects and size on X-ray line broadening: A phenomenological approach for tetragonal SnO₂ nanocrystals. *AIP Advances*, 5(5). <https://doi.org/10.1063/1.4921452>
- Shao, M. H., Tao, P., Song, C. W., Wu, S. H., & Cheng, M. R. (2014). Solvothermal Synthesis of Truncated Octahedron Cu₂O and Their Catalytic Application on The Degradation of Methylene Blue. *Global NEST*, 16(3), 578–586.
- Sharma, D., Verma, A., Satsangi, V. R., Shrivastav, R., & Dass, S. (2014). Nanostructured SrTiO₃ thin films sensitized by Cu₂O for photoelectrochemical hydrogen generation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(9), 4189–4197. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.12.201>
- Singh, D. P., Neti, N. R., Sinha, A. S. K., & Srivastava, O. N. (2007). Growth of different nanostructures of Cu₂O (nanothreads, nanowires, and nanocubes) by simple electrolysis based oxidation of copper. *Journal of Physical Chemistry C*, 111(4), 1638–1645. <https://doi.org/10.1021/jp0657179>
- Singh, M., Jampaiah, D., Kandjani, A. E., Sabri, Y. M., Della Gaspera, E., Reineck, P., ... Bansal, V. (2018). Oxygen-deficient photostable Cu₂O for enhanced visible light photocatalytic activity. *Nanoscale*, 10(13), 6039–6050. <https://doi.org/10.1039/c7nr08388b>
- Song, J., Chan, S., & Rodenbough, P. P. (2016). Size-Dependent Crystal Properties of Nanocuprite. *International Journal Of Applied Ceramic Technology*, 39(2), 389–394. <https://doi.org/10.1111/ijac.12486>
- Sun, S., Zhang, X., Song, X., Liang, S., Wang, L., & Yang, Z. (2012). Bottom-up assembly of hierarchical Cu₂O nanospheres: Controllable synthesis, formation mechanism and enhanced photochemical activities. *CrystEngComm*, 14(10),

3545–3553. <https://doi.org/10.1039/c2ce25071c>

- Thoka, S., Lee, A. T., & Huang, M. H. (2019). Scalable Synthesis of Size-Tunable Small Cu₂O Nanocubes and Octahedra for Facet-Dependent Optical Characterization and Pseudomorphic Conversion to Cu Nanocrystals [Research-article]. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 7(12), 10467–10476. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b00844>
- Ursu, D., Dabici, A., Vajda, M., Bublea, N.-C., Duteanu, N., & Miclau, M. (2018). Effect of Cu₂O Morphology on Photovoltaic Performance of P-Type Dye-Sensitized Solar Cells. *Annals of West University of Timisoara - Physics*, 60(1), 67–74. <https://doi.org/10.2478/awutp-2018-0007>
- Ursu, D., Vajda, M., & Miclau, M. (2019). Investigation of the p-type dye-sensitized solar cell based on full Cu₂O electrodes. *Journal of Alloys and Compounds*, 802, 86–92. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.180>
- Wang, Z., Chen, X., Liu, J., Mo, M., Yang, L., & Qian, Y. (2004). Room temperature synthesis of Cu₂O nanocubes and nanoboxes. *Solid State Communications*, 130(9), 585–589. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2004.03.028>
- Wang, Z., Wang, H., Wang, L., & Pan, L. (2009a). Controlled synthesis of Cu₂O cubic and octahedral nano-and microcrystals. *Crystal Research and Technology*, 44(6), 624–628. <https://doi.org/10.1002/crat.200900136>
- Wang, Z., Wang, H., Wang, L., & Pan, L. (2009b). One-pot synthesis of single-crystalline Cu₂O hollow nanocubes. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 70(3–4), 719–722. <https://doi.org/10.1016/j.jpccs.2009.02.011>
- Waseda, Y., Matsubara, E., & Shinoda, K. (2011). X-Ray Diffraction Crystallography. In *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-16635-8>
- Wei, L., Jiang, L., Yuan, S., Ren, X., Zhao, Y., Wang, Z., ... Li, D. (2016). Valence Band Edge Shifts and Charge-transfer Dynamics in Li-Doped NiO Based p-type DSSCs. *Electrochimica Acta*, 188, 309–316. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.12.026>
- Wick, R., & Tilley, S. D. (2015). Photovoltaic and Photoelectrochemical Solar Energy Conversion with Cu₂O. *Journal of Physical Chemistry C*, 119(47), 26243–26257. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b08397>

