



TUGAS AKHIR - TF 181801

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI NANOPARTIKEL DAN
NANOROD CuO SEBAGAI FOTOKATODA
*DYE-SENSITIZED SOLAR CELL (DSSC) TIPE P***

WINDA NUR AZIZAH
NRP. 0231164000017

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



TUGAS AKHIR - TF 181801

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI NANOPARTIKEL DAN
NANOROD CuO SEBAGAI FOTOKATODA
*DYE-SENSITIZED SOLAR CELL (DSSC) TIPE P***

**WINDA NUR AZIZAH
NRP. 02311640000017**

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

***SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF CuO
NANOPARTICLE AND NANOROD AS P-TYPE
DYE-SENSITIZED SOLAR CELL (DSSC) PHOTOCATODES***

WINDA NUR AZIZAH
NRP. 02311640000017

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

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

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama : Winda Nur Azizah
NRP : 02311640000017
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 "*SINTESIS DAN KARAKTERISASI NANOPARTIKEL DAN NANOROD 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, 6 Agustus 2020

Yang membuat pernyataan,



Winda Nur Azizah

NRP. 02311640000017

Halaman ini sengaja dikosongkan

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI NANOPARTIKEL DAN
NANOROD CuO SEBAGAI FOTOKATODA *DYE-SENSITIZED*
SOLAR CELL (DSSC) TIPE P**

Oleh:

Winda Nur Azizah

NRP. 02311640000017

Surabaya, 6 Agustus 2020

Menyetujui,

Pembimbing I


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

Mengetahui,

Kepala Departemen

Teknik Fisika FTIRS-ITS


Dr. Suyanto, S.T., M.T.
NIP. 19171113 199512 1 002

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

SINTESIS DAN KARAKTERISASI NANOPARTIKEL DAN NANOROD CuO SEBAGAI FOTOKATODA *DYE-SENSITIZED* *SOLAR CELL (DSSC) TIPE P*

TUGAS AKHIR




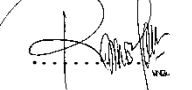
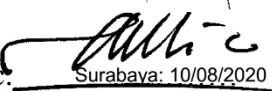
Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FTIRS)
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

WINDA NUR AZIZAH

NRP. 02311640000017

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr.-Ing. Doty Dewi Risanti, S.T., M.T.  (Pembimbing I)
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., M.T.  (Penguji II)
5. Dr.rer.nat. Ir. Aulia M.T. Nasution, M.Sc.  (Penguji III)
Surabaya: 10/08/2020

SURABAYA

2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI NANOPARTIKEL DAN
NANOROD CuO SEBAGAI FOTOKATODA *DYE-
SENSITIZED SOLAR CELL* (DSSC) TIPE P**

Nama : Winda Nur Azizah
NRP : 0231164000017
Departemen : Teknik Fisika FTIRS – ITS
Dosen Pembimbing : Dr.-Ing. Doty Dewi Risanti, S.T., M.T.

ABSTRAK

Tembaga (II) oksida (CuO) merupakan salah satu material logam oksida yang cukup menarik perhatian dari segi sifat material berskala nano dan pengaplikasiannya pada sel surya. Pada penelitian ini telah difabrikasi DSSC berbasis semikonduktor tipe p menggunakan CuO dengan variasi morfologi berupa CuO nanopartikel sintesis, CuO nanorod, dan satu sebagai pembanding yaitu CuO nanopartikel komersil. DSSC berbasis semikonduktor tipe p ini berpotensi untuk membuka perkembangan selanjutnya mengenai DSSC tandem (tipe p-n). CuO nanorod dan nanopartikel berhasil disintesis menggunakan metode hidrotermal dengan morfologi nanopartikel menggunakan prekursor Cu(SO)₄ dan amonium pada temperatur 700°C. Karakterisasi XRD, UV-Vis, dan SEM bertujuan untuk mengetahui struktur/kristalinitas, absorbansi/sifat optik, dan morfologi CuO sebagai fotokatoda. Salah satu hasil karakterisasi XRD menunjukkan nilai dislokasi (δ) terbesar ditunjukkan oleh sampel CuO nanorod $2,10583 \cdot 10^{-3} \text{ nm}^2$. Uji UV-Vis menunjukkan seluruh sampel memiliki puncak absorbansi 397 nm. Sedangkan ukuran partikel yang diperoleh dari uji SEM berkisar antara 166,61 nm hingga 396,725 nm, dimana CuO sintesis 450°C memiliki agregat terbanyak. Karakterisasi Fotokatoda dengan pengujian I-V di bawah sinar matahari langsung menghasilkan efisiensi terbaik DSSC Tipe p CuO sintesis 700°C sebesar 0.0001668% dengan V_{oc} sebesar 0,1316 V, J_{sc} sebesar 0,0036 mA/cm², dan *fill factor* (FF) sebesar 0,27153.

Kata kunci: nanopartikel CuO, nanorod, DSSC tipe-p, efisiensi.

Halaman ini sengaja dikosongkan

***SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF CuO
NANOPARTICLE AND NANOROD AS P-TYPE
DYE-SENSITIZED SOLAR CELL (DSSC) PHOTOCATODES***

Name : Winda Nur Azizah
NRP : 02311640000017
Department : Engineering Physics FTIRS – ITS
Supervisor : Dr.-Ing. Doty Dewi Risanti, S.T., M.T.

ABSTRACT

Cupric oxide (CuO) is one of the metal oxide materials that is interesting in terms of the properties of nanoscale materials and its application to solar cells. In this research, it has been successfully fabricated a p-type semiconductor-based DSSC using various CuO nanoparticle morphologies, i.e. as-synthesized, nanorods, and commercially available ones. The p-type semiconductor-based DSSC has potential to be fabricated as tandem DSSC (type p-n) in the future. CuO nanorod and nanoparticles were successfully synthesized using the hydrothermal method using Cu(SO)₄ precursor and ammonium at 700°C. The XRD, UV-Vis, and SEM characterizations aimed to determine the structure/crystallinity, absorbance/optical properties, and morphology of CuO as a photocathode, respectively. XRD results indicated that CuO in the form of nanorod has the largest dislocation (δ) density, i.e., $2,10583 \cdot 10^{-3} \text{ nm}^2$. All samples had absorbance peaks at the wavelength of 397 nm. On the other hand, particle size obtained from SEM was in the range of 166,61 nm to 396,725 nm, with the as-synthesized at 450°C has the most aggregate. The photocathode characterization through I-V curve measurement under the direct sun indicated that the highest efficiency produced by p-type DSSC with CuO synthesized at 700°C, namely 0,0001668% with Voc of 0,1316 V, Jsc of 0,0036 mA/cm², and fill factor (FF) of 0,27153.

Keywords: CuO nanoparticles, nanorod, p-type DSSC, efficiency.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas berkat dan karunia-Nya jua sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir yang berjudul “Sintesis dan Karakterisasi Nanopartikel dan Nanorod CuO sebagai Fotokatoda *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC) Tipe P”.

Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.) pada program studi S-1 Departemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Penulis sepenuhnya menyadari bahwa penulisan skripsi ini tidaklah mudah dan tentunya tidak terlepas dari berbagai rintangan, terlebih dengan kondisi pandemi COVID-19, namun akhirnya penulis dapat merampungkan penulisan karya tulis ilmiah ini tentunya dengan bimbingan serta bantuan dari berbagai pihak, baik secara materi maupun moril.

Untuk itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih yang setulus-tulusnya 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 rela meluangkan waktu dengan sabar untuk memberikan arahan, bimbingan, dan dukungan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini
3. Ibu Dyah Sawitri, S.T., M.T., Ibu Lizda Johar Mawarani, S.T., M.T., Bapak Dr.rer.nat. Ruri Agung Wahyuono, S.T., M.T., dan Bapak Dr.rer.nat. Ir. Aulia M.T. Nasution, M. Sc. selaku dosen penguji yang telah memberikan koreksi dan saran untuk menyempurnakan skripsi ini
4. Seluruh dosen Teknik Fisika ITS yang telah memberikan ilmu pembelajaran dan wejangan selama penulis menuntut ilmu di sini
5. Laboratorium Material Fungsional Maju dan Laboratorium Rekayasa Fotonika Teknik Fisika ITS yang telah memfasilitasi penulis dalam merampungkan Tugas Akhir ini

6. Kedua orang tua yang sangat tulus selalu memberi doa dan semangat, tidak lupa juga para sahabat, serta seluruh pihak yang telah membantu kelancaran penyusunan Tugas Akhir ini
7. Rekan satu topik penelitian Tugas Akhir (Rachma Putri Anggraini dan Chiara Arandani) yang saling memberikan semangat dan bantuan satu sama lain, serta Mas Matius Nata Pakpahan, Mba Nur Fadhilah, Mas M.H. Haekal, dan M. Fadila F52 yang sudah meluangkan waktu untuk berdiskusi.

Penulis menyadari Tugas Akhir ini masih jauh dari kata sempurna. Saran dan kritik yang membangun sangat penulis harapkan demi perbaikan Tugas Akhir ini. Semoga laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat dan dipergunakan dengan sebaik-baiknya.

Surabaya, 6 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	2
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Sistematika Laporan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	5
2.1 Karakteristik CuO.....	5
2.2 Semikonduktor Oksida Logam Transisi Tipe P	6
2.3 Prinsip Kerja DSSC Tipe-P	7
2.4 Macam-Macam Morfologi CuO.....	9
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	13
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	13

3.2	Persiapan Alat dan Bahan	14
3.3	Sintesis CuO Nanopartikel.....	14
3.4	Sintesis CuO Nanorod	17
3.5	Karakterisasi Nanopartikel dan DSSC.....	18
3.6	Prosedur Perakitan DSSC	29
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		31
4.1	Karakterisasi CuO sebagai Fotokatoda.....	31
4.2	Performansi DSSC Tipe P	45
BAB V KESIMPULAN		49
5.1	Kesimpulan	49
DAFTAR PUSTAKA.....		51
LAMPIRAN A		A-1
LAMPIRAN B.....		B-1
LAMPIRAN C.....		C-1
LAMPIRAN D		D-1
LAMPIRAN E.....		E-1
LAMPIRAN F.....		F-1
LAMPIRAN G		G-1
LAMPIRAN H		H-1

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Struktur kristal dari CuO dengan bentuk monoklinik.....	5
Gambar 2. 2	Perbandingan skema prinsip kerja DSSC (a) tipe n dan (b) tipe p...	8
Gambar 2. 3	Skema transfer elektron pada DSSC dengan morfologi semikonduktor oksida (a) nanopartikel dan (b) nanorod.....	10
Gambar 2. 4	Hasil uji SEM (a,b) CuO nanorod dan (c,d) CuO nanopartikel.....	11
Gambar 3. 1	Skema diagram alir penelitian Tugas Akhir.....	13
Gambar 3. 2	CuSO ₄ .5H ₂ O 1,0 mol% yang sudah dilarutkan.....	14
Gambar 3. 3	Perubahan warna larutan CuSO ₄ .5H ₂ O.....	15
Gambar 3. 4	Endapan yang terbentuk berupa senyawa Cu(OH) ₂	16
Gambar 3. 5	Cu(OH) ₂ dipanaskan terlebih dahulu menggunakan oven.....	16
Gambar 3. 6	Hasil akhir sintesis CuO nanopartikel.....	16
Gambar 3. 7	Prekursor Cu(CH ₃ COOH) ₂ dan surfaktan CTAB yang dilarutkan..	17
Gambar 3. 8	Larutan dipanaskan pada temperatur 80°C selama 2 menit.....	17
Gambar 3. 9	Perubahan warna larutan Cu(CH ₃ (COOH)) ₂	18
Gambar 3. 10	Difraksi sinar-X pada struktur kristal.....	20
Gambar 3. 11	Skema alat <i>scanning electron microscope</i> (SEM).....	22
Gambar 3. 12	UV-Vis spektrofotometri.....	23
Gambar 3. 13	Skema transmitansi cahaya dalam melewati suatu zat penyerap...	24
Gambar 3. 14	Skema rangkaian hambatan untuk menghasilkan arus.....	26
Gambar 3. 15	Susunan alat saat melakukan pengukuran I-V pada DSSC.....	26
Gambar 3. 16	Kurva arus tegangan (I-V) pada perangkat sel surya.....	27
Gambar 3. 17	Label yang tertera pada piranometer menampilkan nilai sensitivitas alat.....	29
Gambar 3. 18	Pelapisan pasta fotokatoda CuO pada kaca TCO.....	30
Gambar 4. 1	Perbandingan hasil pengujian XRD dari 4 sampel dengan JCPDS CuO dan Cu(OH) ₂	32
Gambar 4. 2	Perbandingan hasil pengujian XRD dari sampel CuO nanopartikel sintesis 450°C dengan JCPDS 00-007-0408.....	34
Gambar 4. 3	W-H plot dari sampel CuO nanopartikel komersil.....	35
Gambar 4. 4	W-H plot dari sampel CuO nanopartikel sintesis 700°C.....	35

Gambar 4. 5 W-H plot dari sampel CuO nanopartikel sintesis 450°C.....	36
Gambar 4. 6 W-H plot dari sampel CuO nanorod.....	36
Gambar 4. 7 Hasil UV-Vis dari CuO nanopartikel komersil, CuO nanopartikel sintesis 700°C dan 450°C, dan CuO nanorod.....	39
Gambar 4. 8 <i>Tauc plot</i> dari CuO nanopartikel komersil.....	40
Gambar 4. 9 <i>Tauc plot</i> dari CuO nanopartikel hasil sintesis 700°C.....	41
Gambar 4. 10 <i>Tauc plot</i> dari CuO nanopartikel hasil sintesis 450°C.....	41
Gambar 4. 11 <i>Tauc plot</i> dari CuO nanorod.....	42
Gambar 4. 12 Hasil SEM CuO Nanopartikel komersil.....	43
Gambar 4. 13 Hasil SEM CuO Nanorod.....	43
Gambar 4. 14 Hasil SEM CuO nanopartikel sintesis 450°C.....	43
Gambar 4. 15 Hasil SEM CuO nanopartikel sintesis 700°C.....	44
Gambar 4. 16 Hasil Pengujian I-V dari DSSC dari keseluruhan sampel.....	46

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Parameter kisi dari 4 sampel CuO.....	31
Tabel 4. 2 Karakterisasi hasil XRD dari 4 sampel CuO.....	37
Tabel 4. 3 Pengukuran diameter partikel dari 4 sampel CuO.....	45
Tabel 4. 4 Tabel perhitungan hasil performansi DSSC tipe P.....	46
Tabel A. 1 CuO Nanopartikel Komersil (k=0.89).....	A-1
Tabel A. 2 CuO Nanopartikel Sintesis 700°C (k=0.89)	A-1
Tabel A. 3 CuO Nanopartikel Sintesis 450°C (k=0.89)	A-2
Tabel A. 4 CuO Nanorod (k=0.94).....	A-2
Tabel B. 1 CuO Nanopartikel Komersil	B-1
Tabel B. 2 CuO Nanopartikel Sintesis 700°C	B-1
Tabel B. 3 CuO Nanopartikel Sintesis 450°C	B-2
Tabel B. 4 CuO Nanorod.....	B-2
Tabel C. 1 CuO Nanopartikel Komersil.....	C-1
Tabel C. 2 CuO Nanopartikel Sintesis 700°C	C-1
Tabel C. 3 CuO Nanopartikel Sintesis 450°C	C-1
Tabel C. 4 CuO Nanorod	C-2
Tabel G. 1 Distribusi ukuran partikel CuO nanopartikel sintesis 450°C.....	G- 1
Tabel G. 2 Distribusi ukuran partikel CuO nanopartikel sintesis komersil	G-3
Tabel G. 3 Distribusi ukuran partikel CuO nanorod	G-5
Tabel G. 4 Distribusi ukuran partikel CuO nanopartikel sintesis 700°C	G-7
Tabel H. 1 Parameter-parameter dan hasil perhitungan efisiensi DSSC.....	H-2

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sel surya generasi ketiga yang paling banyak dikembangkan saat ini yaitu *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC). DSSC memiliki kelebihan dibanding sel surya generasi sebelumnya, di antaranya yaitu fabrikasi yang tergolong lebih sederhana, ramah lingkungan, serta biaya produksi cukup murah (Gratzel, 2003). Sel surya peka warna ini pertama kali diteliti pada tahun 1991 oleh O'Regan dan Grätzel menghasilkan konversi energi (η) hampir 7% dengan fotoanoda semikonduktor tipe-n yaitu TiO_2 (Richhariya, Kumar, & Tekasakul, 2017). Pada DSSC tipe n, arus listrik dihasilkan dari elektron yang diinjeksikan dari pewarna menuju pita konduksi semikonduktor tipe n. Sebaliknya pada DSSC tipe p, transfer elektron terjadi dari pita valensi semikonduktor tipe p menuju ke pewarna.

Penelitian mengenai DSSC berbasis semikonduktor tipe p menjadi fokus baru karena berpotensi untuk membuka perkembangan selanjutnya mengenai DSSC tandem (tipe p-n) di masa mendatang. Semikonduktor yang paling sering digunakan pada DSSC tipe p adalah NiO. Namun NiO memiliki kekurangan pada sifat intrinsiknya, yaitu konstanta dielektrik NiO cukup rendah ($\epsilon=9,74$) dibanding dengan TiO_2 ($\epsilon=80$). Akibatnya *hole* yang diinjeksikan dari pita valensi semikonduktor menjadi sangat terikat dengan elektron yang terdapat pada pewarna (terjadi rekombinasi), hal tersebut berdampak pada menurunnya performansi DSSC. Adapun DSSC tipe n berbasis ZnO juga menunjukkan konstanta dielektrik rendah ($\epsilon=8$). Sedangkan CuO merupakan semikonduktor logam oksida tipe p yang memiliki konstanta dielektrik ($\epsilon=18,1$) yang lebih tinggi dibandingkan NiO. Selain itu, keuntungan utama dipilihnya *Cupric oxide* (CuO) sebagai fotokatoda pada penelitian ini yaitu, CuO dapat menyerap di seluruh wilayah panjang gelombang cahaya tampak (*visible*) karena energi celah pita berada dalam rentang 1,2 eV hingga 2,1 eV. Selain itu, CuO juga menjadi bahan yang menjanjikan untuk fabrikasi sel surya karena memiliki nilai absorpsi cahaya matahari tinggi, daya emitansi termal rendah, sifat listrik yang relatif baik, dan konsentrasi muatan yang tinggi (Jiang, Bujoli-Doeuff, Farre, & Pellegrin, 2016).

Beberapa penelitian dengan berbagai metode telah dilakukan untuk mensintesis CuO, antara lain CuO nanopartikel dengan metode radiasi *microwave* dari prekursor larutan 0,2 M $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COOH})_2$, NaOH 0,01 mol, etanol, dan PEG 19000 menghasilkan ukuran kristal 3-5 nm (Wang, Xu, Zhu, & Chen, 2002). Nanorod CuO dengan metode sintesis *solid-state* dari prekursor $\text{Cu}(\text{OAc})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, KCl, LiCl, NaOH, dan NP9 menghasilkan nanorod dengan ukuran diameter 15-100 nm dan panjang mencapai 300 nm (Jisen, Jinkai, Jinqun, & Ying, 2004). CuO dengan bentuk bola berongga (*hollow sphere*) dengan metode sintesis tanpa surfaktan dari prekursor $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ menghasilkan ukuran diameter CuO sebesar 417-1521 nm (Yuxi, Huang, Zhu, & Ma, 2014). Serta *nanowire* CuO dengan metode *wet-chemical* dari prekursor $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COOH})_2$, NaOH, dan thioglycerol (TG) menghasilkan diameter sebesar 90 nm dengan panjang mencapai orde mikro (Ethiraj & Kang, 2012).

Semikonduktor CuO dalam beberapa penelitian diaplikasikan pada DSSC tipe p, di antaranya CuO sebagai fotokatoda pengganti pelat platina dengan fotoanoda TiO_2 mencapai efisiensi sebesar 0,29 % (Anandan, Wen, & Yang, 2005). Selain itu, telah difabrikasi dan dianalisa performansi CuO dengan variasi morfologi (*nanowire* dan nanorod) dengan 3 pewarna dan 2 mediator elektrolit berbeda (iodide/triiodide dan *cobalt bipyridine* kompleks). Pada penelitian tersebut mencapai efisiensi tertinggi 0,097% dengan morfologi nanorod dan mediator *cobalt bipyridine* kompleks (Jiang, Bujoli-Doeuff, Farre, & Pellegrin, 2016). Oleh karena itu, pada penelitian ini akan disintesis CuO dengan beberapa variasi morfologi (nanopartikel dan nanorod) untuk difabrikasi sebagai fotokatoda pada DSSC tipe p.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun permasalahan yang diangkat dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

- a. Bagaimana mensintesis nanopartikel dan nanorod CuO?
- b. Bagaimana karakteristik dari nanopartikel CuO, nanorod CuO, dan nanopartikel CuO komersil?
- c. Bagaimana performa DSSC tipe p yang menggunakan fotokatoda nanopartikel CuO, nanorod CuO, dan nanopartikel CuO komersil?

1.3 Tujuan

Adapun tujuan dari Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

- a. Mensintesis nanopartikel dan nanorod CuO
- b. Mengetahui karakteristik dari hasil sintesis nanopartikel CuO, nanorod CuO, dan nanopartikel CuO komersil
- c. Mengetahui performansi DSSC tipe p yang menggunakan fotokatoda nanopartikel CuO, nanorod CuO, dan nanopartikel CuO komersil.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang diangkat adalah sebagai berikut :

- a. Pewarna yang digunakan adalah ruthenium kompleks N-719
- b. Pelapisan CuO pada kaca FTO menggunakan metode *doctor blade*.