- Xu, H., & Wang, W. (2007). Template synthesis of multishelled Cu₂O hollow spheres with a single-crystalline shell wall. *Angewandte Chemie - International Edition*, 46(9), 1489–1492. <https://doi.org/10.1002/anie.200603895>
- Yang, A. L., Li, S. P., Wang, Y. J., Wang, L. Le, Bao, X. C., & Yang, R. Q. (2015). Fabrication of Cu₂O@Cu₂O core-shell nanoparticles and conversion to Cu₂O@Cu core-shell nanoparticles in solution. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 25(11), 3643–3650. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(15\)64005-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)64005-5)
- Yuhas, B. D., & Yang, P. (2009). Nanowire-Based All-Oxide Solar Cells. *Journal of American Chemical Society*, 94720(13), 3756–3761.
- Zhang, H., & Cui, Z. (2008). Solution-phase synthesis of smaller cuprous oxide nanocubes. *Materials Research Bulletin*, 43(6), 1583–1589. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2007.06.014>
- Zhang, J., Liu, J., Peng, Q., Wang, X., & Li, Y. (2006). Nearly monodisperse Cu₂O and CuO nanospheres: Preparation and applications for sensitive gas sensors. *Chemistry of Materials*, 18(4), 867–871. <https://doi.org/10.1021/cm052256f>
- Zhang, Q., Chou, T. P., Russo, B., Jenekhe, S. A., & Cao, G. (2008). Aggregation of ZnO Nanocrystallites for High Conversion Efficiency in Dye-Sensitized Solar Cells. *Angewandte Chemie*, 120(13), 2436–2440. <https://doi.org/10.1002/ange.200704919>

LAMPIRAN

LAMPIRAN A JCPDS 00-005-0667 (Cu₂O)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	0	3.02000	29.555	9.0
2	1	1	1	2.46500	36.419	100.0
3	2	0	0	2.13500	42.298	37.0
4	2	1	1	1.74300	52.455	1.0
5	2	2	0	1.51000	61.345	27.0
6	3	1	0	1.35020	69.571	1.0
7	3	1	1	1.28700	73.528	17.0
8	2	2	2	1.23300	77.326	4.0
9	4	0	0	1.06740	92.383	2.0
10	3	3	1	0.97950	103.705	4.0
11	4	2	0	0.95480	107.562	3.0
12	4	2	2	0.87150	124.228	3.0
13	5	1	1	0.82160	139.292	3.0

LAMPIRAN B Analisis struktur kristal dari data XRD

Data XRD dapat digunakan untuk menentukan struktur kristal. Analisis tipe struktur kristal untuk material dengan struktur kristal kubik dapat dianalisis menggunakan indeks miller. Untuk *simple cubic lattice*, difraksi dapat terjadi pada seluruh bidang kristal. Untuk struktur BCC, difraksi akan terjadi pada bidang kristal yang memiliki jumlah indeks miller ($h+k+l$) yang bernilai genap. Untuk struktur FCC, difraksi akan terjadi pada bidang kristal yang memiliki semuanya genap atau semuanya ganjil.

Tabel B 1 Aturan untuk menentukan bidang $[hkl]$ pada kristal kubik

<i>Bravais Lattice</i>	Refleksi yang terjadi	Indek refleksi untuk enam bidang pertama
BCC	$(h+k+l) = \text{genap}$	110, 200, 211, 220, 310, 222
FCC	(h, k, l) semua genap atau semua ganjil	111, 200, 220, 311, 222, 400
<i>Simple Cubic</i>	semua	100, 110, 111, 200, 210, 211

Untuk menentukan material tersebut memiliki struktur kristal BCC atau FCC dan digunakan analisis dari rasio $\sin^2\theta$. Berdasarkan persamaan Bragg,

$$\lambda = 2d \sin\theta$$

dan persamaan *d-spacing*,

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}}$$

didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{2a \sin\theta}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

Sehingga nilai rasio dari $\sin^2\theta$ dapat dihitung dari persamaan dibawah ini.

$$\frac{\sin^2\theta}{\sin^2\theta} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{h^2 + k^2 + l^2}$$

Untuk struktur kristal BCC, dua bidang difraksi pertama adalah (110) dan (200) sehingga didapatkan rasio $\sin^2\theta$ sebagai berikut:

$$\frac{\sin^2\theta}{\sin^2\theta} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{h^2 + k^2 + l^2} = \frac{1^2 + 1^2 + 0^2}{2^2 + 0^2 + 0^2} = 0,5$$

Dapat disimpulkan untuk struktur kristal BCC memiliki rasio $\sin^2\theta$ dua bidang pertama sebesar 0,5.

Untuk struktur kristal FCC, dua bidang difraksi pertama adalah (111) dan (200) sehingga didapatkan rasio $\sin^2\theta$ sebagai berikut:

$$\frac{\sin^2\theta}{\sin^2\theta} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{h^2 + k^2 + l^2} = \frac{1^2 + 1^2 + 1^2}{2^2 + 0^2 + 0^2} = 0,75$$

Dapat disimpulkan untuk struktur kristal FCC memiliki rasio $\sin^2\theta$ dua bidang pertama sebesar 0,75.

Tabel B 2 Sudut difraksi Cu_2O dengan konsentrasi NaOH 0,075 M

2θ (derajat)	θ (derajat)	$\sin\theta$	$\sin^2\theta$
29.47365	14.73683	0.254380	0.064709
36.30856	18.15428	0.311577	0.097080
42.24106	21.12053	0.360331	0.129838
61.29191	30.64596	0.509732	0.259826
73.42429	36.71215	0.597795	0.357359
77.33473	38.66737	0.624798	0.390373

Penentuan struktur kristal dari Cu_2O dengan konsentrasi NaOH 0,0775 M dapat dianalisis dari rasio $\sin^2\theta$ dari sudut pertama dan sudut kedua difraksi.

$$\frac{\sin^2\theta}{\sin^2\theta} = \frac{0,064709}{0,097080} = 0,667$$

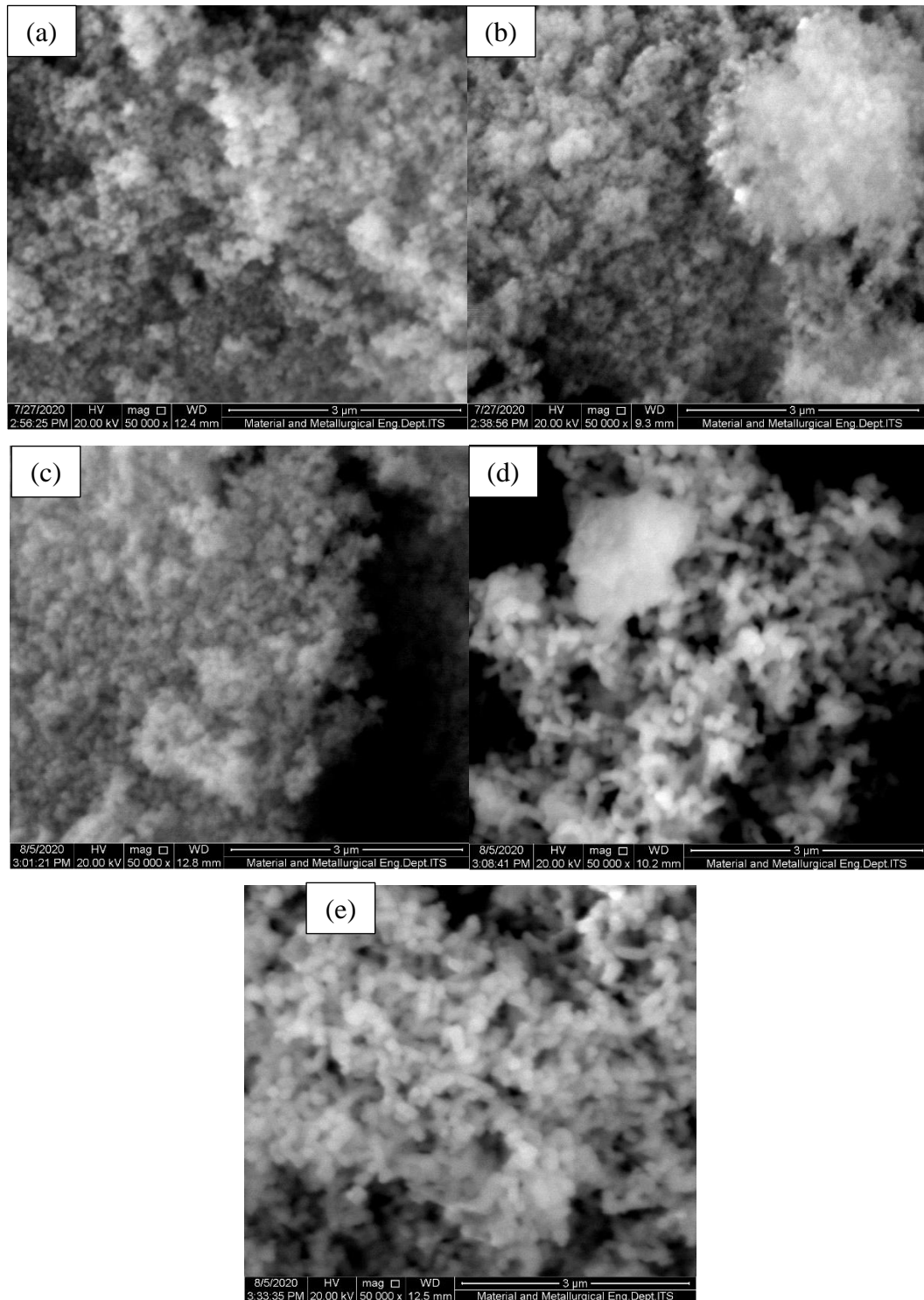
Untuk BCC nilai rasio $\sin^2\theta$ dari 2 sudut pertama difraksi adalah 0,5 sedangkan untuk FCC nilainya adalah 0,75. Nilai rasio dua sudut pertama difraksi dari Cu_2O dengan konsentrasi NaOH 0,075 M adalah 0,667 sehingga dapat disimpulkan