1.5 Sistematika Laporan

Laporan Tugas Akhir ini berisi lima bab, yakni pendahuluan, dasar teori, metodologi penelitian, data dan pembahasan, dan penutup. Pendahuluan meliputi latar belakang, permasalahan, tujuan, batasan masalah, dan sistematika penulisan. Dasar teori meliputi hal-hal yang berkaitan dengan struktur nano CuO pada *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC) tipe p secara umum. Metodologi penelitian meliputi peralatan yang dibutuhkan selama kegiatan penelitian serta bagaimana prosedur pelaksanaan penelitian. Data dan pembahasan berisi data dan analisis data penelitian. Bagian penutup berisi kesimpulan dan saran.

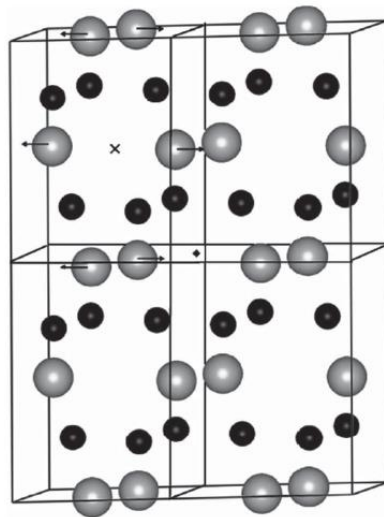
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Karakteristik CuO

Tembaga oksida terbagi menjadi dua berdasarkan pada keadaan valensi tembaga, yaitu Tembaga (I) oksida/*cuprous oxide* (Cu_2O) dan Tembaga(II) oksida/*cupric oxide* (CuO). Pada penelitian ini berfokus pada semikonduktor CuO. CuO adalah semikonduktor tipe-P, dengan nilai celah pita energi sebesar 1,2 -2,1 eV (Zhang, Zhang, Xu, Yang, & Huang, 2014). CuO termasuk dalam golongan mineral sekunder, yaitu mineral yang terbentuk pada permukaan bumi dari hasil pelapukan mineral primer yang sudah ada sebelumnya dalam berbagai kondisi dan tekanan. Terjadinya dekomposisi mineral primer tersebut juga dipengaruhi oleh aksi dari air, oksigen, dan agen pelapukan lainnya. CuO adalah bentuk yang paling stabil di antara tembaga teroksidasi lainnya (Downs & Hall-Wallace, 2003).



Gambar 2. 1 Struktur kristal dari CuO dengan bentuk monoklinik (Tiginyanu, Lupan, Ursaki, Chow, & Enachi, 2011).

Struktur kristal CuO adalah monoklinik dengan kelompok simetri $-C 2/c$ dan konstanta kisi $a= 4.652 \text{ \AA}$, $b= 3.410\text{\AA}$, $c= 5.108 \text{ \AA}$, dan $\beta= 99,54^\circ$. Cu bersifat antiferromagnetik. CuO berpotensi diaplikasikan sebagai fotokonduktif, fototermal, katalis, dan sensor gas. Semikonduktor oksida memiliki prospek yang

baik sebagai material alternatif untuk sel surya berbasis silikon karena memiliki penyerapan optik yang tinggi dan tergolong murah (Yoon, Choi, & Kang, 2000). Beberapa penelitian telah mengaplikasikan CuO sebagai lapisan transfer hole dan lapisan penghalang (*barrier*) untuk DSSC (Raksa, Nilphai, Gardchareon, & Choopun, 2009), lapisan aktif dalam berbagai tipe sel surya, dan sebagai lapisan pasif dalam permukaan selektif surya. CuO akan menjadi lapisan penyerap selektif yang baik dikarenakan daya serap matahari yang tinggi dan daya emitansi termal yang rendah.

2.2 Semikonduktor Oksida Logam Transisi Tipe P

Semikonduktor tipe p menjadikan hole sebagai pembawa muatan mayoritas dan elektron sebagai pembawa muatan minoritas. Tingkat energi fermi bergeser mendekati pita valensi akibat adanya tingkat energi akseptor yang kekurangan elektron (Callister, 2009). Oksida logam transisi berstruktur nano merupakan salah satu kelas khusus pada material nano yang mengalami perkembangan sebagai material cerdas karena sifat fisik dan kimia yang unik. Sifat fisik dan kimia ini sangat bergantung pada ukuran, bentuk, komposisi, dan struktur nanokristal itu sendiri. Beberapa contoh semikonduktor oksida logam transisi di antaranya SnO₂, Nb₂O₅, ZnO, TiO₂, NiO, CuO, Cu₂O, dan lainnya.

Sebagai semikonduktor oksida logam transisi tipe n, SnO₂ menjadi bahan yang menjanjikan untuk aplikasi elektrokimia yang membutuhkan konduktivitas listrik yang tinggi dan transparansi optik. Selain itu juga memiliki kemampuan pemisahan elektron-*hole* yang lebih baik dengan mobilitas elektron yang dominan lebih tinggi ($\sim 100 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ untuk nanokristal) dibandingkan dengan TiO₂ berfase anatase ($< 1,0 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$). Hal tersebut menyebabkan pengangkutan cepat pada elektron yang diinjeksikan ke dalam pengumpul arus oksida konduktif. Namun dalam kasus ini, kinerja tidak memuaskan dari SnO₂ pada sistem sel surya yaitu menghasilkan efisiensi rendah. Penyebabnya kemungkinan terkait dengan proses rekombinasi. Pita konduksi yang dimiliki SnO₂ (0,5 eV) lebih rendah dibandingkan TiO₂ anatase. Oleh karena itu, DSSC berbasis SnO₂ menunjukkan V_{oc} yang relatif rendah karena kelebihan potensial yang lebih besar pada batas pewarna/SnO₂ dan

terjadilah kinetika rekombinasi yang lebih tinggi dari elektron yang tereksitasi dengan molekul pewarna (Zhang, Zhang, Xu, Yang, & Huang, 2014).

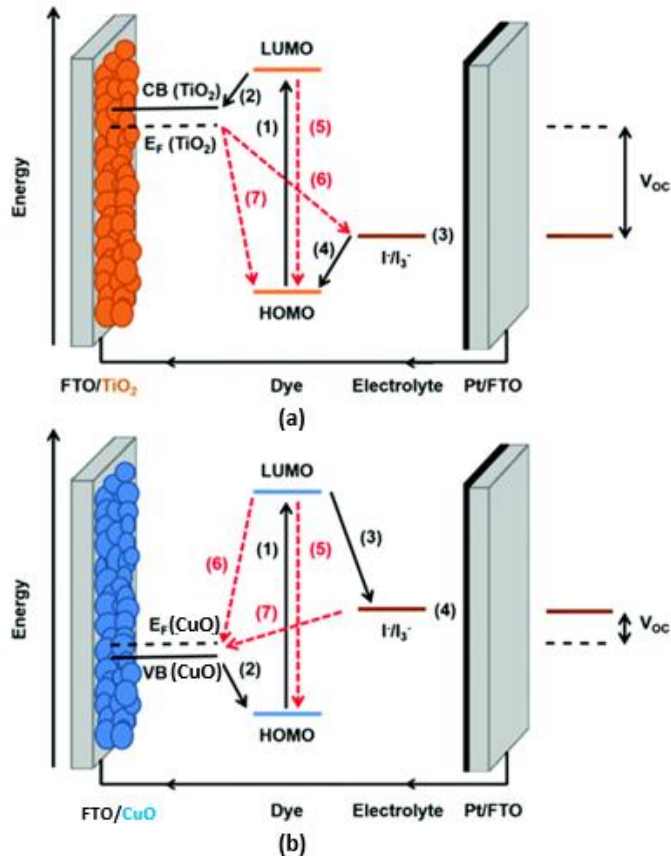
Selain SnO₂, semikonduktor TiO₂ memiliki konstanta dielektrik yang relatif lebih tinggi yaitu $\epsilon = 80$, dimana sifat ini memberikan perlindungan (*shielding*) kepada elektron yang diinjeksikan dari molekul pewarna teroksidasi yang melekat pada permukaan TiO₂, oleh karena itu, rekombinasi dapat dengan mudah dicegah. Namun TiO₂ memiliki kekurangan yang dapat membatasi peningkatan dari kinerja DSSC, di antaranya yaitu sifat berpori yang kemungkinan menyebabkan sebagian substrat tidak tertutup sehingga memungkinkan cairan elektrolit menembus struktur berpori semikonduktor. Jika cairan elektrolit mencapai permukaan permukaan substrat maka terjadilah kebocoran elektron (Zhang, Zhang, Xu, Yang, & Huang, 2014).

Pada semikonduktor tipe p CuO dengan energi celah pita dari 1,2 eV hingga 2,1 eV sangat menarik diaplikasikan sebagai elektroda foto dalam sel fotoelektrokimia. Dibandingkan dengan TiO₂ yang telah menjadi bahan fotoelektroda paling banyak diteliti, keuntungan utama CuO adalah dapat menyerap di seluruh wilayah cahaya tampak, karena energi celah pita berada dalam 1,2 – 2,1 eV. Namun sifat-sifat fotoelektrokimia ini sering bergantung pada morfologi permukaan dan ukuran partikel dalam semikonduktor oksida logam transisi berstruktur nano (Zhang, Zhang, Xu, Yang, & Huang, 2014).

2.3 Prinsip Kerja DSSC Tipe-P

DSSC merupakan divais semikonduktor *photovoltaic* yang mengkonversi sinar matahari langsung menjadi energi listrik. DSSC tipe p pertama kali diteliti oleh Lindquist dan rekan kerjanya pada tahun 1992 dengan menggunakan komponen yang sama seperti DSSC tipe n, namun bagian semikonduktor TiO₂ dimodifikasi dengan menggunakan lapisan NiO. Dengan menggunakan erythrosin B sebagai sensitizer, DSSC tipe p rancangan Lindquist tersebut dapat menghasilkan *power conversion efficiency* (PCE) keseluruhan sebesar 0,0076% (Benazzi, Mallows, Summers, Black, & Gibson, 2019). Perangkat DSSC tipe p beroperasi dengan cara yang mirip dengan DSSC tipe n. Namun karena pembawa muatan mayoritas pada CuO adalah *hole* (h⁺), maka aliran elektron pada perangkat DSSC

terjadi dalam arah sebaliknya. Jika pada DSSC tipe n transfer elektron terjadi dari pewarna yang tereksitasi menuju ke dalam pita konduksi TiO₂. Sebaliknya, pada DSSC tipe P transfer elektron terjadi dari pita valensi semikonduktor CuO menuju ke zat pewarna yang tereksitasi. Representasi skema prinsip kerja DSSC tipe p berbasis fotokatoda CuO dibandingkan DSSC tipe n adalah sebagai berikut:



Gambar 2. 2 Perbandingan skema prinsip kerja DSSC (a) tipe n dan (b) tipe p (Benazzi, Mallows, Summers, Black, & Gibson, 2019)

Prinsip kerja DSSC tipe p adalah sebagai berikut: Ketika cahaya matahari mengenai sel DSSC, foton diserap oleh molekul pewarna S, dan terjadilah proses fotoeksitasi. Pewarna S dari keadaan dasar (*ground state*) akan tereksitasi menjadi pewarna tereksitasi S*.

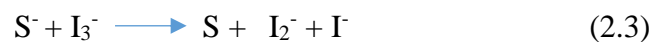


Eksitasi pewarna (S*) tersebut diikuti oleh transfer elektron dari pita valensi (VB) semikonduktor CuO menuju ke pewarna (pewarna akan menginjeksikan *hole* menuju pita valensi semikonduktor CuO), sehingga terjadi pengurangan molekul

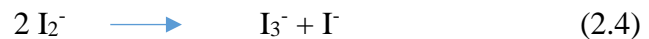
pewarna. Akibat dari transfer elektron tersebut, pewarna (S^*) bermuatan negatif karena menerima elektron (S^-).



Sejumlah *hole* yang telah diinjeksikan akan melewati nanopartikel semikonduktor CuO menuju kaca TCO (berdifusi melalui elektroda konduktor TCO), selanjutnya *hole* akan melewati sirkuit eksternal dan mencapai elektroda lawan dimana akhirnya mengoksidasi mediator/elektrolit. Ion elektrolit yang teroksidasi akan meregenerasi molekul pewarna (S) dalam keadaan dasar (*ground state*).



Ion triiodide (I_3^-) akan meregenerasi pewarna (S) untuk membentuk ion diiodide (I_2^-) dan selanjutnya akan terbentuk triiodide dan iodide kembali:



Regenerasi ion elektrolit yang tereduksi terjadi pada elektroda lawan :



Selanjutnya pewarna akan mengalami peluruhan menuju ke keadaan dasar:



Adapun hal yang tidak diinginkan dari DSSC yaitu terjadinya rekombinasi pewarna yang telah tereduksi dengan *hole* pada semikonduktor CuO:



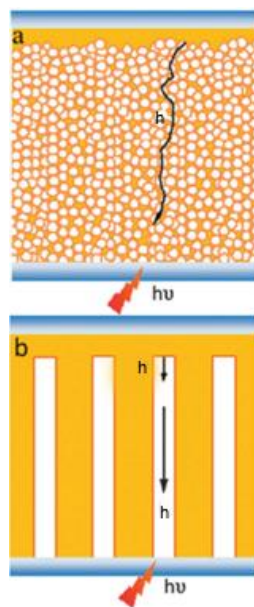
2.4 Macam-Macam Morfologi CuO

Berbagai macam variasi morfologi CuO yang dapat dibentuk di antaranya yaitu bentuk 0 dimensi seperti nanopartikel, bentuk 1 dimensi seperti nanowire, nanorod, nanotube, bentuk 2 dimensi nanostruktur, dan beberapa bentuk 3 dimensi nanostruktur kompleks. Metode-metode untuk proses sintesis CuO bervariasi pula, antara lain metode hidrotermal, elektrokimia, presipitasi kimia, dan lain-lain (Zhang, Zhang, Xu, Yang, & Huang, 2014).

Morfologi lapisan semikonduktor oksida dan sifat-sifatnya seperti luas permukaan, diameter partikel, dan bentuknya, menunjukkan derajat kontak antarpartikel yang bervariasi, difusi elektrolit, penyerapan zat pewarna, dan kepadatan yang mempengaruhi terjebakannya elektron (Ako, Ekanayake, & Lim, 2016).

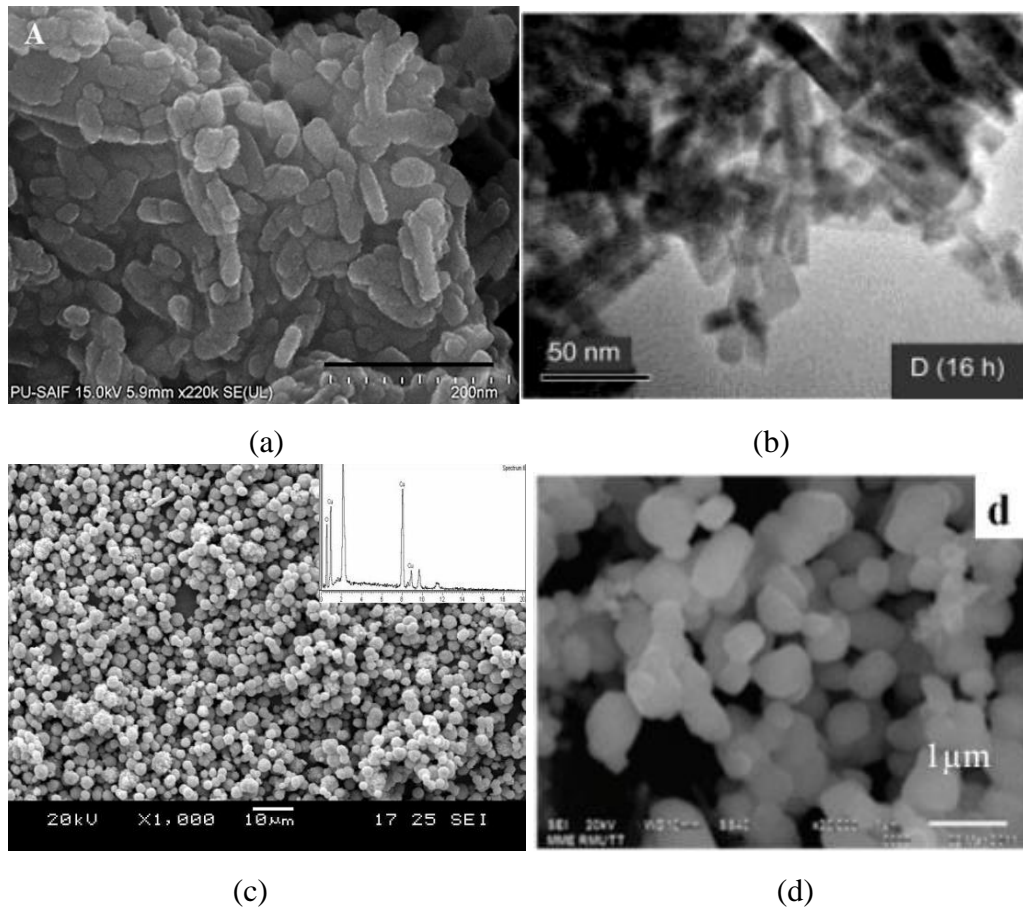
Morfologi CuO yang berbeda memiliki lebar celah pita yang bervariasi, dimana hal tersebut akan mempengaruhi aktivitas katalitiknya. Di antara CuO yang telah disintesis, lebar celah pita ini dievaluasi berdasarkan Metodologi Tauc. Hasilnya menunjukkan bahwa celah pita dengan variasi morfologi CuO nanorod, bentuk mirip anemon laut, dan fiber masing-masing yaitu 1,47, 1,51, dan 1,67 eV. Semua lebar celah pita ini aktif di wilayah UV-C dan bentuk nanorod menunjukkan katalis paling aktif di antara variasi morfologi tersebut (Fard, Fazaeli, Yousefi, & Abdolmohammadi, 2019).

Pada morfologi nanorod, memungkinkan transfer hole yang dihasilkan dari foton terjadi dengan cepat dan efisien dari molekul pewarna menuju ke substrat kaca FTO, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.3. Transfer hole pada nanorod menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan semikonduktor morfologi nanopartikel yang memungkinkan terjadinya rekombinasi elektron-hole lebih besar. Namun pada DSSC dengan semikonduktor morfologi nanopartikel akan mengisi ruang lebih banyak sehingga area permukaan meningkat sangat besar dan akan lebih banyak zat pewarna yang diserap ke dalam lapisan (Ai, Sun, Zhang, & Peng, 2011).



Gambar 2.3 Skema transfer elektron pada DSSC dengan morfologi semikonduktor oksida (a) nanopartikel dan (b) nanorod (Ai, Sun, Zhang, & Peng, 2011)

Berikut merupakan contoh dari berbagai CuO nanopartikel dan nanorod yang telah disintesis dari berbagai sumber.



Gambar 2.4 Hasil uji SEM (a,b) CuO nanorod dan (c,d) CuO nanopartikel (Singh, Panday, Rawat, Kukkar, & Basu, 2017; Chang & Zeng, 2004; Kannaki, Ramesh, & Geetha, 2012; Wongpisutpaisan, Charoonsuk, Vittayakorn, & Pecharapa, 2011).