terdapat 2 struktur. Dari urutan bravais lattice Cu_2O memiliki struktur kristal FCC ditunjukkan dengan urutan bidang kristal (111), (200),(220),(311),(222) secara berurutan. Untuk bidang (110) yang muncul menunjukkan adanya struktur krista BCC.

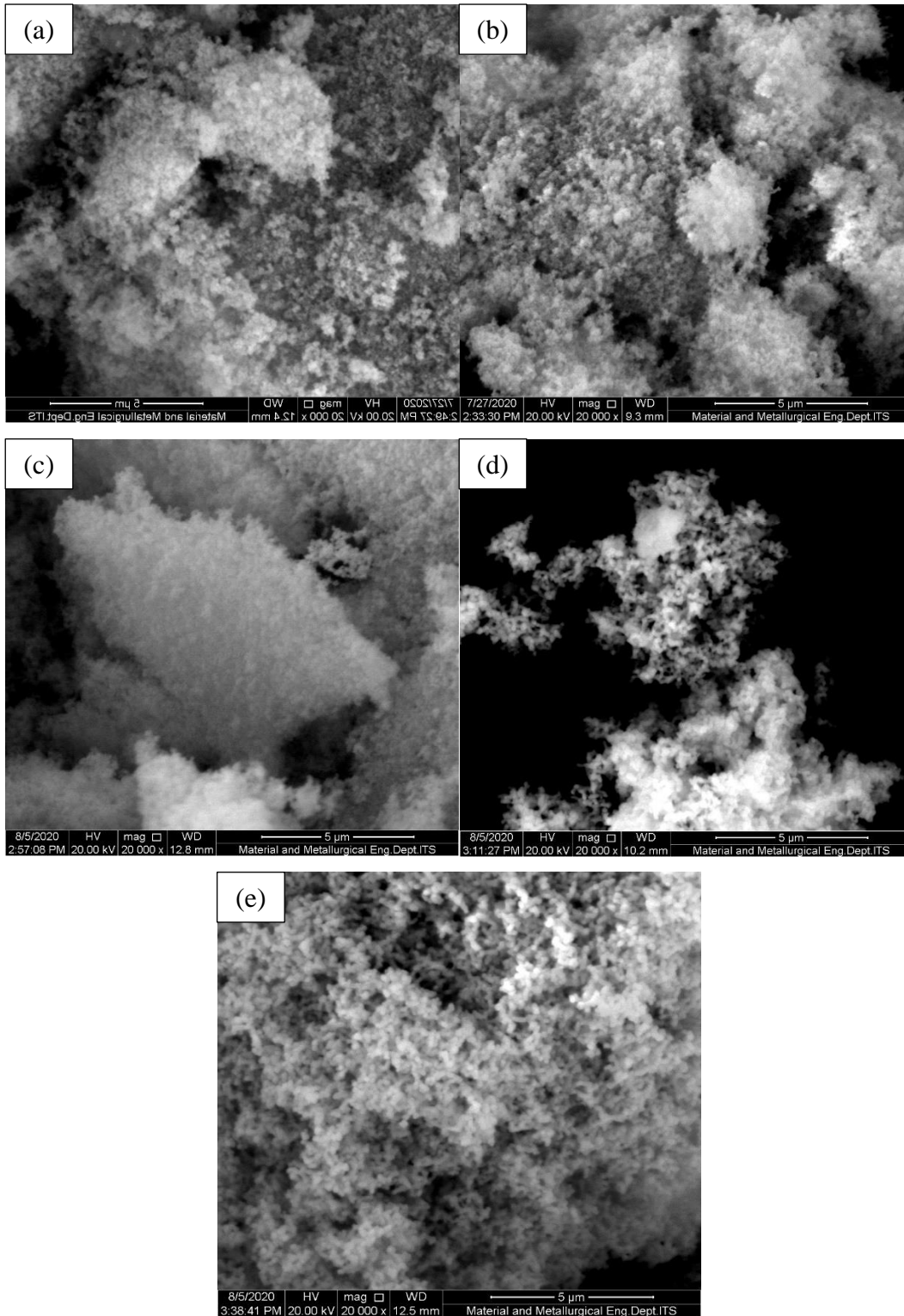
Referensi: Callister, J. W. D., & Rethwisch, D. G. (2014). *Materials Science and Engineering* (9th ed.; D. Sayre, Ed.). John Wiley & Sons, Inc.

Smith, William F., & Hashemi, Javad (2019). *Foundation of Material Science and Engineering* (6th ed). McGraw-Hill Education.