Pada gambar 2.4 (a) menunjukkan CuO nanorod yang disintesis dengan metode sederhana menggunakan prekursor $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COOH})_2$ dan surfaktan CTAB dengan perbandingan molar 1:2, serta tambahan larutan NaOH. Sintesis tersebut menghasilkan CuO nanorod dengan rata-rata ukuran partikel yang dihasilkan sebesar 16 nm dalam rentang sebesar 10-100 nm (Singh, Panday, Rawat, Kukkar, & Basu, 2017). Pada gambar 2.4 (b) menunjukkan CuO nanorod yang disintesis dengan metode *wet-chemical* menggunakan prekursor 20 ml $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

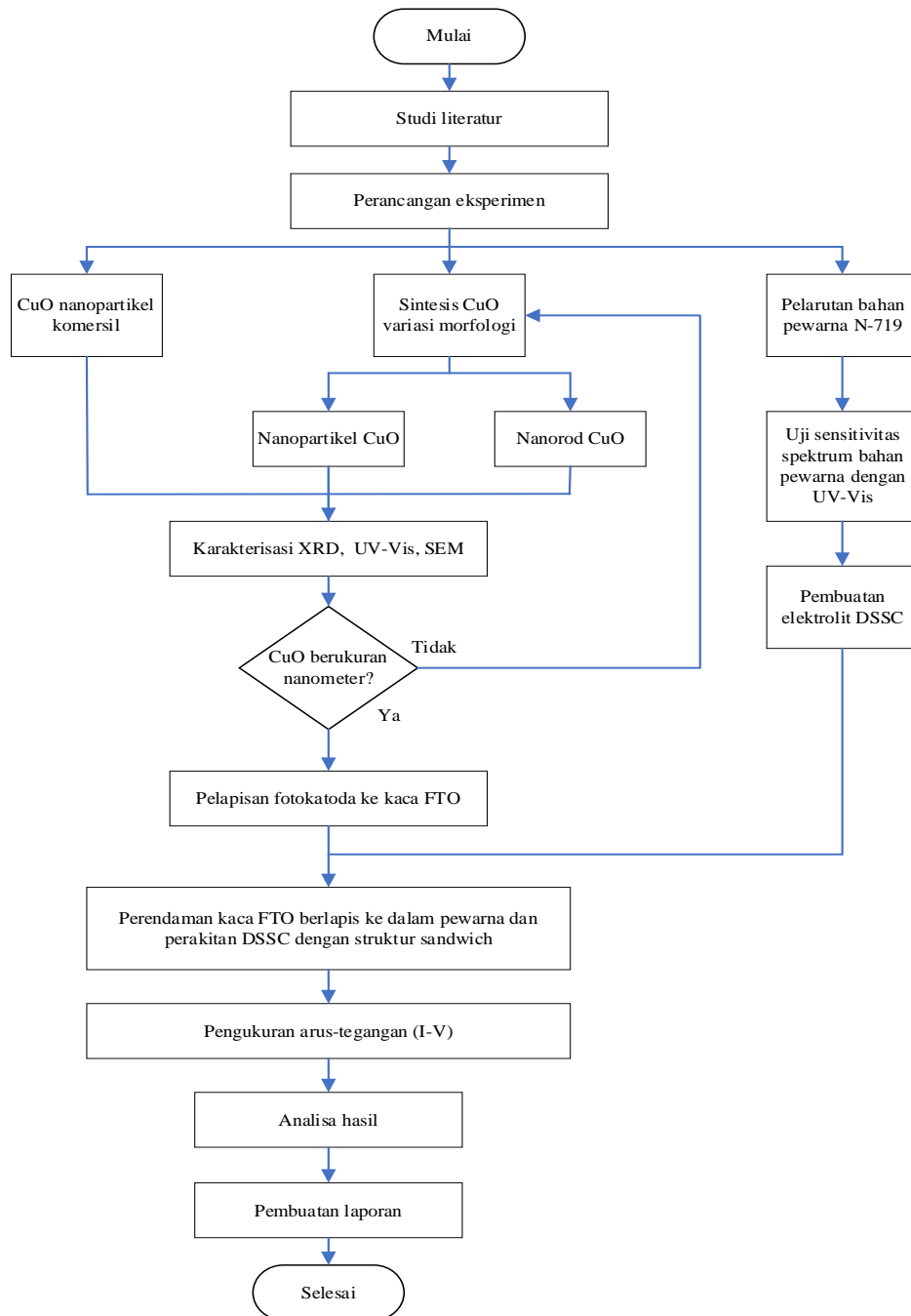
(0,08M, pada ethanol murni), 20 ml larutan NaOH (0,5 M, pada ethanol murni), dan 40 ml *deionized water*. Sintesis tersebut menghasilkan CuO nanorod dengan ukuran sebesar 10-15 nm dengan panjang mencapai 1 μ m (Chang & Zeng, 2004). Pada gambar 2.4 (c) menunjukkan CuO nanopartikel yang disintesis dengan metode hidrotermal menggunakan prekursor 0,1 mol CuSO₄.5H₂O yang dilarutkan dalam kombinasi air suling dan ethanol dengan perbandingan (1:1), dan 0,1 mol larutan amonia. Sintesis tersebut menghasilkan CuO nanopartikel dengan rentang ukuran sebesar 9,73-26,69 nm (Kannaki, Ramesh, & Geetha, 2012). Pada gambar 2.4 (d) menunjukkan CuO nanopartikel yang disintesis dengan metode *sonochemical* menggunakan prekursor Cu(NO₃)₂.3H₂O (0,1 M, 50 ml) dan NaOH (0,5 M, 50 ml). Setelah larutan tersebut disonikasi, dilanjutkan dengan proses kalsinasi pada 400-700°C selama 2 jam. Pada gambar 2.4 (d) tersebut merupakan SEM sampel CuO yang dikalsinasi pada 700°C. Pada temperatur kalsinasi tersebut didapatkan CuO nanopartikel dengan rentang ukuran sekitar 50-70 nm (Wongpisutpaisan, Charoonsuk, Vittayakorn, & Pecharapa, 2011).

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Secara umum tahapan penelitian Tugas Akhir ini dapat digambarkan dalam diagram alir sebagai berikut :



Gambar 3. 1 Skema diagram alir penelitian Tugas Akhir

3.2 Persiapan Alat dan Bahan

Bahan yang diperlukan untuk sintesis CuO nanopartikel adalah kristal tembaga (I) sulfat pentahidrat ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), amonia (NH_3 ; 25%), air suling (*aquadest*), dan etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Adapun bahan yang diperlukan untuk sintesis CuO nanorod yaitu menggunakan prekursor tembaga (I) asetat [$\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COOH})_2$], CTAB, natrium hidroksida (NaOH), air suling (*aquadest*), etanol, dan air *deionized*. Adapun untuk CuO nanopartikel komersil dibeli dari *Merck Chemical Company*. Bahan yang diperlukan untuk perakitan DSSC di antaranya pembuatan pasta fotokatoda CuO yaitu membutuhkan etanol. Bahan yang digunakan sebagai substrat DSSC adalah kaca *Indium Tin Oxide* (ITO) (tipe soda-lime, resistansi $8\Omega/\text{sq}$, tebal 3,2 mm, Dyesol). Bahan untuk larutan elektrolit adalah kalium iodida (KI), *acetonitrile*, iodide (I_2), PEG 4000, *chloroform*.

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini di antaranya gelas kimia, gelas ukur, pipet tetes, spatula logam, spatula keramik, timbangan digital, *magnetic stirrer*, *hot plate*, *vacuum oven*, *furnace*, mortal alu, dan kertas saring.

3.3 Sintesis CuO Nanopartikel

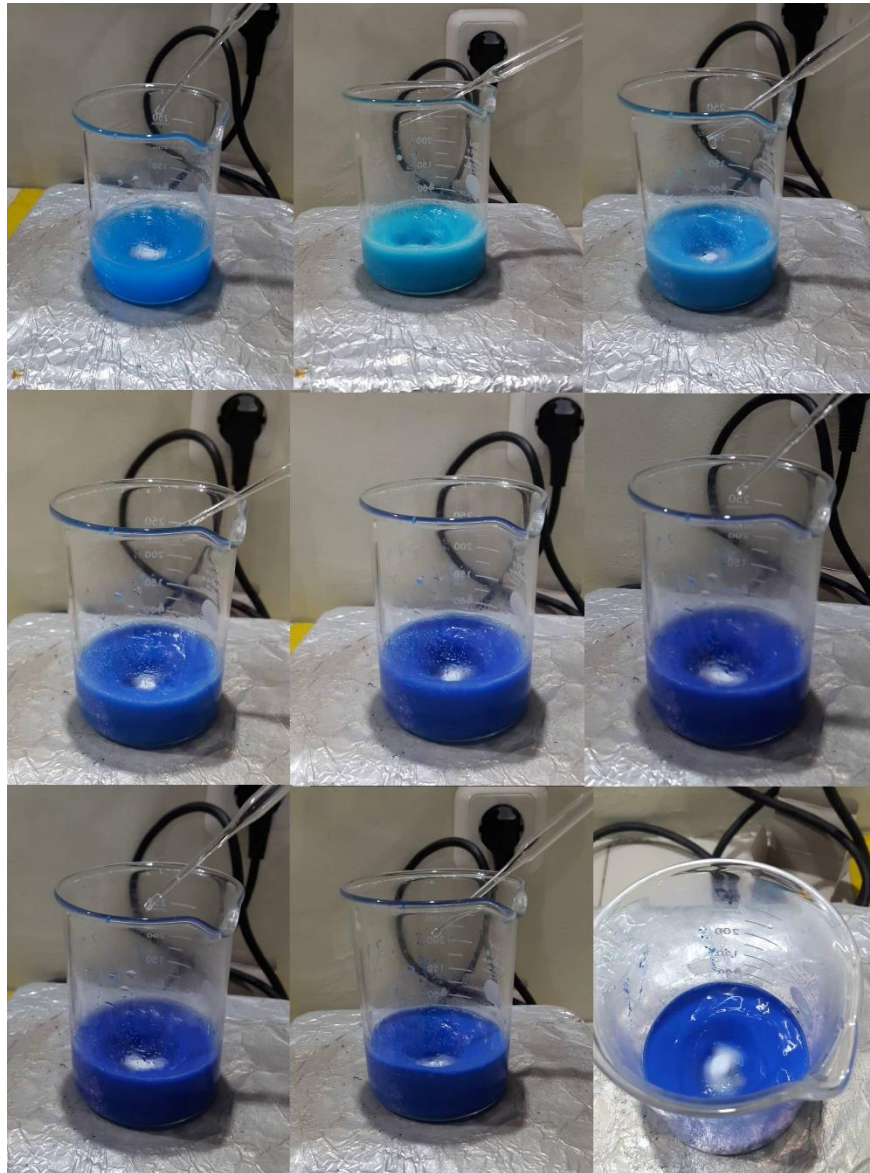
CuO nanopartikel disintesis menggunakan metode hidrotermal dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- i. $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 1,0 mol% dilarutkan ke dalam kombinasi (1:1) air suling dan etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) untuk mendapatkan larutan berwarna biru



Gambar 3. 2 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 1,0 mol% yang sudah dilarutkan dalam kombinasi air suling dan etanol

- ii. Larutan amonia (NH_3) 0,1 mol ditambahkan tetes demi tetes sambil diaduk kuat menggunakan *magnetic stirrer* untuk menstabilkan tingkat pH



Gambar 3. 3 Perubahan warna larutan $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ketika ditambahkan tetesan larutan 0,1 mol NH_3 dari biru muda bening menjadi biru gelap pekat

- iii. Setelah campuran prekursor homogen terbentuk, endapan $\text{Cu}(\text{OH})_2$ akan dihasilkan dari reaksi



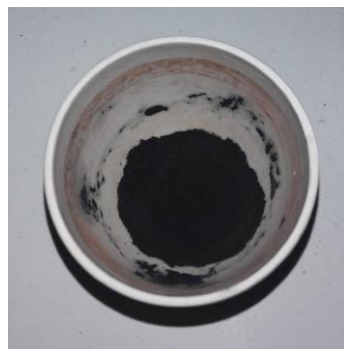
Gambar 3. 4 Endapan yang terbentuk berupa senyawa $\text{Cu}(\text{OH})_2$

- iv. Endapan disaring dan dicuci dengan air suling dan etanol beberapa kali untuk menghilangkan impuritas
- v. Hasil endapan selanjutnya dipanaskan menggunakan oven dengan temperatur 80°C selama 3 jam



Gambar 3. 5 $\text{Cu}(\text{OH})_2$ dipanaskan terlebih dahulu menggunakan oven

- vi. Sampel lalu dikeringkan pada suhu 450°C selama 6 jam menggunakan *furnace oven*, CuO akan terbentuk jika menunjukkan perubahan warna hitam.

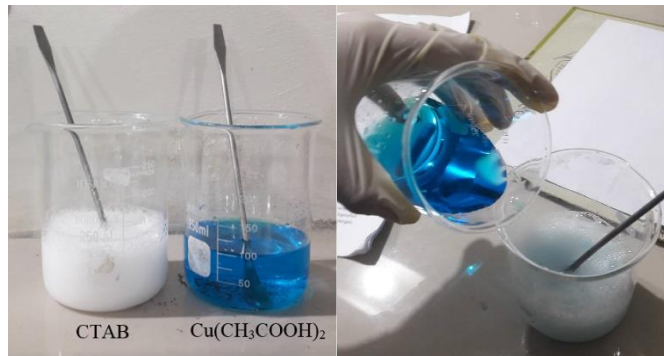


Gambar 3. 6 Hasil akhir sintesis CuO nanopartikel

3.4 Sintesis CuO Nanorod

CuO nanorod disintesis dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- i. Larutan encer dibuat dari $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COOH})_2$ dan surfaktan CTAB dengan perbandingan molar sebesar 1:2



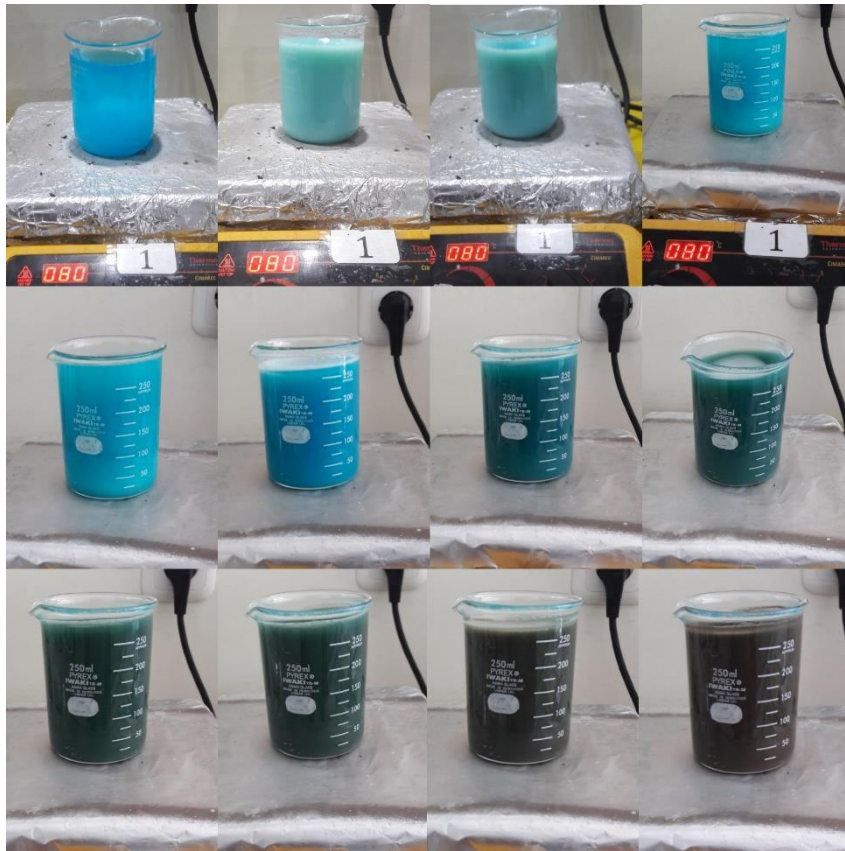
Gambar 3. 7 Prekursor $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COOH})_2$ dan surfaktan CTAB yang sudah dilarutkan

- ii. Larutan tersebut diaduk menggunakan *magnetic stirrer* dengan temperatur 80°C selama 2 menit



Gambar 3. 8 Larutan dipanaskan pada temperatur 80°C selama 2 menit

- iii. Setelah itu, NaOH 1 M ditambahkan tetes demi tetes menggunakan pipet tetes ke dalam campuran larutan hingga larutan perlahan-lahan berubah warna menjadi coklat kehitaman dengan pH sekitar 11,5



Gambar 3. 9 Perubahan warna larutan $\text{Cu}(\text{CH}_3(\text{COOH}))_2$

- iv. Reaksi dilanjutkan selama 2 jam pada suhu yang sama
- v. Selanjutnya suspensi nanorod tersebut dicuci dengan etanol dan air *deionized* dengan tujuan untuk memurnikan endapan
- vi. Endapan yang sudah dicuci lalu dikeringkan selama satu malam (12 jam) dengan temperatur 80°C pada *vacuum oven* hingga terbentuk sampel bubuk berwarna hitam.

3.5 Karakterisasi Nanopartikel dan DSSC

Karakterisasi pada nanopartikel dan nanorod CuO dilakukan untuk mengetahui karakteristik dari semikonduktor tipe p CuO. Adapun karakterisasi yang dilakukan di antaranya yaitu uji XRD, UV-Vis, dan SEM. Performansi DSSC diketahui dengan melakukan pengukuran arus tegangan (I-V).

3.5.1 Pengujian XRD

Sinar-X merupakan bentuk radiasi elektromagnetik dengan panjang gelombang relatif pendek dibanding cahaya tampak (berkisar antara 10^{-7} - 10^{-15} m) dan memiliki energi yang tinggi. Ketika seberkas sinar-X mengenai material padat, sebagian dari sinar tersebut akan mengalami difraksi dan tersebar ke segala arah oleh elektron yang terkait dalam setiap atom atau ion yang terletak di dalam jalur berkas kisi periodik. Dengan asumsi hamburan berkas sinar-X yang dibiaskan dari bidang kristal material padat tersebut adalah sejajar, monokromatik, dan koheren (dari panjang gelombang λ) pada kedua bidang di sudut θ , maka akan terjadi interferensi konstruktif, dengan kata lain membentuk pola interferensi yang saling menguatkan untuk sudut-sudut yang memenuhi Hukum Bragg (Callister, 2009).

Dari urutan jarak interatomik, tipikal panjang gelombang yang akan menyebabkan terjadinya difraksi untuk menghasilkan interferensi memerlukan panjang gelombang dengan rentang sekitar 0,07 hingga 0,2 nm. Rentang tersebut bersesuaian dengan spektrum elektromagnetik berupa panjang gelombang sinar-X yang memiliki energi foton di antara 3 hingga 8 eV. Dengan memanfaatkan hamburan dari sinar-X tersebut, suatu material dapat dikarakterisasi pola difraksi, fasa, ukuran, dan bentuk dimensi sel satuan (*unit cell*) kristal. Metode tersebut dinamakan *X-Ray Diffraction* (XRD). Umumnya sebagian besar laboratorium menggunakan sumber radiasi $\text{CuK}\alpha$ dengan panjang gelombang (λ) 1,54056 Å untuk mengevaluasi pola XRD (Misture & Snyder, 2001).

Persyaratan yang harus dipenuhi agar berkas sinar-X yang dihamburkan merupakan berkas difraksi dikenal sebagai Hukum Bragg yang menyatakan bahwa perbedaan lintasan berkas difraksi sinar-X harus merupakan kelipatan panjang gelombang, dirumuskan secara matematis sebagai berikut:

$$n\lambda = 2 d \sin\theta \quad (3.1)$$

dengan n adalah bilangan bulat, λ adalah panjang gelombang sinar-X, d adalah jarak antarbidang, dan θ adalah sudut difraksi. Untuk menghitung ukuran kristal dari nanopartikel digunakan persamaan *Scherrer* :

$$D_{hkl} = \frac{k\lambda}{\beta_{hkl} \cos\theta} \quad (3.2)$$

Dimana:

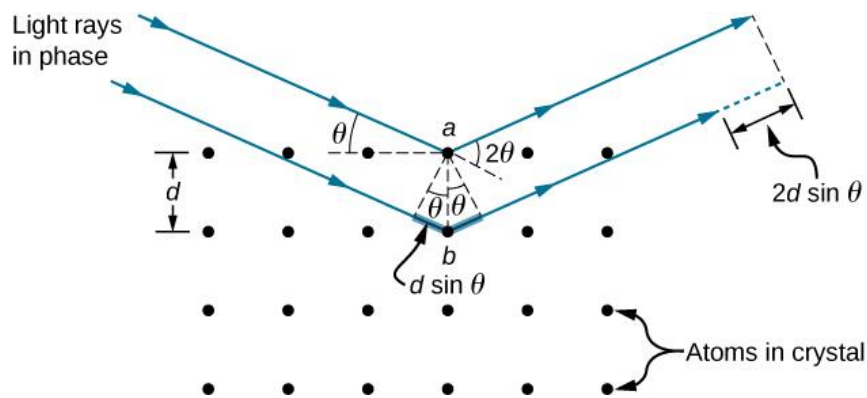
D_{hkl} = rata-rata ukuran butir suatu bahan (nm)

k = konstanta

λ = panjang gelombang sinar-X

β_{hkl} = *Full Width Half Maximum* (FWHM) (radian)

θ = sudut Bragg



Gambar 3. 10 Difraksi sinar-X pada struktur kristal (Ling, Sanny, & Moebis, 2016)

Dengan menggunakan data XRD, penyimpangan pada struktur kristal dapat dijelaskan dengan menghitung kerapatan dislokasi (δ). Adanya dislokasi pada kristal akan sangat mempengaruhi sifat material, oleh karena itu, kepadatan dislokasi (δ) diamati dengan menggunakan persamaan Williamson-Smallman (Hassan, et al., 2017) sebagai berikut:

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

Adapun untuk memahami hubungan perluasan puncak dengan regangan kisi (*lattice strain*), digunakan rumus Stokes – Wilson yang diberikan pada persamaan berikut:

$$\varepsilon = \frac{\beta_{hkl}}{4 \tan \theta} \quad (3.4)$$

Dengan substitusi persamaan Scherrer ke (3.4), maka ukuran kristal dan parameter kisi dikonfirmasi ulang menggunakan metode *Williamson-Hall* (W-H) *Plot* menggunakan persamaan berikut:

$$\beta_{hkl} = \beta_D + \beta_s \quad (3.5)$$

$$\beta_{hkl} = \left(\frac{k\lambda}{D \cos \theta} \right) + 4\epsilon \tan \theta \quad (3.6)$$

$$\beta_{hkl} \cos \theta = \left(\frac{k\lambda}{D} \right) + 4\epsilon \sin \theta \quad (3.7)$$

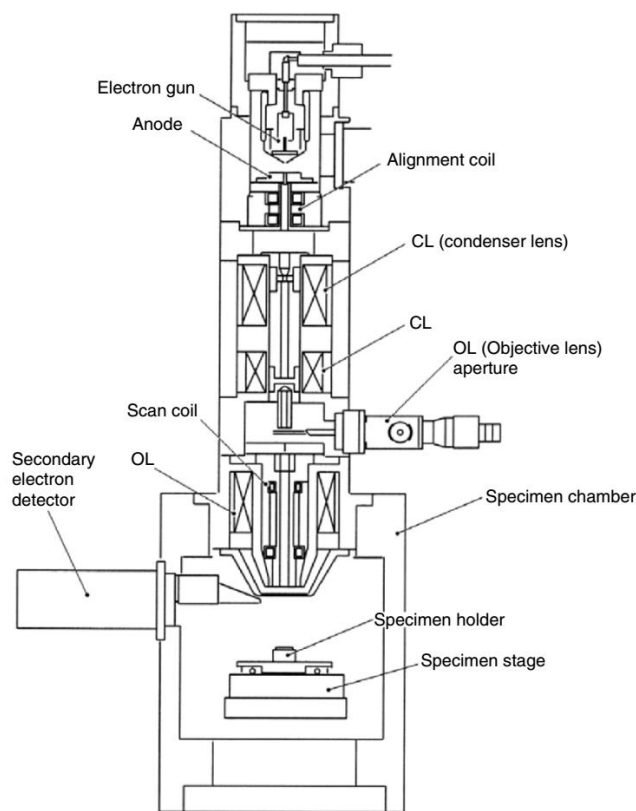
Persamaan di atas merupakan persamaan *Williamson-Hall*. W-H plot digambar dengan $4\sin\theta$ sepanjang sumbu x, sedangkan $\beta_{hkl} \cos\theta$ sepanjang sumbu y untuk sampel CuO. Dengan menggunakan *fit linear* pada data, ukuran kristal dapat diketahui dari nilai intersep, dan regangan kisi (ϵ) diketahui dari kemiringan garis (Mote, Purushotham, & Dole, 2012). Regangan kisi yang dihitung menggunakan metode W-H plot dianggap seragam di semua arah kristal. Tanda negatif (-) dari regangan yang dihitung mewakili adanya regangan kompresional (Hassan, et al., 2017).

3.5.2 Pengujian SEM

Dengan adanya keterbatasan penglihatan manusia untuk melihat benda-benda berukuran kecil, maka diciptakan dan dikembangkan suatu alat yaitu mikroskop. Mikroskop dibagi menjadi 2 jenis berdasarkan sumbernya, yaitu (i) mikroskop optik atau cahaya dan (ii) mikroskop elektron. Baik mikroskop optik maupun mikroskop elektron, keduanya memiliki prinsip kerja yang hampir sama. Perbedaan utamanya terletak pada sumber, jika pada umumnya mikroskop yang ditemui menggunakan sumber cahaya tampak dan lensa optik, sedangkan pada mikroskop elektron menggunakan sumber elektron terfokus yang berenergi tinggi. Salah satu jenis mikroskop elektron tersebut yaitu *Scanning Electron Microscope* (SEM). SEM berfungsi untuk memindai gambar permukaan sampel melalui deteksi sinyal-sinyal berbeda yang dihasilkan dari dampak berkas elektron terfokus berenergi tinggi yang mengenai permukaan sampel. SEM merupakan sistem elektronik dan optik yang terdiri dari komponen-komponen berikut:

- a. Penembak elektron (*electron gun*)
- b. Ruang vakum
- c. Kolom: lensa kondenser, koil pemindaian (*scanning coil*), stigmator lensa objektif, tempat sampel (*specimen holder*), dan detektor (Akhtar, Khan, Khan, & Asiri, 2018).

Penembak elektron (*electron gun*) pada SEM biasanya terbuat dari filamen tungstens yang terletak di bagian atas kolom. Penembak elektron ini berfungsi untuk menghasilkan elektron dan elektron tersebut diakselerasi ke tingkat energi 0,1-30 keV. Filamen tungstens ini berdiameter sekitar 100 μm dan diameter tersebut terlalu besar untuk menghasilkan gambar beresolusi tinggi. Oleh karena itu digunakan lensa kondenser yang berfungsi untuk memfokuskan dan menentukan berkas elektron untuk membentuk titik akhir yang dibutuhkan (1-100 nm) agar terfokus pada sampel.



Gambar 3. 11 Skema alat *scanning electron microscope* (SEM) (Zhou, Apkarian, Wang, & Joy, 2007)

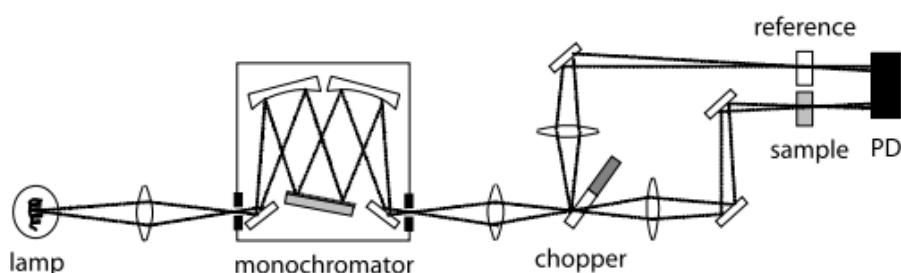
Setelah berkas elektron terfokus, berkas elektron tersebut akan memindai seluruh sampel. Dengan merekam besarnya sinyal-sinyal yang terdeteksi oleh detektor, maka akan diperoleh informasi sampel. Namun, informasi ini hanya berasal dari satu titik tunggal yang ditimbulkan oleh berkas elektron. Untuk membentuk informasi tersebut menjadi gambar, tempat pemeriksaan harus dipindahkan dari satu tempat ke tempat lain oleh sistem pemindai. Dalam hal ini, koil pemindai

(*scanning coil*) berfungsi untuk membelokkan berkas elektron sehingga permukaan sampel dapat dipindai sepanjang sumbu x atau y. Adapun lensa objektif digunakan untuk memfokuskan berkas elektron ke titik pemindaian di permukaan sampel dan untuk menghasilkan pengurangan diameter berkas elektron agar meningkatkan resolusi gambar. Sistem alat SEM ini dikondisikan dalam keadaan vakum agar perjalanan berkas elektron menuju sampel tidak terjadi hamburan oleh udara (Zhou, Apkarian, Wang, & Joy, 2007).

3.5.3 Pengujian UV-Vis

UV-Vis spektrofotometri merupakan suatu pengukuran redaman radiasi elektromagnetik dari penyerapan (absorbansi) suatu material. Rentang spektral UV-Vis berkisar antara 190-900 nm. Fungsi dari UV-Vis spektrofotometri yaitu untuk melakukan pengukuran kuantitatif sehingga didapat hubungan linear antara absorbansi dan konsentrasi larutan (*absorber*) (Tissue, 2012).

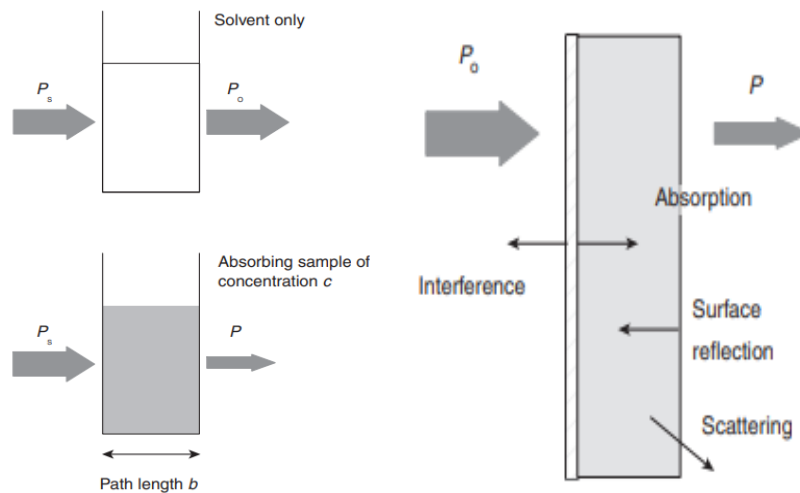
Suatu molekul dapat tereksitasi dari pita energi rendah (E_1) menuju ke tingkat lebih tinggi perlu energi dari luar molekul tersebut. Energi foton dari panjang gelombang UV-Vis cukup untuk mengeksitasi elektron pada molekul ke tingkat energi yang lebih tinggi (Guha & Nakamoto, 2005), sehingga UV-Vis spektroskopi dapat berguna untuk menentukan sifat optik dan elektronik dari banyak bahan. Adapun skema UV-Vis spektroskopi dapat dilihat pada ilustrasi berikut:



Gambar 3. 12 UV-Vis spektrofotometri (Hollas, 2004)

Prinsip kerja secara umum dari UV-Vis spektrofotometri ini yaitu, ketika cahaya melewati atau berinteraksi dengan zat penyerap (sampel), maka setelah melewati zat penyerap tersebut terjadi pelemahan (atenuasi) cahaya. Atenuasi dapat

disebabkan oleh penyerapan, hamburan, refleksi, atau gangguan. Penyebab pelemahan tersebut sering diabaikan atau dianggap tidak penting bagi identifikasi karakteristik bahan optik, yang menjadi prioritas adalah mengukur total transmitansi atau reflektansi untuk menentukan sifat optik dari suatu bahan (Tissue, 2012).



Gambar 3. 13 Skema transmitansi cahaya dalam melewati suatu zat penyerap (sampel) (Tissue, 2012)

Transmitansi didefinisikan dalam persamaan berikut:

$$T = \frac{P}{P_0} \quad (3.8)$$

dimana P adalah daya radiansi (energi radiasi per waktu) setelah melewati sampel dan P_0 adalah daya radiasi awal. Hubungan transmitansi dalam hal intensitas cahaya adalah sebagai berikut:

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

Hubungan antara absorbansi, A , dan transmitansi, T , yang telah diukur secara eksperimental adalah sebagai berikut:

$$A = -\log T = -\log \frac{P}{P_0} = -\log \frac{I}{I_0} \quad (3.10)$$

Dimana A dan T keduanya adalah kuantitas tanpa dimensi. Namun kadang absorbansi ditulis satuan dalam *absorbance units* (a.u.) untuk menghindari ambiguitas. Dari perhitungan tersebut biasanya dipresentasikan dalam bentuk

spektrum absorpsi dengan plot absorbansi (A) terhadap panjang gelombang (λ) (Tissue, 2012)

Absorbansi (A) cahaya oleh sampel berbanding lurus dengan jarak yang ditempuh cahaya melalui sampel dan konsentrasi zat penyerap. Hubungan linear antara data absorbansi dengan data kadar larutan ini dikenal sebagai Hukum Beer-Lambert. Hukum ini memungkinkan pengukuran konsentrasi yang akurat dari molekul yang berada dalam sampel (Laqua, 1988). Hukum Beer-Lambert dapat ditulis dalam persamaan berikut:

$$A = \varepsilon \cdot b \cdot c \quad (3.11)$$

disini A merupakan absorbansi, ε disebut koefisien absorpsi molar ($M^{-1}cm^{-1}$), b adalah ketebalan kuvet tempat diletakkannya sampel (cm), dan c adalah konsentrasi zat terlarut (M) (Hollas, 2004).

Selain untuk mengetahui tingkat absorbansi suatu material, dari data UV-Vis dapat juga ditentukan besar energi celah pita (E_g) dengan cara data absorbansi tersebut diplot secara tepat sehubungan dengan energi foton ($h\nu$). Teori Tauc menunjukkan bahwa kekuatan penyerapan optik tergantung pada perbedaan antara energi foton dan celah pita seperti ditunjukkan pada persamaan berikut:

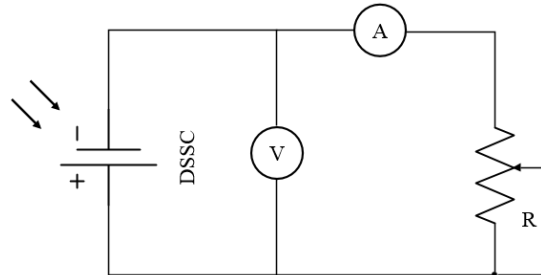
$$(\alpha h\nu)^{\frac{1}{n}} = A(h\nu - E_g) \quad (3.12)$$

di mana h adalah konstanta *Planck* ($6,62 \times 10^{-34}$ Js), ν adalah frekuensi foton, α adalah koefisien absorpsi, E_g adalah energi celah pita, dan A adalah konstanta independen energi. Nilai eksponen (n) menunjukkan sifat transisi. Umumnya, jika suatu material digolongkan mempunyai energi celah pita langsung (*direct band gap*) maka $n=2$ dan jika material tersebut mempunyai energi celah pita tidak langsung (*indirect band gap*) maka $n=1/2$ (Viezbicke, Patel, Davis, & Birnie, 2015).

3.5.4 Pengujian Arus Tegangan (I-V)

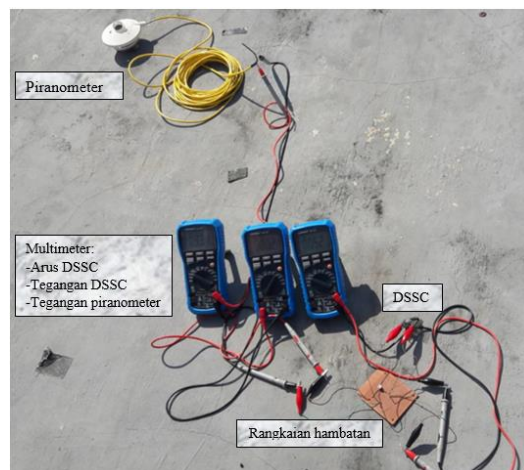
Tujuan pengukuran arus dan tegangan adalah untuk mengetahui kurva I-V dan efisiensi DSSC yang dihasilkan dari setiap sampel. Dalam pengukuran ini yang pertama dilakukan adalah membuat rangkaian hambatan sesuai gambar 3.14. Tujuan dari dibuatnya rangkaian hambatan ini yaitu agar arus dapat mengalir pada rangkaian DSSC ketika diberi hambatan, sehingga I-V dapat diukur. Rangkaian

hambatan ini menggunakan potensiometer sebagai resistor agar nilai resistansi dapat diatur.



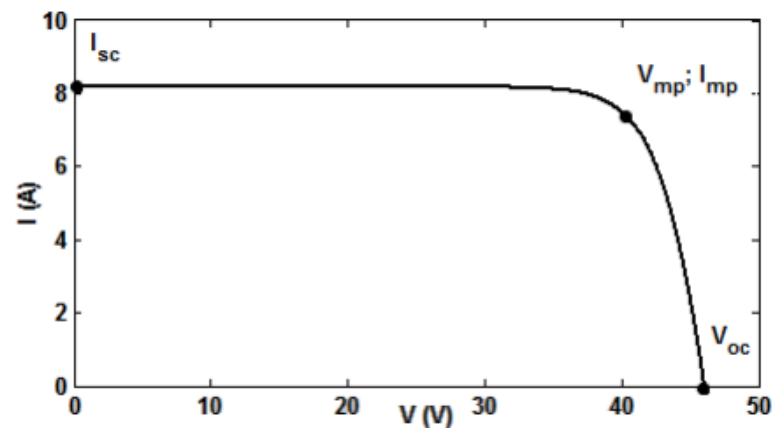
Gambar 3. 14 Skema rangkaian hambatan untuk menghasilkan arus pada pengujian DSSC

Untuk pembacaan arus dan tegangan diukur menggunakan multimeter. Kemudian DSSC yang telah dirakit dihubungkan dengan rangkaian hambatan yang telah dibuat. Cara mengambil data pengukuran I-V adalah dengan mengatur nilai resistansi dari terkecil hingga terbesar kemudian dicatat arus dan tegangan yang keluar dari multimeter untuk setiap perubahan nilai resistansi yang diatur. Selanjutnya data hasil pengukuran I-V diplot menjadi kurva I-V. Selain itu, dipasang juga piranometer untuk mengetahui besar intensitas matahari pada saat pengukuran I-V berlangsung.



Gambar 3. 15 Susunan alat saat melakukan pengukuran I-V pada DSSC

Daya listrik yang dihasilkan sel surya ketika mendapat cahaya diperoleh dari kemampuan perangkat sel surya tersebut untuk memproduksi tegangan dan arus. Kemampuan ini direpresentasikan dalam kurva arus tegangan (I-V) ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 3. 16 Kurva arus tegangan (I-V) pada perangkat sel surya (Cubas, Pindado, & de Manuel, 2014)

Gambar di atas memperlihatkan tegangan *open-circuit* (V_{oc}), Arus *short circuit* (I_{sc}), *Maximum Power Point* (MPP), dan arus tegangan pada MPP, yaitu I_{MPP} dan V_{MPP} diperoleh dari hasil pengukuran I-V pada DSSC. Ketika sel dalam kondisi *short circuit*, maka arus maksimum atau arus *short circuit* (I_{sc}) akan dihasilkan, sedangkan pada kondisi *open circuit* yang terjadi adalah tidak adanya arus yang dapat mengalir, sehingga tegangannya maksimum. Tegangan maksimum ini disebut tegangan *open-circuit* (V_{oc}). Titik pada kurva I-V yang menghasilkan arus dan tegangan maksimum disebut titik daya maksimum (MPP). Karakteristik penting lainnya dari sel surya yaitu *fill factor* (FF), merupakan luas maksimum yang dapat dibentuk pada daerah di bawah kurva I-V dengan persamaan:

$$FF = \frac{V_{MPP} \cdot I_{MPP}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (3.13)$$

Dengan menggunakan *fill factor* maka maksimum daya dari sel surya (P_{Max}) dapat diperoleh dari persamaan:

$$P_{Max} = V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF \quad (3.14)$$

Sehingga efisiensi sel surya yang didefinisikan sebagai daya maksimum yang dihasilkan dari sel (P_{Max}) dibagi dengan daya dari cahaya yang datang (P_{cahaya}):

$$\eta = \frac{P_{Max}}{P_{cahaya}} \quad (3.15)$$

Nilai efisiensi ini yang menjadi ukuran global dalam menentukan kualitas performansi sel surya. Efisiensi dari sel surya tergantung pada temperatur dari sel dan yang lebih penting lagi adalah kualitas iluminasi. Misalnya total intensitas cahaya dan intensitas spektrum yang terdistribusi. Oleh karena itu, standar kondisi pengukuran harus dikembangkan sejalan dengan pengujian sel surya di laboratorium. Kondisi standar yang telah digunakan untuk menguji solar sel dengan intensitas cahaya 1000 W/m^2 , dan temperatur sel 25°C . Besaran yang dikeluarkan dari sel surya yaitu I , V , V_{oc} , I_{sc} , dan M_{pp} (V_{mpp} , I_{mpp}) pada kondisi ini adalah daya normal dari sel, atau modul, dan dicatat sebagai puncak daya (*peak watt*), W_p (Green, 1982).

Adapun untuk mengetahui nilai iradiansi cahaya matahari dari alat ukur piranometer yang menghasilkan keluaran berupa satuan milivolt, dilakukan konversi satuan dari mV menjadi W/m^2 sesuai dengan buku manual instruksi alat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$I (\text{W/m}^2) = \frac{E}{S} \quad (3.16)$$

Dengan:

I = Iradiansi cahaya matahari (W/m^2)

E = *Output* tegangan hasil pembacaan dari piranometer (μV)

S = Sensitivitas dari piranometer yang tertera pada sertifikat kalibrasi ataupun pada label alat ($\mu\text{V/Wm}^{-2}$)

Besar nilai sensitivitas dari alat piranometer yang digunakan pada penelitian ini yaitu sebesar $14,36 \mu\text{V/Wm}^{-2}$, seperti dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 3. 17 Label yang tertera pada piranometer menampilkan nilai sensitivitas alat

3.6 Prosedur Perakitan DSSC

3.6.1 Pembuatan Elektrolit

Pasangan redoks iodide/triiodide merupakan elektrolit yang akan digunakan pada penelitian ini. Adapun langkah-langkah dalam pembuatan elektrolit ini adalah sebagai berikut:

- i. Kalium iodida (KI) 0,8 gram dilarutkan dalam 10 ml *acetonitrile* hingga larut sepenuhnya
- ii. Selanjutnya 0,127 gram iodide (I_2) ditambahkan ke dalam larutan elektrolit sambil terus diaduk hingga I_2 larut
- iii. PEG 4000 sebanyak 7 gram dilarutkan dalam 25 ml *chloroform* hingga larut sempurna dan membentuk gel
- iv. Larutan elektrolit kemudian dicampur dengan gel tersebut dan diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 1 jam pada suhu 80°C .

3.6.2 Pembuatan Pewarna sebagai *Sensitizer*

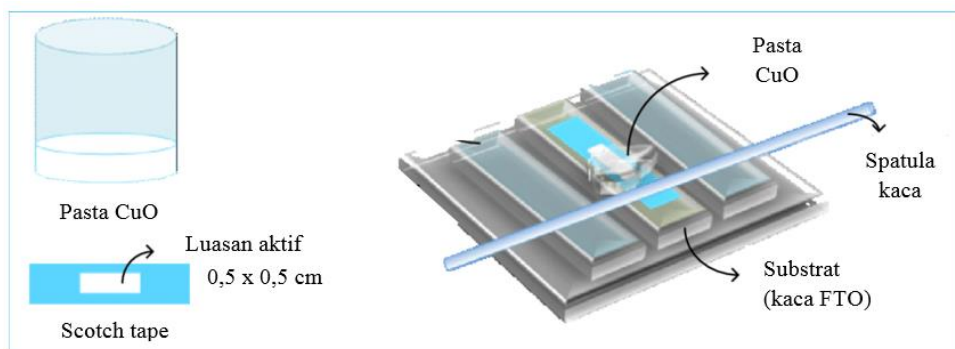
Ruthenium kompleks N-719 merupakan pewarna industri standar yang akan digunakan dalam penelitian ini. Pewarna anorganik ini memiliki warna merah bata. Pewarna yang digunakan adalah 0,3 mM larutan $C_{58}H_{86}N_8O_8RuS_2$ (N-719).

3.6.3 Pembuatan Pasta Fotokatoda CuO

Pembuatan pasta fotokatoda CuO yaitu sebanyak 0,5 g CuO hasil sintesis ditetesi dengan ethanol dengan 1 mL kemudian diaduk sampai tercampur rata (Prabhin, 2017).