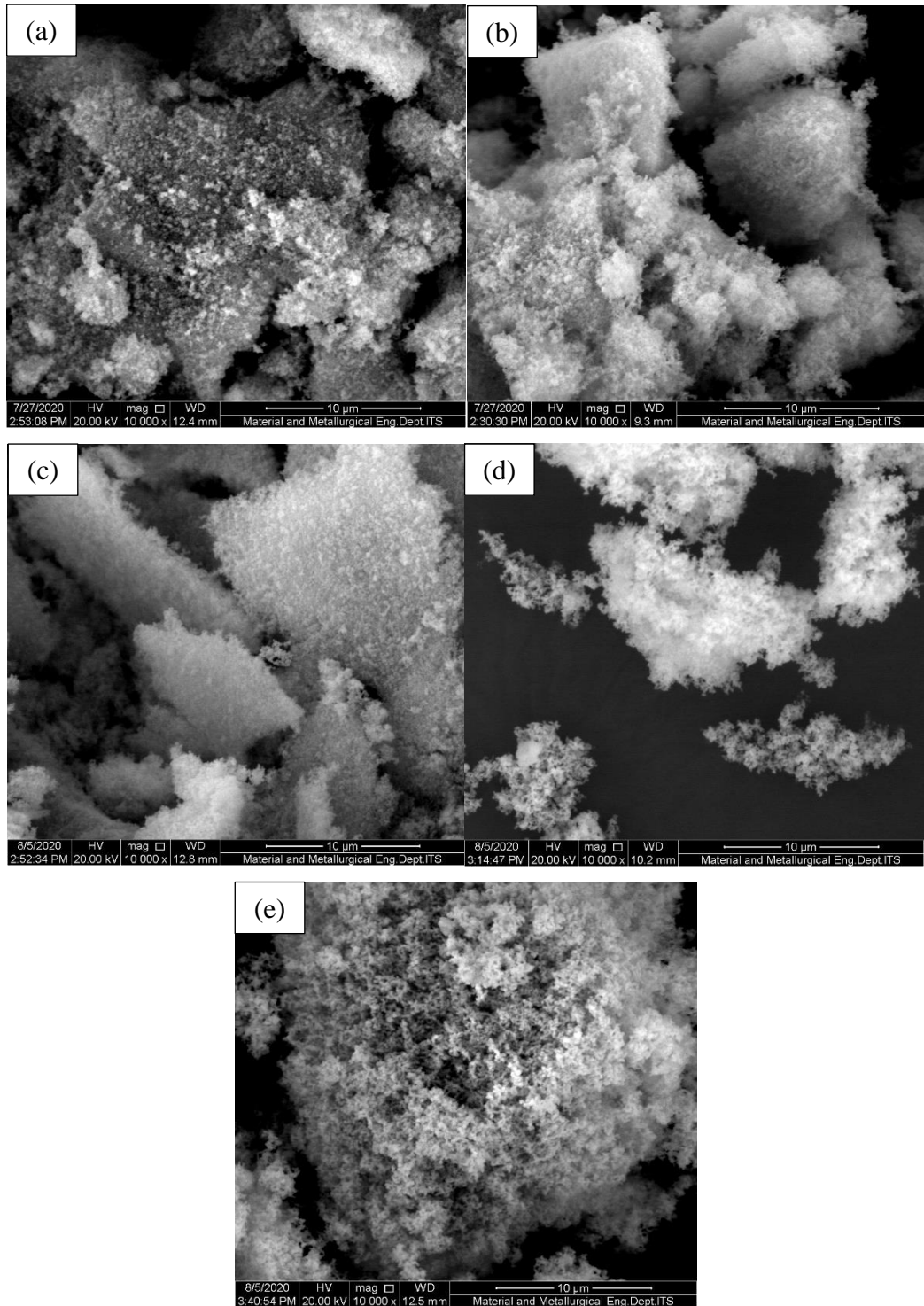
LAMPIRAN C Gambar SEM Cu₂O



Gambar C.1 SEM Cu₂O pada perbesaran 50000x dengan konsentrasi NaOH (a) 0,075 M (b) 0,113 M (c) 0,188 M (d) 0,263 M (e) 0,3 M



Gambar C.2 SEM Cu_2O pada perbesaran 20000x dengan konsentrasi NaOH (a) 0,075 M (b) 0,113 M (c) 0,188 M (d) 0,263 M (e) 0,3 M



Gambar C.3 SEM Cu₂O pada perbesaran 10000x dengan konsentrasi NaOH (a) 0,075 M (b) 0,113 M (c) 0,188 M (d) 0,263 M (e) 0,3 M

LAMPIRAN D Perhitungan Rsh dan Rs Menggunakan Perhitungan Slope pada Kurva I-V

Tabel D. 1 Hasil perhitungan Rsh menggunakan *slope* dekat dengan Isc dan Rs menggunakan slope dekat Voc*

Fotokatoda Cu₂O dengan konsentrasi NaOH	Rs (Ω)	Rsh (Ω)
0,075 M	54511	30500
0,113 M	61692	60918
0,188 M	57823	35490
0,263 M	61149	43191
0,3 M	95800	57143

*mengacu pada paper : Diantoro, M., Suprayogi, T., Hidayat, A., Taufiq, A., Fuad, A., & Suryana, R. (2018). Shockley's equation fit analyses for solar cell parameters from I-V curves. *International Journal of Photoenergy*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/9214820>

BIODATA PENULIS



Penulis memiliki nama lengkap Rachma Putri Anggraini, lahir di Kabupaten Ngawi pada tanggal 03 November 1998. Penulis menempuh pendidikan di SD Negeri Karang Tengah 5 Ngawi, SMP Negeri 2 Ngawi, dan SMA Negeri 2 Ngawi. Selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan sarjana di Departemen Teknik Fisika ITS. Selama masa studi sarjana, penulis telah melaksanakan penelitian dan melaporkannya dalam buku tugas akhir dengan judul Fabrikasi *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC) Tipe P dengan Fotokatoda $\text{Cu}_2\text{O Nanocube}$. Bagi pembaca yang memiliki saran, kritik, atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai penelitian ini dapat menghubungi penulis melalui email rachmaanggrainii@gmail.com.