3.6.4 Fabrikasi DSSC

Proses fabrikasi DSSC dimulai dengan pelapisan pasta fotokatoda CuO ke kaca FTO. Metode yang digunakan adalah *doctor blade*. Adapun metode tersebut dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 3. 18 Pelapisan pasta fotokatoda CuO pada kaca TCO

Pada metode *doctor blade*, langkah pertama yaitu diberi batasan area kaca FTO yang akan ditemplei pasta fotokatoda dengan menggunakan *scotch tape*. Luasan aktif fotokatoda adalah 0,5 x 0,5 cm. Selanjutnya, pasta fotokatoda CuO ditetaskan ke kaca FTO dan dilapiskan menggunakan spatula kaca dengan 1 arah gerakan. Setelah pasta dilapiskan dan mengering, kaca FTO tersebut dipanaskan pada suhu 150°C menggunakan *hot plate* selama 10 menit. Kaca FTO yang telah dipanaskan selanjutnya direndam dalam larutan pewarna ruthenium kompleks N-719 selama 12 jam.

Proses penyusunan komponen-komponen DSSC dengan struktur *sandwich*, dimulai dari kaca FTO yang telah dilapisi fotokatoda dan direndam pada larutan pewarna, larutan elektrolit, dan kaca FTO berlapis platina yang berfungsi sebagai elektroda lawan. Larutan elektrolit ditetaskan secukupnya menutupi luasan aktif fotokatoda dan tidak melebihi area tersebut. Terakhir, susunan DSSC tersebut direkatkan menggunakan penjepit.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakterisasi CuO sebagai Fotokatoda

Pada subbab 4.1 ini akan dibahas mengenai karakterisasi CuO dari hasil data penelitian yang diperoleh. Adapun karakterisasi CuO yang dilakukan antara lain: uji XRD, UV-Vis, dan SEM dari setiap sampel.

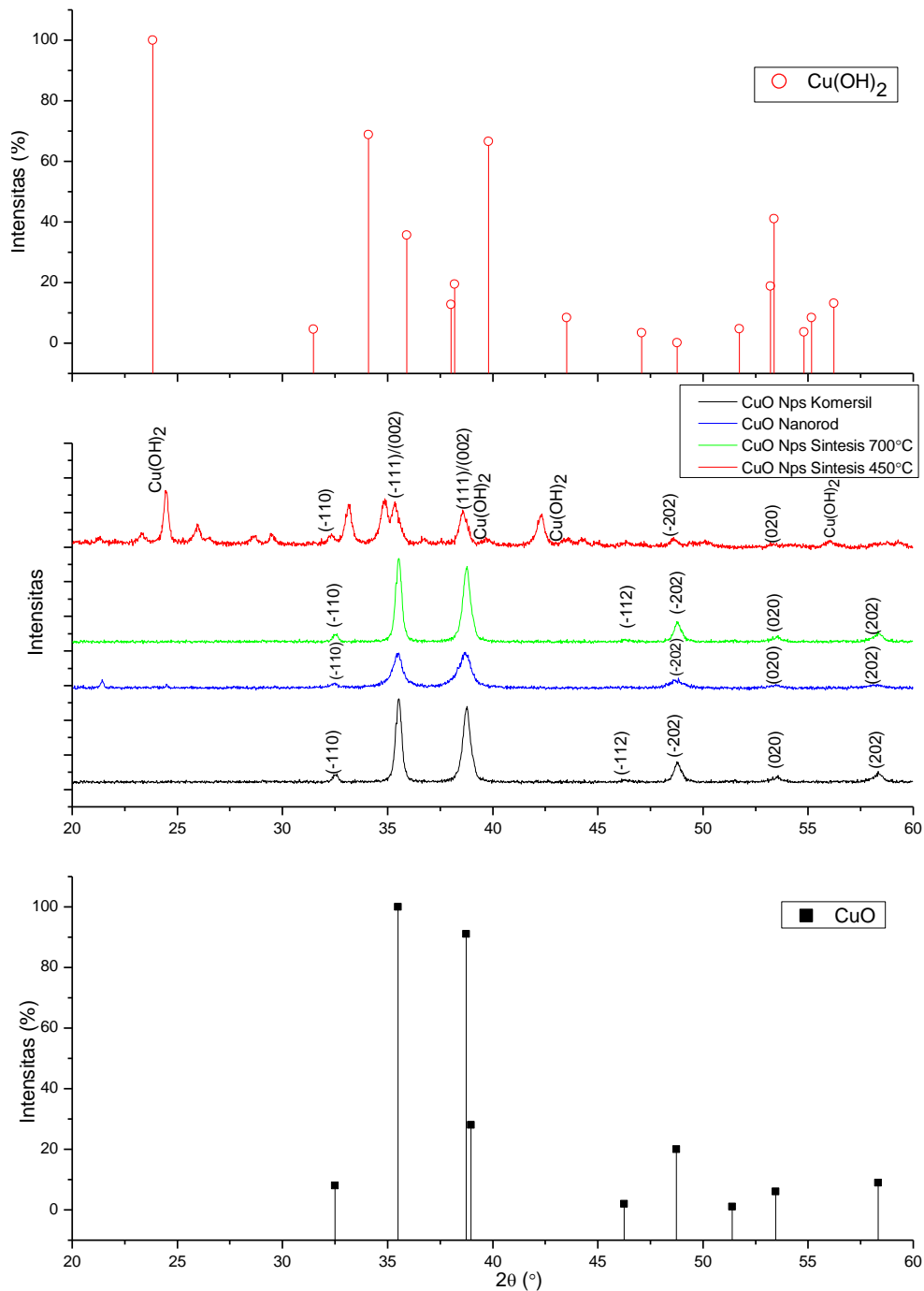
4.1.1 Karakterisasi XRD

Telah dikarakterisasi sampel CuO dengan 4 variabel yang telah ditentukan sebagai fotokatoda, yaitu CuO nanopartikel komersil, CuO nanopartikel hasil sintesis pada temperatur 700°C dan 450°C, dan CuO nanorod hasil sintesis. Pengujian XRD bertujuan untuk mengetahui ukuran partikel, parameter kisi, dan bentuk dimensi sel satuan (*unit cell*) kristal. Pengujian XRD dilakukan di Laboratorium Mineral dan Material Maju, Universitas Negeri Malang menggunakan merek PAN *analytical* tipe X'Pert Pro dan sebagian sampel di Laboratorium Divisi Karakterisasi Material, Teknik Material dan Metalurgi, FTIRS, ITS dengan menggunakan merek dan tipe yang sama. Berikut adalah perbandingan parameter kisi dari 4 sampel CuO dengan referensi JCPDS:

Tabel 4. 1 Parameter kisi dari 4 sampel CuO

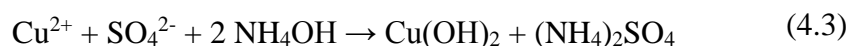
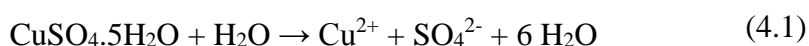
Sampel	hasil perhitungan sampel					referensi JCPDS 00-045-0937				
	a (Å)	b (Å)	c (Å)	β (°)	<i>volume unit cell</i>	a (Å)	b (Å)	c (Å)	β (°)	<i>volume unit cell</i>
CuO Nps komersil	4.84	3.42	4.94	99.82	80.842	4.685	3.425	5.130	99.549	81.2
CuO Nps Sintesis 700°C	4.614	3.400	5.210	99.503	80.619					
CuO Nps Sintesis 450°C	4.737	3.428	5.129	99.177	82.244					
CuO nanorod	4.697	3.428	5.125	99.478	81.380					

Berikut adalah perbandingan grafik XRD hasil pengujian dengan data standar referensi JCPDS (*Joint Committee on Powder Diffraction Standards*) No. 00-045-0937 untuk CuO dan JCPDS No. 01-080-0656 untuk $\text{Cu}(\text{OH})_2$:



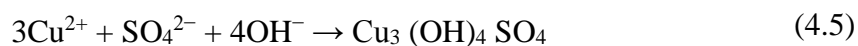
Gambar 4. 1 Perbandingan hasil pengujian XRD dari 4 sampel dengan JCPDS CuO dan $\text{Cu}(\text{OH})_2$

Hasil karakterisasi XRD serbuk CuO nanopartikel komersil, serbuk CuO nanopartikel sintesis pada temperatur 700°C dan 450°C dengan metode hidrotermal, dan serbuk CuO nanorod ditunjukkan pada gambar 4.1 dan 4.2. Grafik XRD tersebut menunjukkan bahwa CuO nanopartikel komersil, CuO hasil sintesis 700°C, dan CuO nanorod memiliki puncak indeks yang sesuai dengan standar referensi JCPDS No. 00-045-0937 dan memiliki puncak tertinggi pada bidang (-111)/(002) dan (111)/(002) dengan bentuk kristal monoklinik ($a \neq b \neq c$; $\alpha = \gamma \neq \beta$; lihat tabel 4.1). Namun pada CuO nanopartikel sintesis 450°C menunjukkan spektrum XRD dengan puncak *noise* yang cukup banyak. Ketika tembaga sulfat pentahidrat ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) direaksikan dengan amonium (NH_4OH), maka ekspektasi reaksi kimia yang akan terjadi untuk proses terbentuknya CuO adalah sebagai berikut:

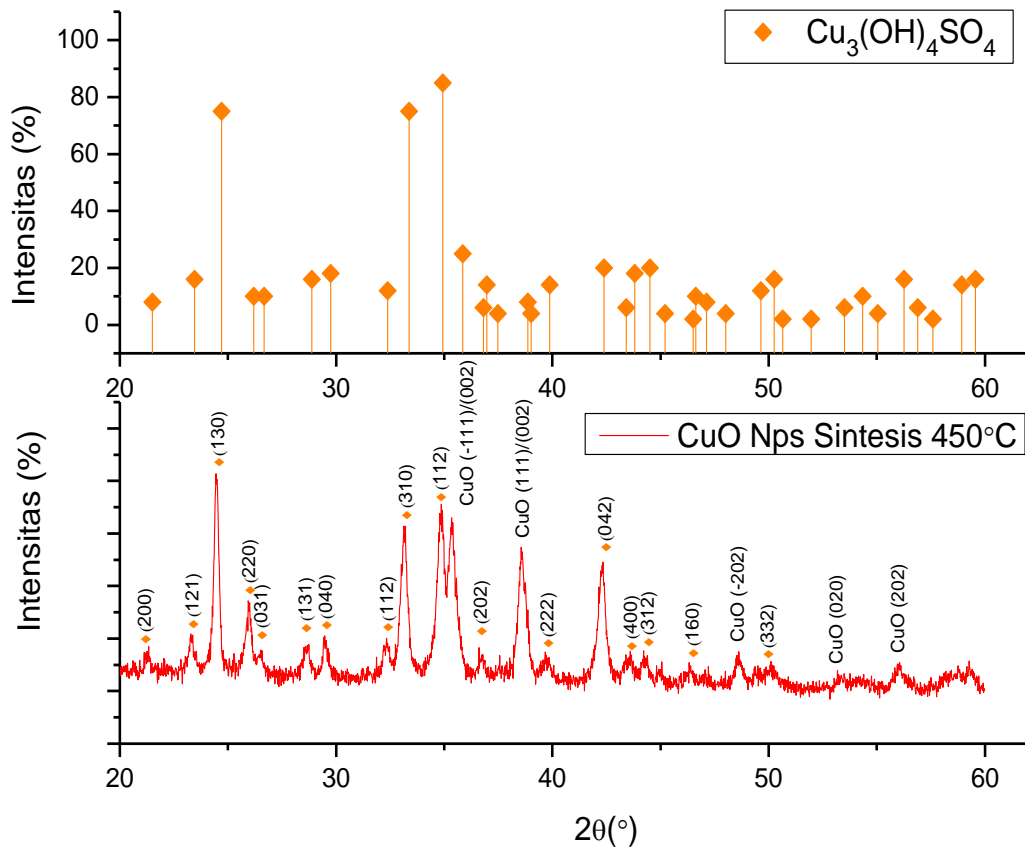


Kemudian data XRD CuO sintesis 450°C dicoba untuk dicocokkan dengan data standar referensi JCPDS No. 01-080-0656 untuk $\text{Cu}(\text{OH})_2$. Namun hasil XRD serbuk CuO sintesis 450°C tersebut menunjukkan hanya terdapat sebagian kecil kesesuaian puncak indeks dengan *noise* sampel CuO sintesis 450°C.

Lalu serbuk CuO sintesis 450°C dicocokkan kembali dengan data standar referensi JCPDS No. 00-007-0408, hasil tersebut menunjukkan sebagian besar terdapat kesesuaian antara puncak indeks data standar dengan *noise* sampel CuO sintesis 450°C, dimana kesesuaian sampel dengan JCPDS no. 00-007-0408 tersebut mengidentifikasi bahwa telah terbentuk senyawa kompleks, yaitu tembaga hidroksida sulfat ($\text{Cu}_3(\text{OH})_4\text{SO}_4$).



Adapun perbandingan faktor skala kecocokan antara data standar referensi JCPDS No. 00-045-0937 untuk CuO, No. 01-080-0656 untuk Cu(OH)₂, dan No. 00-007-0408 untuk Cu₃(OH)₄SO₄ dengan hasil XRD sampel CuO nanopartikel sintesis 450°C menggunakan bantuan *software* berupa *X'Pert Highscore Plus* adalah sebagai berikut, yaitu kecocokan terbesar pada Cu₃(OH)₄SO₄ sebesar 69%, pada CuO sebesar 48,7%, dan pada Cu(OH)₂ sebesar 35,3 %.

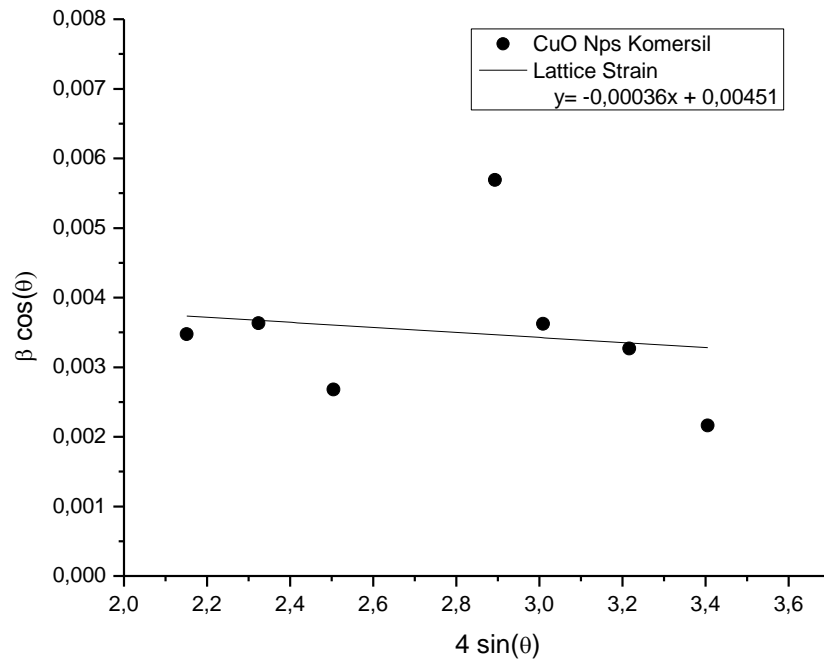


Gambar 4. 2 Perbandingan hasil pengujian XRD dari sampel CuO nanopartikel sintesis 450°C dengan JCPDS 00-007-0408

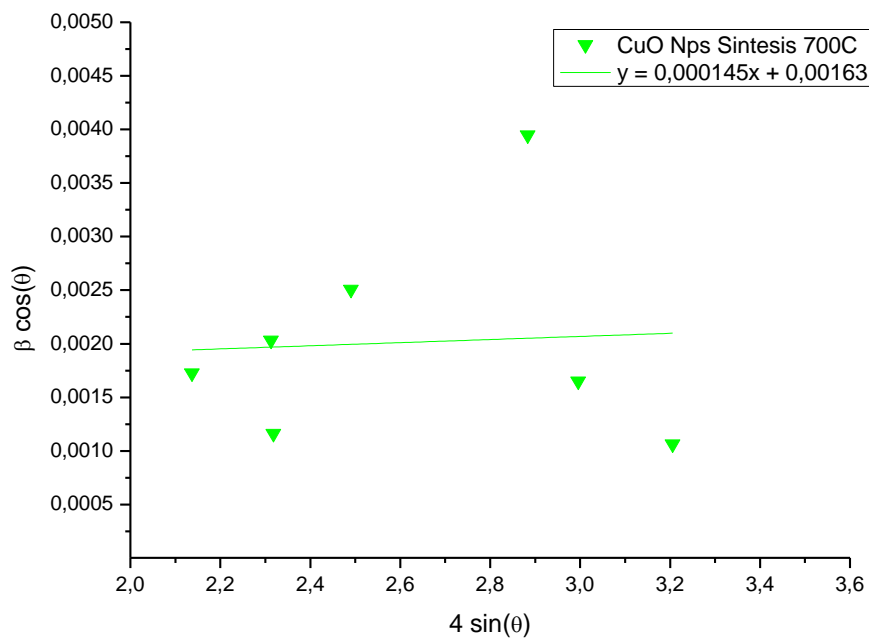
Karena yang terbentuk adalah senyawa kompleks, sehingga temperatur yang dibutuhkan untuk melepas ikatan senyawa kompleks menjadi CuO menjadi tinggi. Pada data XRD CuO nanopartikel sintesis dengan temperatur 700°C tampak tidak ada *noise*, dimana ini dapat diartikan bahwa senyawa kompleks (Cu₃(OH)₄SO₄) telah berubah fasa sepenuhnya menjadi CuO. Dengan menggunakan temperatur tinggi kisaran 700-800°C memungkinkan terbentuknya CuO yang lebih stabil

dengan sifat katalitik yang tinggi (Selvamani, Manjula, Anandan, Asiri, & Ashokkumar, 2015).

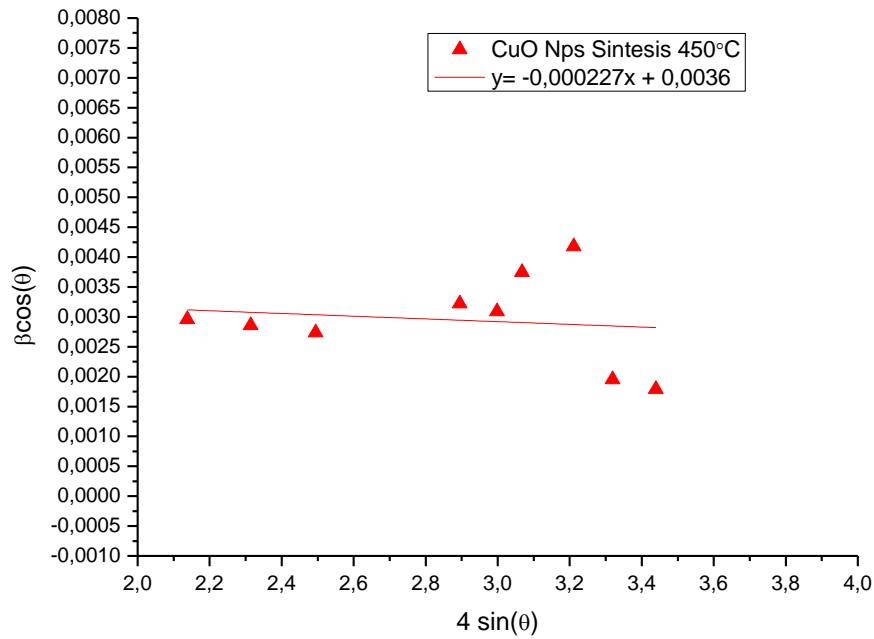
Adapun dari data XRD dapat dihitung nilai regangan kisi (*lattice strain*) dengan menggunakan *Williamson-Hall* (W-H) plot adalah sebagai berikut:



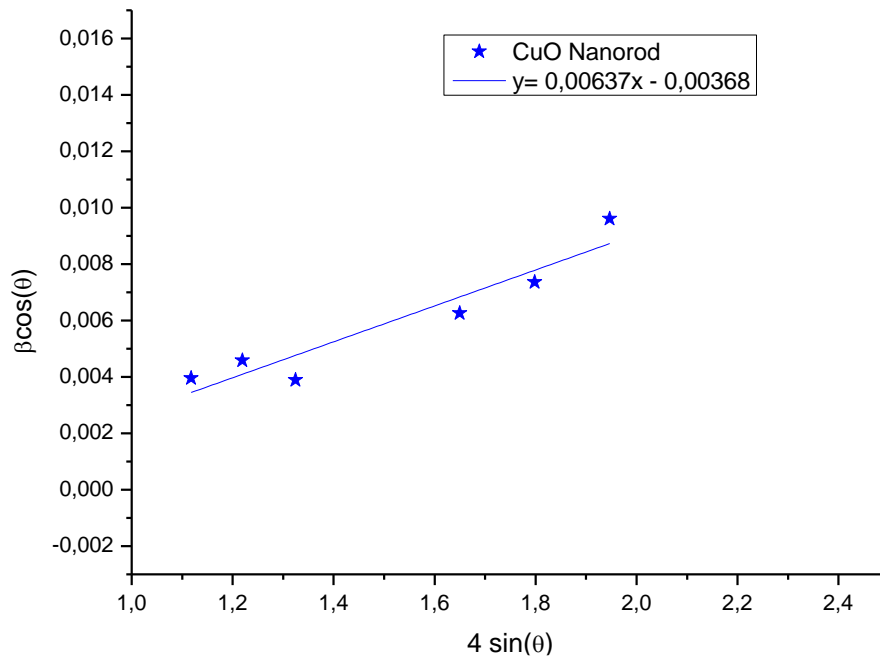
Gambar 4. 3 W-H plot dari sampel CuO nanopartikel komersil



Gambar 4. 4 W-H plot dari sampel CuO nanopartikel sintesis 700°C



Gambar 4. 5 W-H plot dari sampel CuO nanopartikel sintesis 450°C



Gambar 4. 6 W-H plot dari sampel CuO nanorod

Tabel 4.1 menunjukkan karakterisasi hasil XRD dari 4 sampel CuO. Ukuran kristal (D) dihitung menggunakan persamaan *Debye Scherrer* dan juga metode

Williamson-Hall (W-H) plot. Dari tabel tersebut juga diketahui besar regangan kisi, dan juga nilai dislokasi masing-masing sampel.

Tabel 4. 2 Karakterisasi hasil XRD dari 4 sampel CuO

Sampel	Persamaan <i>Debye Scherrer</i> (nm)			Williamson-Hall D (nm)	<i>Lattice strain</i> (ϵ)	Dislokasi rata-rata ($\delta \times 10^{-3}$) (nm^2)
	Min.	Max.	Rata-rata			
CuO Nps Komersil	18,08	38,07	31,52	30,402	-0,00036	1,24538
CuO Nps Sintesis 700°C	26,14	86,12	49,95	84,11	0,000145	0,69861
CuO Nps sintesis 450°C	21,89	41,45	34,87	38,087	-0,000227	0,96828
CuO Nanorod	15,075	37,214	27,21	37,259	0,00637	2,10583

Agar suatu kristal menjadi sempurna, kristal tersebut harus berkembang hingga tak terbatas di semua dimensi. Ekspansi tak terbatas tersebut akan menghasilkan pola garis pada puncak XRD (karena tidak ada pelebaran puncak). Oleh karena itu, idealnya tidak ada kristal yang sempurna karena ukurannya yang terbatas tersebut lah yang menyebabkan pola garis XRD melebar dan menghasilkan puncak daripada garis (Solliard & Flueli, 1985). Ukuran kristal dan regangan kisi merupakan karakteristik utama yang diekstraksi dari lebar puncak (FWHM), intensitas, dan pergeseran posisi puncak sudut 2θ . Ukuran kristal merupakan ukuran domain yang terdifraksi secara koheren. Pembentukan kombinasi polikristalin membuat ukuran kristal (*crystallite size*) berbeda dengan definisi ukuran partikel (*particle size*) (Ramakanth, 2007).

Regangan (*strain*) merupakan istilah yang sering ditemui dalam dunia teknik sebagai suatu deformasi suatu objek dibagi dengan panjang idealnya ($\Delta l/l$). Namun regangan pada kisi kristal (*lattice strain*) merupakan distribusi parameter kisi rata-

rata yang disebabkan oleh cacat kristal, dan bukan disebabkan oleh gaya eksternal (Setianingsih & Sutarno, 2018). Ketidaksempurnaan (cacat) kristal tersebut contohnya seperti dislokasi kisi, persimpangan tiga batas butir, tegangan kontak, dan tegangan koherensi (Zhang J.-M. , Zhang, Xu, & Ji, 2006). Cacat kristal ini besar kemungkinan terjadi selama proses pertumbuhan kristal, proses pemurnian atau proses perlakuan (*treatment*), dan bahkan sering kali cacat kristal sengaja diciptakan untuk menghasilkan sifat-sifat tertentu (Purwamargapratala, 2010).

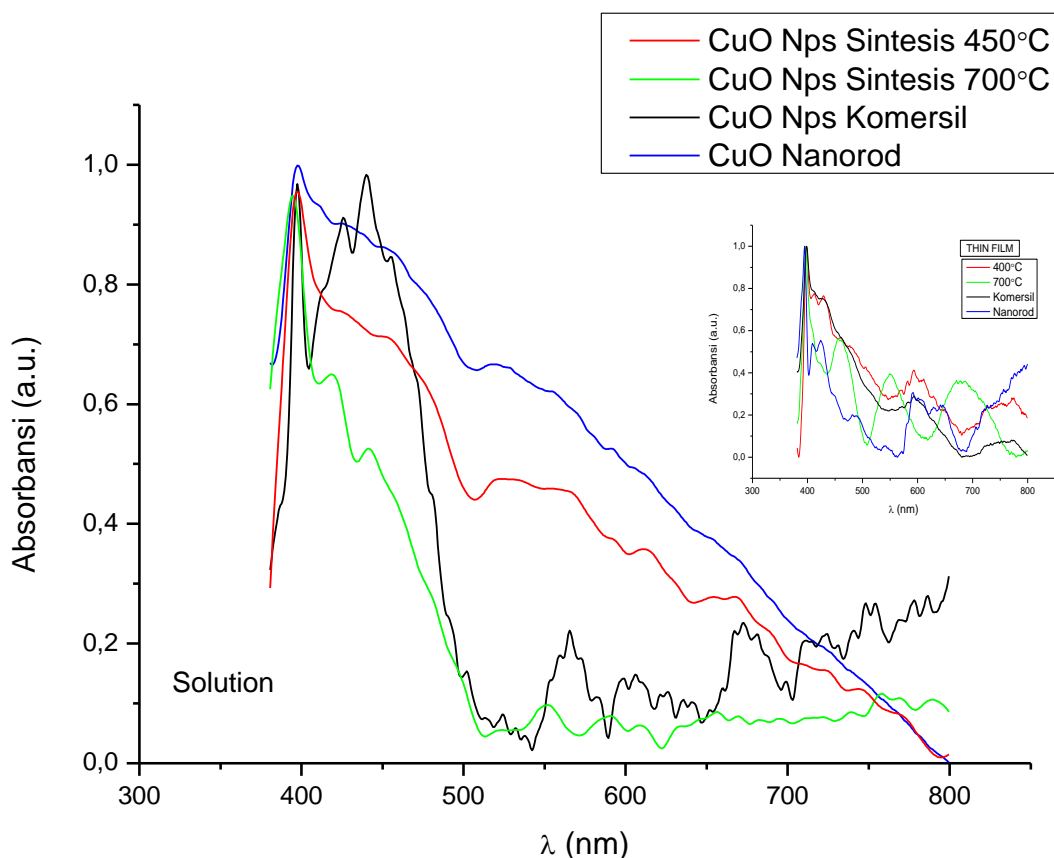
Dari grafik W-H plot (gambar 4.3, 4.4, 4.5, dan 4.6) diketahui nilai regangan kisi adalah suatu nilai yang dihitung berdasarkan nilai gradien grafik *linear fitting* data tersebut dan melalui nilai intersepnya dapat dihitung ukuran kristalit sampel. Dari tabel 4.1 jika dibandingkan hasil perhitungan antara 2 metode yang berbeda tersebut, didapat ukuran kristal (D) dengan nilai yang tidak terlalu berbeda jauh, hal ini disebabkan karena perbedaannya dalam rata-rata distribusi ukuran partikel. Besar *lattice strain* pada sampel CuO nanopartikel komersil sebesar -0,00036, CuO nanopartikel sintesis 700°C sebesar 0,000145, CuO nanopartikel sintesis 450°C sebesar -0,000227, dan CuO nanorod sebesar 0,00637. Nilai *lattice strain* yang bernilai (+) menunjukkan bahwa pertumbuhan sampel CuO mengembang dan bernilai (-) menunjukkan pertumbuhan sampel CuO menyusut (Babikier & Wang, 2014). Semakin besar nilai regangan kisi, maka regangan pada CuO akan mengembang yang menyebabkan rongga antaratom pada CuO semakin kecil. Sedangkan semakin kecil nilai regangan kisi, maka regangan pada CuO akan menyusut dan menyebabkan rongga antaratom pada CuO semakin besar.

Salah satu cacat kristal yang paling penting yang mungkin terjadi karena tekanan internal yaitu dislokasi (δ). Dislokasi adalah cacat linear atau satu dimensi di mana beberapa atom tidak selaras. Dislokasi yang dihasilkan bereaksi dengan perpindahan bergerak ketika tekanan (*stress*) diterapkan pada domain. Dislokasi memainkan peran penting dalam menentukan kekuatan dan keuletan bahan (Alaa & Hassanien, 2015). Kepadatan dislokasi (δ) didapat dengan menggunakan analisa profil garis XRD dan menggunakan rumus Williamson-Smallman yang mengacu pada persamaan (3.3), di mana D merupakan nilai ukuran kristal (Williamson & Smallman, 1956). Dari hasil karakterisasi XRD 4 sampel CuO, nilai kepadatan

dislokasi (δ) terbesar dihasilkan oleh CuO nanorod sebesar $2,10583 \times 10^{-3} \text{ nm}^2$, dan nilai kepadatan dislokasi (δ) terkecil dihasilkan oleh CuO nanopartikel sintesis 700°C sebesar $0,69861 \cdot 10^{-3} \text{ nm}^2$.

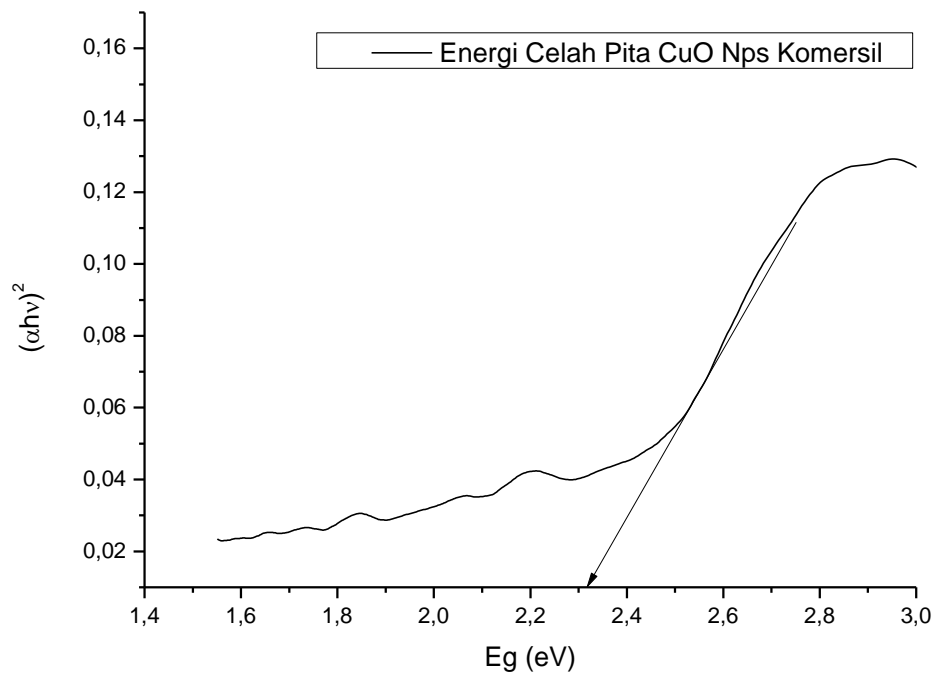
4.1.2 Karakterisasi UV-VIS dari CuO

Pengujian UV-Vis bertujuan untuk mengetahui besar redaman radiasi elektromagnetik dari penyerapan (absorbansi) sampel. Data yang diperoleh berupa nilai absorbansi, A , terhadap panjang gelombang yang diserap. Gambar 4.7 menunjukkan hasil karakterisasi UV-Vis dari keempat sampel CuO. CuO komersil memiliki 2 puncak panjang gelombang di 397 nm dan 452 nm, sedangkan pada ketiga variabel CuO memiliki puncak panjang gelombang di kisaran 397 nm. Dari grafik UV-Vis di bawah, dapat dilihat bahwa terdapat cacat kristal terbesar pada CuO nanorod, hal ini bersesuaian dengan hasil analisa uji XRD.

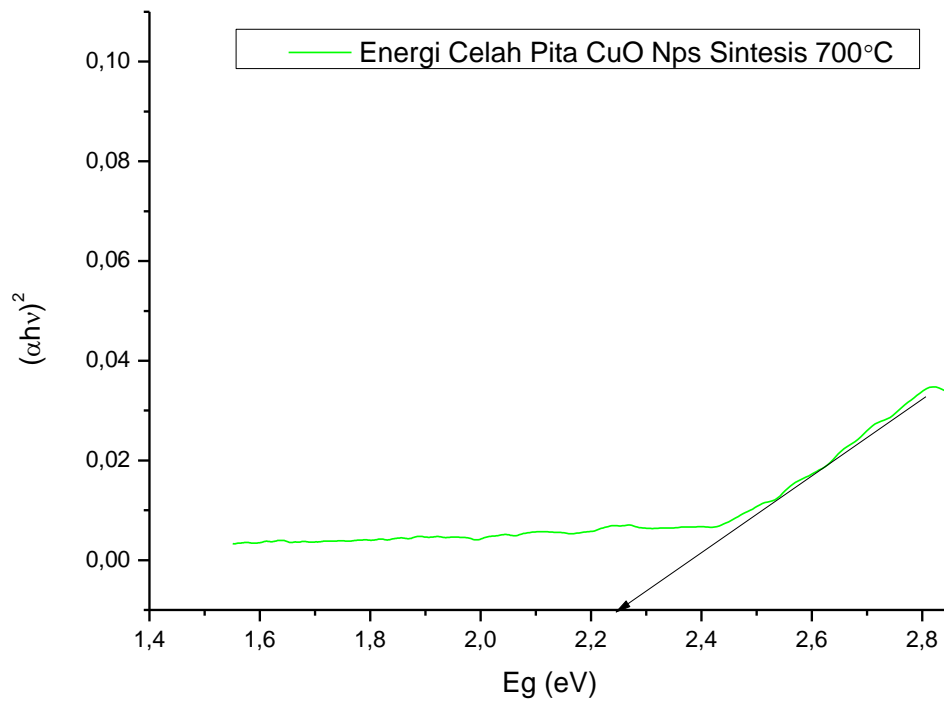


Gambar 4. 7 Hasil UV-Vis dari CuO nanopartikel komersil, CuO nanopartikel sintesis 700°C dan 450°C , dan CuO nanorod

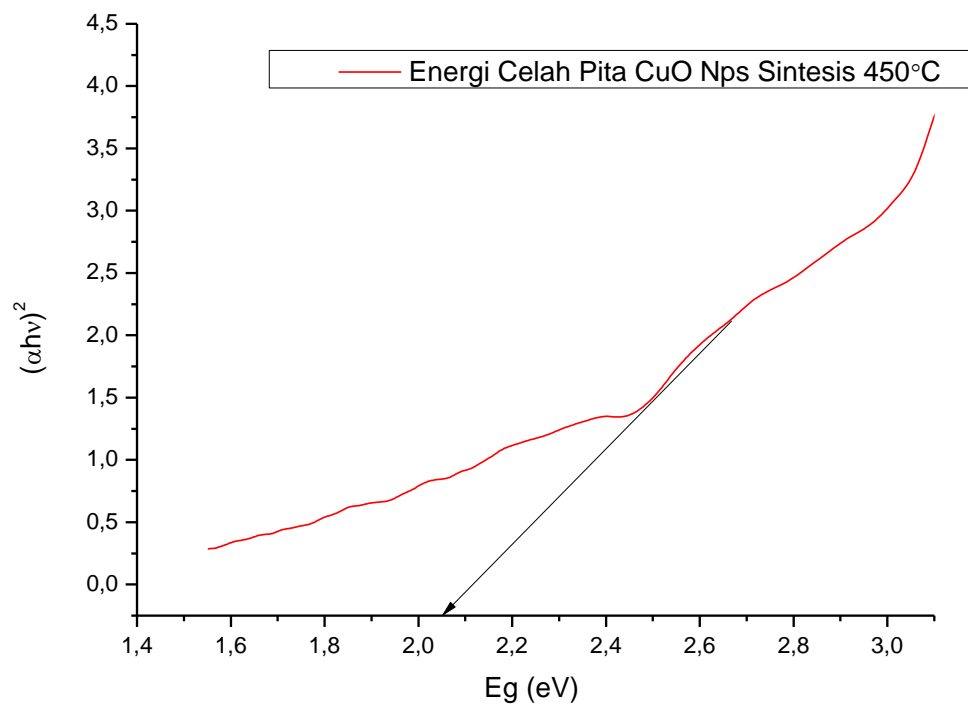
Pada pengujian UV-Vis menggunakan teknik deposisi *doctor blade* pada lapisan tipis (*thin film*) juga menghasilkan puncak panjang gelombang yang sama dengan pengujian UV-Vis menggunakan larutan etanol. Kelebihan uji UV-Vis dengan media *thin film* yaitu dapat dihitung ketebalan dari lapisan deposisi. Dari plot karakterisasi UV-Vis tersebut, dapat diketahui energi celah pita (*band gap*) melalui *Tauc Plot*. Berikut adalah energi celah pita (*band gap*) yang dihasilkan dari keempat sampel.



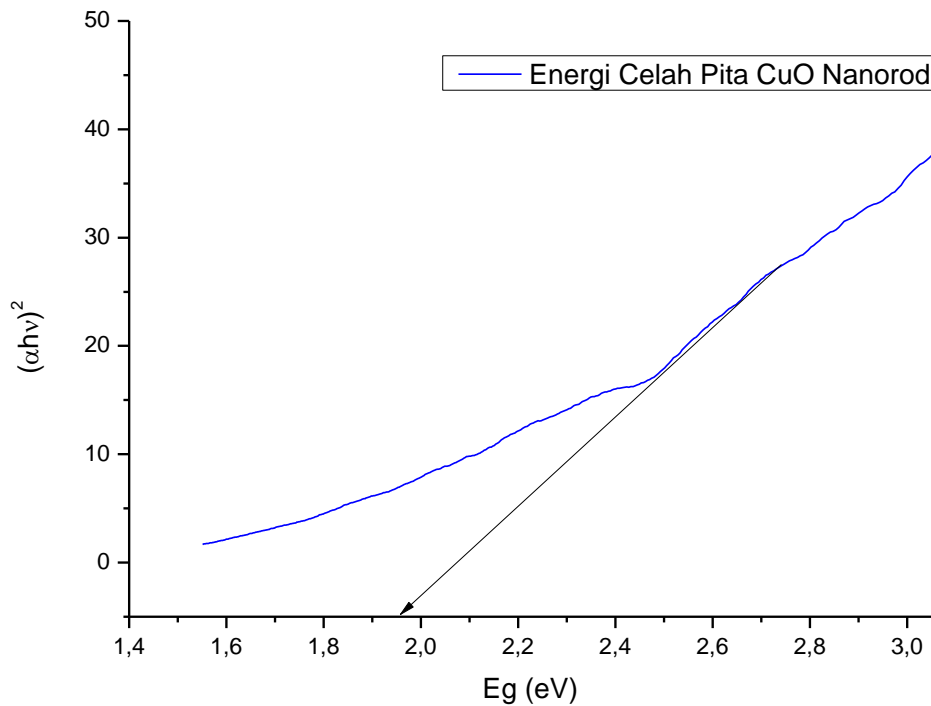
Gambar 4. 8 *Tauc plot* dari CuO nanopartikel komersil



Gambar 4. 9 Tauc plot dari CuO nanopartikel hasil sintesis 700°C



Gambar 4. 10 Tauc plot dari CuO nanopartikel hasil sintesis 450°C

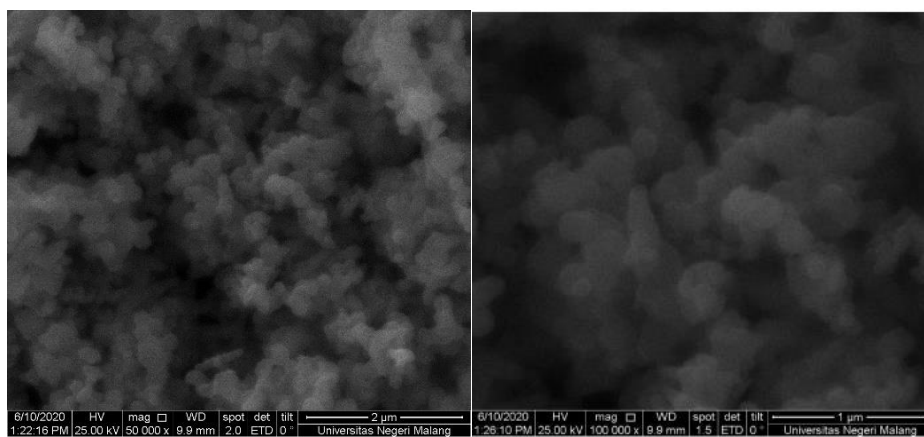


Gambar 4. 11 *Tauc plot* dari CuO nanorod

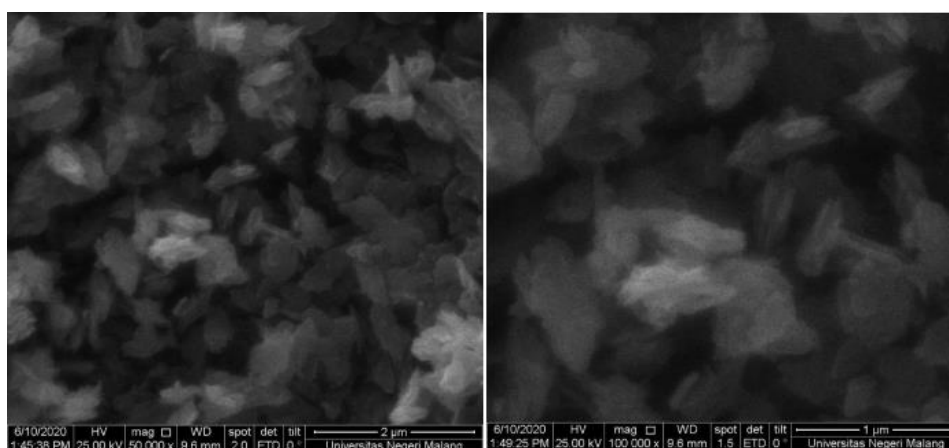
CuO nanorod, CuO nanopartikel hasil sintesis 450°C, CuO nanopartikel sintesis 700°C, dan CuO nanopartikel komersil dari hasil *Tauc plot* menghasilkan energi celah pita masing-masing sebesar 1,97 eV, 2,08 eV, 2,25 eV, dan 2,31 eV. Pada CuO nanorod hampir mendekati teori bahwa CuO memiliki energi celah pita sebesar 1,2 – 2,1 eV (Zhang, Zhang, Xu, Yang, & Huang, 2014).

4.1.3 Karakterisasi SEM dari CuO

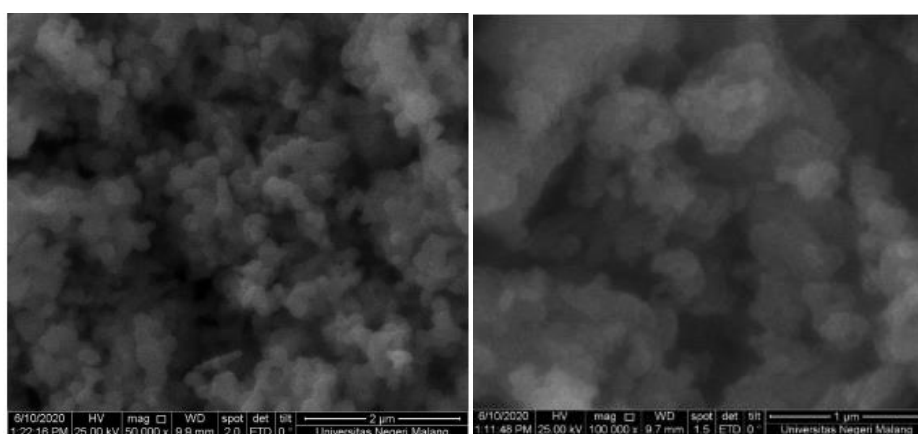
Pengujian SEM bertujuan untuk mengetahui morfologi dari sampel CuO yang telah disintesis, baik bentuk nanopartikel maupun nanorod, dan CuO komersil. Masing-masing sampel menggunakan perbesaran 50.000x, dan 100.000x dengan energi *electron beam* sebesar 20.000 eV dan 25.000 eV. Pengujian sampel CuO nanopartikel sintesis 450°C, CuO nanopartikel komersil, dan CuO nanorod dilakukan di Laboratorium Mineral dan Material Maju, Universitas Negeri Malang menggunakan merek FEI tipe Inspect-S50, sedangkan pengujian sampel CuO nanopartikel sintesis 700°C dilakukan di Laboratorium Divisi Karakterisasi Material, Teknik Material dan Metalurgi, FTIRS, ITS juga menggunakan merek dan tipe yang sama.



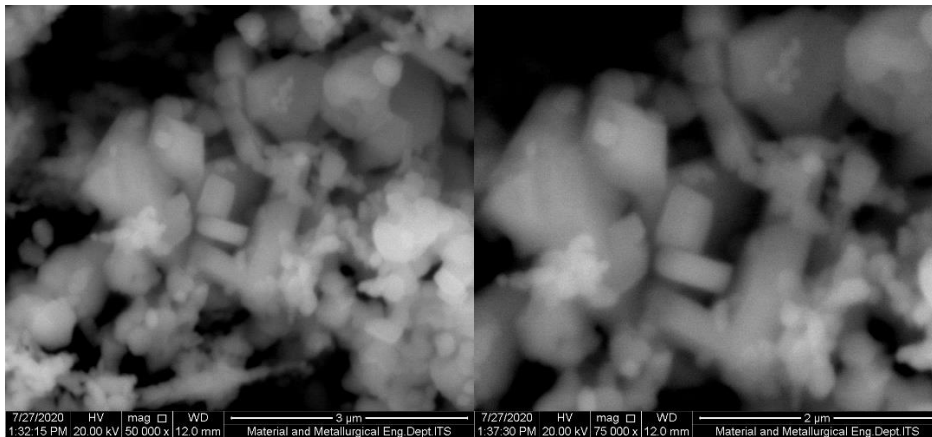
Gambar 4. 12 Hasil SEM CuO Nanopartikel komersil



Gambar 4. 13 Hasil SEM CuO Nanorod



Gambar 4. 14 Hasil SEM CuO nanopartikel sintesis 450°C



Gambar 4. 15 Hasil SEM CuO nanopartikel sintesis 700°C

Dari hasil SEM keempat sampel, terlihat bahwa CuO komersial dan CuO sintesis 700°C terbentuk nanopartikel. Pada CuO nanorod terlihat hasil morfologi menyerupai batang namun tidak sempurna karena berukuran besar dan pendek. Sedangkan pada CuO nanopartikel sintesis 450°C terlihat bentuk nanopartikel namun menggumpal (terbentuk agregat). Adapun ukuran agregat CuO tersebut tentunya memiliki dampak terhadap performansi DSSC. Agregat yang menyebabkan ukuran partikel menjadi lebih besar (karena menggumpal) akan berkontribusi terhadap terjadinya lebih banyak muatan pembawa yang terperangkap (*trapping*) dan terjadi hamburan (*scattering*) pada muatan pembawa bebas. Dengan adanya hamburan (*scattering*) pada batas butir (*grain boundaries*) menyebabkan pergerakan muatan pembawa cenderung menurun dengan signifikan. Selain itu, faktor lainnya seperti regangan kisi dan distorsi kristal juga turut mempengaruhi pergerakan muatan yang berdampak pada peningkatan resistivitas dan penurunan konduktivitas. Efek hamburan (*scattering*) yang rendah dan nilai resistensi yang lebih kecil akan menyebabkan penyerapan yang lebih baik dari *incident photon* dan meningkatkan efek foto (*photoeffect*). Sehingga dengan adanya agregat pada fotokatoda DSSC akan menghasilkan kecenderungan lebih besar untuk elektron dan *hole* bergabung kembali (terjadi rekombinasi) karena perjalanan pembawa muatan menuju rangkaian eksternal akan lebih sulit, dan menghasilkan performansi DSSC menurun (Zhang, Zhang, Xu, Yang, & Huang, 2014).

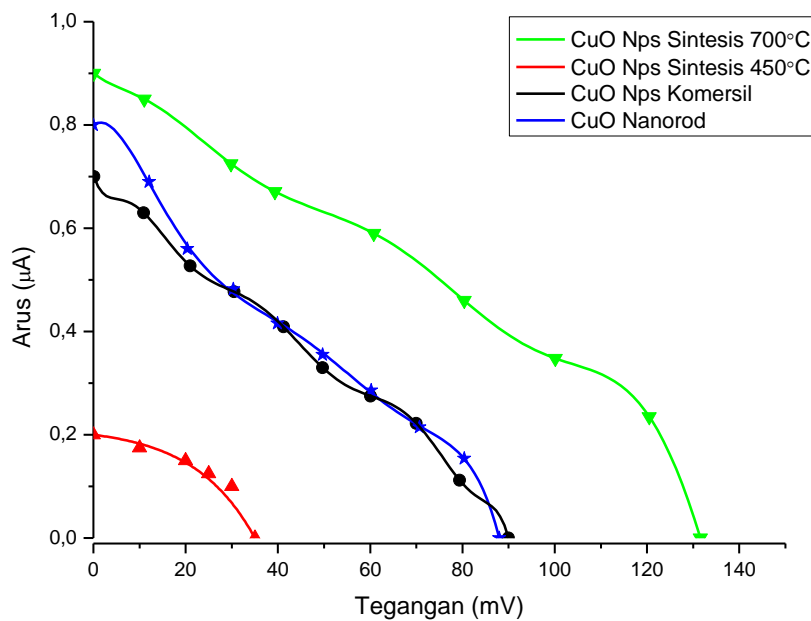
Dengan menggunakan *software* ImageJ dapat dianalisa distribusi ukuran diameter partikel CuO adalah sebagai berikut:

Tabel 4. 3 Pengukuran diameter partikel dari 4 sampel CuO

No.	Sampel	Distribusi ukuran partikel (nm)
1.	CuO Nps Komersil	166,6097
2.	CuO Nps Sintesis 700°C	261,506
3.	CuO Nps sintesis 450°C	336,569
4.	CuO Nanorod	396,725

4.2 Performansi DSSC Tipe P

Untuk mengetahui performansi DSSC tipe P dengan CuO sebagai fotokatoda, dilakukan pengujian I-V dilakukan secara manual dengan menggunakan rangkaian hambatan, dan dilakukan pengukuran di Lantai 3 Gedung Teknik Fisika, ITS dengan rentang waktu pelaksanaan dari pukul 12.00-13.30 WIB. Adapun hasil pengujian I-V dari keempat sampel yang telah dirakit menjadi DSSC adalah sebagai berikut:



Gambar 4. 16 Hasil Pengujian I-V dari DSSC dari keseluruhan sampel

Salah satu indikator untuk mengetahui performansi dari sel surya adalah nilai efisiensi. Berikut adalah hasil perhitungan nilai efisiensi yang dihasilkan dari uji I-V DSSC tipe P dengan CuO sebagai fotokatoda:

Tabel 4. 4 Tabel perhitungan hasil performansi DSSC tipe P

Sampel	Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	P _{MPP} (mW)	FF	η (%)
CuO Komersil	0,09	0,0028	0,00006592	0,261587	0,00008605
CuO Nps Sintesis 700°C	0,1316	0,0036	0,00012864	0,27153	0,0001668
CuO Nps Sintesis 450°C	0,035	0,0008	0,0000125	0,446429	0,0000159
CuO Nanorod	0,088	0,0032	0,00007057	0,2506	0,0000938

Hasil pengujian I-V pada DSSC dengan fotokatoda masing-masing sampel menunjukkan hasil yang berbeda. Di antaranya hasil uji I-V yang menghasilkan efisiensi (η) tertinggi yaitu pada CuO nanopartikel sintesis 700°C sebesar 0,0001668%, pada CuO nanorod sebesar 0,0000938 %, CuO nanopartikel komersil sebesar 0,000086058%, dan efisiensi (η) terendah yaitu 0,0000159 % dihasilkan oleh CuO nanopartikel sintesis 450°C. J_{sc} dapat diartikan sebagai jumlah awal pembawa fotogenerasi dan sebagai penanda efektivitas injeksi elektron dari molekul pewarna (N-719) ke oksida logam, sedangkan V_{oc} mengindikasikan laju rekombinasi elektron-*hole* pada DSSC. Semakin besar nilai V_{oc} yang dihasilkan, maka akan semakin rendah kemungkinan terjadinya rekombinasi elektron-*hole* (Lee, Sue, & Cheng, 2011). Rekombinasi elektron-*hole* merupakan hal yang harus dihindari karena akan memperkecil nilai efisiensi pada DSSC. Pada uji I-V DSSC dengan fotokatoda sampel CuO nanopartikel sintesis 700°C menghasilkan nilai V_{oc} dan J_{sc} paling tinggi dibanding sampel lainnya sehingga menghasilkan nilai efisiensi tertinggi. Namun jika dibandingkan nilai V_{oc} antara sampel CuO nanopartikel komersil (0,09 V) dan CuO nanorod (0,088 V), maka sesuai teori di atas seharusnya DSSC dari sampel CuO nanopartikel komersil lah yang mempunyai nilai efisiensi lebih tinggi dibanding CuO nanorod. Namun kenyataan yang terjadi adalah, berdasarkan persamaan (3.15), didapat nilai efisiensi CuO nanorod (0,0000938%) lebih tinggi dibandingkan dengan CuO nanopartikel komersil (0,00008605%).

Dengan morfologi kedua sampel tersebut yang berbeda (nanopartikel dan nanorod), maka akan terjadi perbedaan sifat listrik ataupun proses transfer *hole* di antara kedua morfologi tersebut. Jika pada morfologi nanorod, proses transfer *hole* pada fotokatoda CuO yang dihasilkan dari foton hanya membutuhkan satu lompatan saja untuk mencapai substrat kaca FTO, sehingga memungkinkan tersedianya jalur transportasi *hole* yang cepat dan efisien dari molekul pewarna menuju ke substrat kaca FTO dan juga akan mengurangi kemungkinan terjadinya rekombinasi elektron-*hole* yang lebih besar. Sedangkan pada morfologi nanopartikel proses transfer *hole* yang dihasilkan dari CuO nanopartikel berlapis pewarna akan melewati beberapa jumlah lompatan terlebih dahulu sebelum akhirnya mencapai substrat kaca FTO, sehingga memungkinkan terjadinya

rekombinasi elektron-*hole* lebih besar dibanding morfologi nanorod. Oleh karena itu, nilai efisiensi CuO nanorod (0,0000938%) lebih besar dibanding CuO komersil (0,00008605%) (Lee, Sue, & Cheng, 2011) (Ai, Sun, Zhang, & Peng, 2011). Untuk memudahkan ilustrasi proses transfer *hole* di antara kedua morfologi ini dapat dilihat pada gambar 2.3.

Namun antara DSSC tipe P menggunakan fotokatoda sampel CuO nanorod dengan CuO nanopartikel sintesis 700°C jika dibandingkan, maka nilai efisiensi CuO nanopartikel sintesis 700°C (0,0001668%) jauh lebih tinggi dari nanorod (0,0000938%). Jika ditelusuri dari hasil uji XRD, ternyata sampel CuO nanorod memiliki parameter cacat kristal (dalam hal ini ditinjau dari nilai dislokasi) yang paling tinggi dibanding dengan CuO nanopartikel. Efek kepadatan dislokasi (δ) terhadap kinerja sel surya telah diselidiki secara analitik oleh (Sabid & Mehedi, 2015). Ditemukan bahwa kepadatan dislokasi yang lebih tinggi memiliki dampak negatif pada kinerja sel surya. Terlihat akibat dari kepadatan dislokasi (δ) yang lebih tinggi, kecepatan rekombinasi permukaan meningkat yang mengakibatkan penurunan efisiensi (η) sel surya (Sabid & Mehedi, 2015).

BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang diperoleh dari Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

- a) CuO dengan variasi nanopartikel dan nanorod dapat disintesis menggunakan metode hidrotermal dengan morfologi nanopartikel menggunakan prekursor $\text{Cu}(\text{SO})_4$ + amonium dengan temperatur 700°C dan morfologi nanorod menggunakan prekursor $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COOH})_2$ + CTAB
- b) Karakteristik CuO yang diketahui yaitu ukuran kristal terkecil dihasilkan oleh sampel CuO nanopartikel komersil, dan celah pita tersempit dihasilkan oleh sampel CuO nanorod sebesar 1,97 eV, dislokasi terbesar terdapat pada sampel CuO nanorod
- c) Efisiensi tertinggi dari DSSC berbasis semikonduktor tipe P dalam penelitian ini dihasilkan dari fotokatoda sampel CuO nanopartikel sintesis 700°C sebesar 0.00016680% dengan nilai V_{oc} sebesar 0,1316 V, J_{sc} sebesar 0,0036 mA/cm^2 , dan FF sebesar 0,27153.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Ai, G., Sun, W.-T., Zhang, Y.-L., & Peng, L.-M. (2011). Nanoparticle and nanorod TiO₂ composite photoelectrodes with improved performance. *The Royal Society of Chemistry*, 47, 6608-6610.
- Akhtar, K., Khan, S., Khan, S., & Asiri, A. (2018). Scanning Electron Microscopy: Principle and Applications in Nanomaterials Characterization. In S. S., *Handbook of Materials Characterization*. Cham: Springer.
- Ako, T. R., Ekanayake, P., & Lim, C. (2016). An analysis of DSSC performance based on nanosphere, nanorod, and nanoparticle anode morphologies. *Journal of applied physics*, 120(16), 164503.
- Alaa, A. A., & Hassanien, A. (2015). Microstructure and crystal imperfections of nanosized CdS_xSe_{1-x} thermally evaporated thin films. *Superlat. Microstructure*, 85, 67-81.
- Anandan, S., Wen, X., & Yang, S. (2005). Room temperature growth of CuO nanorod arrays on copper and their application as a cathode in dye-sensitized solar cells. *Materials Chemistry and Physics*, 93(1), 35-40.
- Babikier, M., & Wang, D. (2014). Cu-doped ZnO nanorod arrays: the effect of copper precursor and concentration. *Nanoscale Research Letters*, 9, 199.
- Benazzi, E., Mallows, J., Summers, G., Black, F., & Gibson, E. (2019). Developing Photocathode Materials for P-Type Dye-Sensitized Solar Cells. *Journal of Materials Chemistry C*, 7, 10409-10445.
- Callister, W. D. (2009). *Material Science and Engineering and Introduction Eight Edition*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Chang, Y., & Zeng, H. (2004). Controlled Synthesis and Self-Assembly of Single-Crystalline CuO Nanorods and Nanoribbons. *Crystal Growth & Design*, 4(2), 397-402.
- Cubas, J., Pindado, S., & de Manuel, C. (2014). Explicit Expressions for Solar Cell Panel Equivalent Circuit Parameters Based on Analytical Formulation and

- the Lambert W-Function. *1st International e-Conference on Energies*. Madrid.
- Downs, R., & Hall-Wallace, M. (2003). The American Mineralogist Crystal Structure Database. *American Mineralogist*, 88, 247-250.
- Ethiraj, A., & Kang, D. (2012). Synthesis and Characterization of CuO Nanowires by a Simple Wet Chemical Method. *Nanoscale Research Letters*, 7, 70-75.
- Fard, N. E., Fazaeli, R., Yousefi, M., & Abdolmohammadi, S. (2019). Morphology-Controlled Synthesis of CuO, CuO Rod/MWW Composite for Advanced Oxidation of Indole and Benzothiophene. *Chemistry Select*, 4, 9529-9539.
- Gratzel, M. (2003). Dye-Sensitized Solar Cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology*, 4, 145-153.
- Green, M. A. (1982). *Solar Cells Operating Principles Technology and System Application*. Evylewood Cliffs N.Y: Prentice Hall, Inc.
- Guha, S., & Nakamoto, K. (2005). Electronic structures and spectral properties of endohedral fullerenes. *Coord.Chem*, 249(9-10), 1111-1132.
- Hassan, M., Younas, S., Sher, F., Husain, S., Riaz, S., & Naseem, S. (2017). Room temperature ferromagnetism in single-phase Zn_{1-x}Mn_xS diluted magnetic semiconductors fabricated by co-precipitation technique. *Applied Physics A*, 123, 352.
- Hollas, J. M. (2004). *Modern Spectroscopy Fourth Edition*. New York: John Wiley & Sons, Ltd.
- Jiang, T., Bujoli-Doeuff, M., Farre, Y., & Pellegrin, Y. (2016). CuO nanomaterials for p-type dye-sensitized solar cells. *Royal Society of Chemistry Adv.*, 6, 112765-112770.
- Jisen, W., Jinkai, Y., Jinquan, S., & Ying, B. (2004). Synthesis of Copper Oxide Nanomaterials and The Growth Mechanism of Copper Oxide Nanorods. *Materials and Design*, 25, 625-629.
- Kannaki, K., Ramesh, P., & Geetha, D. (2012). Hydrothermal Synthesis of CuO Nanostructure and Their Characterizations. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 3(9), 1-4.

- Laqua, K. e. (1988). Nomenclature, symbols, units, and their usage in spectrochemical analysis-VII.Molecular absorption spectroscopy, ultraviolet and visible (UV/VIS). *Pure Appl. Chem*, 60(9), 1449-1460.
- Lee, T.-H., Sue, H.-J., & Cheng, X. (2011). Solid-state dye-sensitized solar cells based on ZnO nanoparticle and nanorod array hybrid photoanodes. *Nanoscale Research Letters*, 6, 517.
- Ling, J. S., Sanny, J., & Moebs, W. (2016). *University Physics* (Vol. 3). Houston, Texas: Openstax.
- Misture, S., & Snyder, R. (2001). X-ray Diffraction. In S. Mahajan, K. J. Buschow, R. W. Cahn, M. C. Flemings, B. Ilshner, E. J. Kramer, & P. Veyssi ere (Eds.), *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* (1st ed., pp. 9799-9808). Oxford: Pergamon Press.
- Mote, V., Purushotham, Y., & Dole, B. (2012). Williamson-Hall analysis in estimation of lattice strain in nanometer-sized ZnO particles. *Journal of Theoretical and Applied Physics*, 6, 6.
- Prabhin, V. (2017). Fabrication of Dye Sensitized Solar Cell using Chemically Tuned CuO Nanoparticles Prepared by Sol-Gel Method. *Archieves of Materials Science and Engineering*, 83(1), 5-9.
- Purwamargapratala, Y. (2010). Regangan Kisi dan Ukuran Butir Elektrolit Padat Komposit Alkali-Alumina. *Urania BATAN*, 16(2), 47-104.
- Raksa, P., Nilphai, S., Gardchareon, A., & Choopun, S. (2009). Copper oxide thin film and nanowire as a barrier in ZnO dye-sensitized solar cells. *Thin Solid Films*, 517, 4741-4744.
- Ramakanth, K. (2007). *Basics of X-ray Diffraction and its application*. New Delhi: I.K. International Publishing House Pvt.Ltd.
- Richhariya, G., Kumar, A., & Tekasakul, P. (2017). Natural Dyes for Dye Sensitized Solar Cells: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 705-718.
- Sabid, I., & Mehedi, I. M. (2015). Effect of dislocation density on the performance of InGaN-Based MJ Solar Cell: Analytical Approach. *2nd Proceedings of International Conference on Electrical Information and Communication Technology (EICT)*. Khulna: IEEE.

- Selvamani, T., Manjula, C., Anandan, S., Asiri, A., & Ashokkumar, M. (2015). Preparation of CuO Mesocrystals via Antlerite Intermediate for Photocatalytic Applications. *Crystal Research & Technology*, *50*(2), 143-149.
- Setianingsih, T., & Sutarno. (2018). *Prinsip Dasar dan Aplikasi Metode Difraksi Sinar-X untuk Karakterisasi Material*. Malang: UB Press.
- Singh, G., Panday, S., Rawat, M., Kukkar, D., & Basu, S. (2017). Facile Synthesis of CuO Semiconductor Nanorods for Time Dependent Study of Dye Degradation and Bioremediation Applications. *Journal of Nano Research*, *46*, 154-164.
- Solliard, C., & Flueli, M. (1985). Surfaces stress and size effect on the lattice parameter in small particles of gold and platinum. *Surface Science Letter*, *156*(1), 487-494.
- Tiginyanu, I., Lupan, O., Ursaki, V., Chow, L., & Enachi, M. (2011). Nanostructures of Metal Oxides. In *Materials Science and Materials Engineering* (pp. 396-479). Amsterdam: Elsevier.
- Tissue, B. (2012). *Ultraviolet and Visible Absorption Spectroscopy*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Viezbicke, B., Patel, S., Davis, B., & Birnie, D. (2015). Evaluation of the Tauc Method for Optical Absorption Edge Determination: ZnO Thin Films as a Model System. *Physica Status Solidi B*, *252*, 1700-1710.
- Wang, H., Xu, J.-Z., Zhu, J.-J., & Chen, H.-Y. (2002). Preparation of CuO Nanoparticles by Microwave Irradiation. *Journal of Crystal Growth*, *244*(1), 88-94.
- Williamson, G., & Smallman, R. (1956). Dislocation densities in some annealed and cold-worked metals from measurements on the X-ray debye-scherrer spectrum. *Philosophical Magazine*, *1*(1), 34-46.
- Wongpisutpaisan, N., Charoonsuk, P., Vittayakorn, N., & Pecharapa, W. (2011). Sonochemical Synthesis and Characterization of Copper Oxide Nanoparticles. *9th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium*. Bangkok.

- Yoon, K., Choi, W., & Kang, D. (2000). Photoelectrochemical properties of copper oxide thin films coated on an n-Si substrat. *Thin Solid Films*, 372, 250-256.
- Yuxi, W., Huang, D., Zhu, X., & Ma, Y. (2014). Surfactant-Free Synthesis of Cu₂O Hollow Spheres and Their Wavelength-Dependent Visible Photocatalytic Activities using LED Lamps as Cold Light Sources. *Nanoscale Research Letters*, 9(1), 624.
- Zhang, J.-M., Zhang, Y., Xu, K.-W., & Ji, V. (2006). General compliance transformation relation and applications for anisotropic hexagonal metals. *Solid State Communication*, 139(3), 87-91.
- Zhang, Q., Zhang, K., Xu, D., Yang, G., & Huang, H. (2014). CuO nanostructures: synthesis, characterization, growth mechanisms, fundamental properties, and applications. *Progress in Material Science*, 60, 208-337.
- Zhou, W., Apkarian, R., Wang, Z., & Joy, D. (2007). Fundamentals of Scanning Electron Microscopy (SEM). In W. Zhou, & Z. Wang, *Scanning Microscopy for Nanotechnology Technique and Applications*. New York: Springer.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN A

Perhitungan Persamaan Scherrer

Tabel A. 1 CuO Nanopartikel Komersil (k=0.89)

Angle [°2θ]	θ (rad)	cos θ (rad)	FWHM [°2Th]	FWHM (rad)	hkl	Ukuran kristal (nm)
32,5389	0,28396	0,95995	0,2362	0,00412247	(-1 1 0)	34,634
35,5227	0,30999	0,95234	0,2558	0,00446455	(-1 1 1)/(0 0 2)	32,2361
38,7681	0,33832	0,94332	0,1968	0,00343481	(1 1 1)/(0 0 2)	42,3011
46,3296	0,4043	0,91938	0,4723	0,00824319	(-1 1 2)	18,0851
48,7829	0,42571	0,91075	0,3149	0,00549604	(-2 0 2)	27,3819
53,5214	0,46706	0,89289	0,3149	0,00549604	(0 2 0)	27,9293
58,3486	0,50919	0,87314	0,2362	0,00412247	(2 0 2)	38,0776
Rata-rata						31,5207
Terbesar						38,0776
Terkecil						18,0851

Tabel A. 2 CuO Nanopartikel Sintesis 700°C (k=0.89)

Angle [°2θ]	θ (rad)	cos θ (rad)	FWHM [°2Th]	FWHM (rad)	hkl	Ukuran kristal (nm)
32,2889	0,28177	0,96056	0,1171	0,002044	(-1 1 0)	69,81525
35,3245	0,30826	0,95286	0,1428	0,002492	(-1 1 1)/(0 0 2)	57,71322
38,5118	0,33608	0,94406	0,1836	0,003204	(1 1 1)/(0 0 2)	45,3068
46,1267	0,40253	0,92007	0,3264	0,005697	(-1 1 2)	26,14937
48,503	0,42327	0,91175	0,1428	0,002492	(-2 0 2)	60,31548
51,2505	0,44724	0,90164	0,3264	0,005697	(1 1 2)	26,68389
53,263	0,46481	0,89391	0,102	0,00178	(0 2 0)	86,12721
58,1367	0,50734	0,87404	0,3264	0,005697	(2 0 2)	27,52653
Rata-rata						49,95472
Terbesar						86,12721
Terkecil						26,14937

Tabel A. 3 CuO Nanopartikel Sintesis 450°C (k=0.89)

Angle [°2θ]	θ (rad)	cos θ (rad)	FWHM [°2Th]	FWHM (rad)	hkl	Ukuran kristal (nm)
32,3115	0,28197	0,96051	0,2007	0,0035	(-1 1 0)	40,73658411
35,3416	0,30841	0,95282	0,2007	0,0035	(-1 1 1)/(0 0 2)	41,06547093
38,5849	0,33672	0,94384	0,2007	0,0035	(1 1 1)/(0 0 2)	41,45582285
46,3639	0,4046	0,91926	0,2676	0,00467	(-1 1 2)	31,9234024
48,5613	0,42378	0,91154	0,2676	0,00467	(-2 0 2)	32,19366872
53,4072	0,46607	0,89334	0,4015	0,0070	(0 2 0)	21,89422093
Rata-rata						34,87819499
Terbesar						41,45582285
Terkecil						21,89422093

Tabel A. 4 CuO Nanorod (k=0.94)

Angle [°2θ]	θ (rad)	cos θ (rad)	FWHM [°2Th]	FWHM (rad)	hkl	Ukuran kristal (nm)
32,46	0,2832	0,96014	0,2362	0,00412	(-1 1 0)	36,5726431
35,48	0,3097	0,95242	0,2755	0,00480	(-1 1 1)/(0 0 2)	31,6096465
38,67	0,3374	0,94358	0,2362	0,00412	(1 1 1)	37,2142911
48,72	0,4251	0,91096	0,3936	0,00686	(-2 0 2)	23,132057
53,43	0,4663	0,89323	0,4723	0,00824	(0 2 0)	19,6602359
58,24	0,5083	0,87356	0,6298	0,01099	(2 0 2)	15,075511
Rata-rata						27,210730
Terbesar						37,214291
Terkecil						15,075511

LAMPIRAN B

Perhitungan Williamson-Hall (W-H) Plot

Tabel B. 1 CuO Nanopartikel Komersil

2θ (degree)	θ (radians)	FWHM (βT) in degree	βT (radians)	$\beta T \cos \theta$	$4 \sin \theta$
32,5389	0,56791094	0,2362	0,00412247	0,003475	2,151488
35,5227	0,619988074	0,2558	0,00446455	0,003634	2,324102
38,7681	0,67663099	0,1968	0,00343481	0,002678	2,504679
46,3296	0,808604061	0,4723	0,00824319	0,005692	2,893296
48,7829	0,851422224	0,3149	0,00549604	0,003621	3,008873
53,5214	0,93412465	0,3149	0,00549604	0,003268	3,216316
58,3486	1,018375184	0,2362	0,00412247	0,002163	3,405026

Tabel B. 2 CuO Nanopartikel Sintesis 700°C

2θ (degree)	θ (radians)	FWHM (βT) in degree	βT (radians)	$\beta T \cos \theta$	$4 \sin \theta$
32,2889	0,563547617	0,1171	0,002043781	0,001728	2,136754
35,3245	0,616528832	0,1428	0,00249233	0,002033	2,312826
35,4168	0,618139771	0,0816	0,001424189	0,001161	2,318081
38,5118	0,672157711	0,1836	0,003204425	0,002507	2,490703
46,1267	0,805062788	0,3264	0,005696755	0,003948	2,883497
48,503	0,846537047	0,1428	0,00249233	0,001651	2,995962
51,2505	0,894489968	0,3264	0,005696755	0,003566	3,11956
53,263	0,929614719	0,102	0,001780236	0,001065	3,205558
56,5674	0,987287379	0,4896	0,008545132	0,004708	3,338138
58,1367	1,014676831	0,3264	0,005696755	0,003007	3,39724

Tabel B. 3 CuO Nanopartikel Sintesis 450°C

2θ (degree)	θ (radians)	FWHM (βT) in degree	βT (radians)	$\beta T \cos \theta$	$4 \sin \theta$
21,2753	0,37132403	0,2007	0,00350288	0,003264	1,451398
23,3208	0,40702474	0,1673	0,00291994	0,002681	1,583516
24,5088	0,42775926	0,1673	0,00291994	0,002657	1,659332
25,9675	0,45321837	0,1004	0,00175231	0,001575	1,751445
26,5137	0,46275136	0,2007	0,00350288	0,003134	1,785647
28,6337	0,49975234	0,3346	0,00583987	0,005126	1,916833
29,4637	0,51423857	0,1673	0,00291994	0,002542	1,967488
32,3115	0,56394206	0,2007	0,00350288	0,00296	2,138088
33,1251	0,57814206	0,1506	0,00262847	0,002201	2,185876
34,7756	0,60694872	0,1428	0,00249233	0,002047	2,281455
34,9509	0,61000828	0,1171	0,00204378	0,001675	2,291497
35,3416	0,61682728	0,2007	0,00350288	0,002857	2,3138
36,7999	0,64227942	0,2342	0,00408756	0,003273	2,396089
38,5849	0,67343355	0,2007	0,00350288	0,002738	2,494694
39,7413	0,69361653	0,4015	0,0070075	0,005388	2,557289
42,3181	0,73859018	0,3346	0,00583987	0,004318	2,692985
43,5969	0,76090945	0,4015	0,0070075	0,005075	2,758321
44,285	0,77291906	0,4015	0,0070075	0,005016	2,792912
44,9459	0,78445394	0,2676	0,0046705	0,003306	2,825755
46,3639	0,80920271	0,2676	0,0046705	0,003223	2,894949
48,5613	0,84755457	0,2676	0,0046705	0,003091	2,998657
50,0771	0,87401027	0,3346	0,00583987	0,003748	3,067635
53,4072	0,93213148	0,4015	0,0070075	0,004177	3,21157
56,0736	0,97866894	0,2007	0,00350288	0,001955	3,319021
59,2972	1,03493138	0,2007	0,00350288	0,001789	3,439309

Tabel B. 4 CuO Nanorod

2θ (degree)	θ (radians)	FWHM (βT) in degree	βT (radians)	$\beta T \cos \theta$	$4 \sin \theta$
21,4246	0,186964905	0,1181	0,002061234	0,002025	0,74351
32,4627	0,2832905	0,2362	0,004122468	0,003958	1,118066
35,4897	0,309706058	0,2755	0,004808382	0,00458	1,219115
38,6744	0,337497808	0,2362	0,004122468	0,00389	1,324508
48,7218	0,425177914	0,3936	0,006869616	0,006258	1,649931
53,4354	0,466311834	0,4723	0,00824319	0,007363	1,79838
58,2482	0,508311437	0,6298	0,010992084	0,009602	1,946811

LAMPIRAN C

Perhitungan Dislokasi dari Data XRD

Tabel C. 1 CuO Nanopartikel Komersil

Angle [°2θ]	θ (rad)	FWHM [°2Th]	FWHM (rad)	D (nm)	$\delta \times 10^{-3}$ (nm ²)
32,5389	0,28396	0,2362	0,00412247	34,634	0,83367
35,5227	0,30999	0,2558	0,00446455	32,236	0,96231
38,7681	0,33832	0,1968	0,00343481	42,301	0,55885
46,3296	0,4043	0,4723	0,00824319	18,085	3,05743
48,7829	0,42571	0,3149	0,00549604	27,382	1,33374
53,5214	0,46706	0,3149	0,00549604	27,929	1,28197
58,3486	0,50919	0,2362	0,00412247	38,078	0,6897

Tabel C. 2 CuO Nanopartikel Sintesis 700°C

Angle [°2θ]	θ (rad)	FWHM [°2Th]	FWHM (rad)	D (nm)	$\delta \times 10^{-3}$ (nm ²)
32,288	0,28177381	0,1171	0,00204378	69,8152	0,20516
35,324	0,30826442	0,1428	0,00249233	57,7132	0,30023
38,511	0,33607886	0,1836	0,00320442	45,3068	0,48716
46,126	0,40253139	0,3264	0,00569675	26,1494	1,46244
48,503	0,42326852	0,1428	0,00249233	60,3155	0,27488
51,250	0,44724498	0,3264	0,00569675	26,6839	1,40444
53,263	0,46480736	0,102	0,00178024	86,1272	0,13481
58,136	0,50733842	0,3264	0,00569675	27,5265	1,31977

Tabel C. 3 CuO Nanopartikel Sintesis 450°C

Angle [°2θ]	θ (rad)	FWHM [°2Th]	FWHM (rad)	D (nm)	$\delta \times 10^{-3}$ (nm ²)
32,3115	0,28197103	0,2007	0,00350288	40,7366	0,6026
35,3416	0,30841364	0,2007	0,00350288	41,0655	0,59299
38,5849	0,33671677	0,2007	0,00350288	41,4558	0,58187
46,3639	0,40460135	0,2676	0,0046705	31,9234	0,98125
48,5613	0,42377729	0,2676	0,0046705	32,1937	0,96485
53,4072	0,46606574	0,4015	0,0070075	21,8942	2,08613

Tabel C. 4 CuO Nanorod

Angle [2θ]	θ (rad)	FWHM [$^{\circ}2\theta$]	FWHM (rad)	D (nm)	$\delta \times 10^{-3}$ (nm^{-2})
32,4627	0,2832905	0,2362	0,00412247	34,6273	0,83399
35,4897	0,30970606	0,2755	0,00480838	29,9283	1,11644
38,6744	0,33749781	0,2362	0,00412247	35,2348	0,80548
48,7218	0,42517791	0,3936	0,00686962	21,9016	2,08472
53,4354	0,46631183	0,4723	0,00824319	18,6145	2,88601
58,2482	0,50831144	0,6298	0,01099208	14,2736	4,90831

LAMPIRAN D
JCPDS 00-045-0937 (CuO)

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	1.50580	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
20	-3	1	3	1.16970	82.378	3.0
21	2	2	2	1.16130	83.105	2.0
22	4	0	0	1.15510	83.652	2.0
23	-4	0	2	1.12350	86.570	1.0
24	-1	3	1	1.09200	89.724	2.0
25	1	3	1	1.07400	91.652	1.0
26	2	0	4	1.03920	95.675	1.0
27	0	2	4	1.01750	98.410	1.0
28	3	1	3	1.00690	99.818	2.0
29	-1	1	5	0.98160	103.393	2.0
30	-2	2	4	0.98070	103.526	2.0
31	-4	2	0	0.95770	107.090	1.0
32	-1	3	3	0.94370	109.423	1.0
33	-4	2	2	0.93940	110.168	2.0
34	-4	0	4	0.93350	111.212	1.0
35	1	1	5	0.92070	113.575	2.0
36	-3	3	1	0.91860	113.976	2.0
37	1	3	3	0.90990	115.682	1.0
38	-5	1	1	0.90370	116.944	1.0

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN E

JCPDS 00-007-0408 (Cu₃(OH)₄SO₄)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	0	6,80000	13,009	12,0
2	0	2	0	6,01000	14,728	25,0
3	0	1	1	5,40000	16,402	25,0
4	1	2	0	4,86000	18,239	100,0
5	1	1	1	4,52000	19,625	10,0
6	2	0	0	4,13000	21,499	8,0
7	1	2	1	3,79000	23,454	16,0
8	1	3	0	3,60000	24,710	75,0
9	2	2	0	3,40000	26,189	10,0
10	0	3	1	3,34000	26,668	10,0
11	1	3	1	3,09000	28,871	16,0
12	0	4	0	3,00000	29,757	18,0
13	1	1	2	2,76200	32,388	12,0
14	0	2	2	2,69800	33,178	10,0
15	3	1	0	2,68300	33,369	75,0
16	1	2	2	2,56600	34,939	85,0
17	3	2	0	2,50300	35,847	25,0
18	2	0	2	2,43900	36,821	6,0
19	2	4	0	2,43000	36,963	14,0
20	2	1	2	2,39800	37,474	4,0
21	1	3	2	2,31500	38,871	8,0
22	1	5	0	2,30700	39,011	4,0
23	2	2	2	2,25900	39,875	14,0
24	0	4	2	2,13100	42,381	20,0
25	2	3	2	2,08300	43,407	6,0
26	4	0	0	2,06500	43,805	18,0
27	4	1	0	2,03400	44,508	20,0
28	3	1	2	2,00400	45,211	4,0
29	4	2	0	1,95100	46,510	2,0
30	1	6	0	1,94600	46,636	10,0
31	4	1	1	1,92700	47,124	8,0
32	2	4	2	1,89300	48,023	4,0
33	4	3	0	1,83500	49,642	12,0
34	3	3	2	1,81400	50,256	16,0
35	2	6	0	1,80100	50,644	2,0
36	1	3	3	1,75800	51,974	2,0
37	2	5	2	1,71100	53,514	6,0
38	4	1	2	1,68700	54,337	10,0
39	0	6	2	1,66700	55,044	4,0
40	5	1	0	1,63400	56,253	16,0
41	3	6	0	1,61700	56,898	6,0
42	5	2	0	1,59900	57,598	2,0
43	4	5	0	1,56600	58,930	14,0
44	3	5	2	1,55100	59,557	16,0
45	5	3	0	1,52500	60,678	4,0
46	0	0	4	1,51100	61,300	12,0
47	0	8	0	1,50000	61,799	10,0
48	4	4	2	1,48100	62,681	20,0
49	1	7	2	1,46700	63,348	2,0
50	3	7	0	1,45500	63,932	2,0
51	5	1	2	1,43800	64,779	10,0
52	3	6	2	1,42600	65,392	2,0
53	4	5	2	1,39000	67,307	4,0
54	6	1	0	1,36500	68,710	2,0
55	5	5	0	1,36000	68,999	4,0

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN F
JCPDS 01-080-0656 [Cu(OH)₂]

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	34.086	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	47.080	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	8.4
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
37	1	7	2	1.19820	80.014	0.2
38	1	1	4	1.19260	80.466	0.4
39	0	8	2	1.18250	81.297	4.4
40	0	4	4	1.17710	81.749	0.1
41	2	4	2	1.15630	83.545	0.1
42	1	3	4	1.13630	85.360	4.9
43	2	6	0	1.13130	85.828	1.3
44	2	6	1	1.10600	88.290	1.1
45	2	2	3	1.10300	88.592	2.5
46	1	9	0	1.09300	89.620	0.3
47	1	9	1	1.07020	92.071	1.0
48	1	7	3	1.06750	92.372	2.2
49	0	10	0	1.05930	93.301	0.2
50	0	8	3	1.05640	93.634	0.3

51	0	6	4	1.05420	93.890	0.8
52	1	5	4	1.04430	95.059	2.7
53	2	6	2	1.03910	95.687	2.2
54	0	10	1	1.03840	95.772	2.2
55	2	4	3	1.03760	95.870	1.8
56	0	2	5	1.03120	96.661	1.1
57	1	9	2	1.00920	99.508	0.4
58	1	1	5	0.98590	102.763	2.0
59	2	8	0	0.98490	102.908	2.2
60	0	10	2	0.98250	103.260	0.4
61	2	0	4	0.98080	103.512	1.7
62	0	4	5	0.97710	104.064	0.8
63	2	8	1	0.96810	105.439	0.4
64	2	2	4	0.96440	106.019	0.7
65	3	1	1	0.96170	106.447	0.9
66	1	3	5	0.95340	107.792	0.5
67	2	6	3	0.95040	108.290	0.8
68	3	3	0	0.94640	108.963	1.5
69	1	7	4	0.94030	110.011	0.1
70	0	8	4	0.93270	111.356	1.4
71	3	3	1	0.93140	111.591	0.3
72	1	9	3	0.92740	112.321	0.8
73	2	8	2	0.92230	113.272	3.1
74	2	4	4	0.91970	113.766	0.1
75	3	1	2	0.91670	114.343	0.2
76	1	11	0	0.91540	114.596	1.3
77	0	10	3	0.90650	116.369	0.9
78	0	6	5	0.90330	117.027	0.5
79	1	5	5	0.89700	118.353	0.8
80	3	5	0	0.89120	119.615	1.3
81	3	3	2	0.89040	119.792	2.4
82	0	12	0	0.88280	121.516	0.1
83	3	5	1	0.87870	122.478	0.9
84	0	0	6	0.87610	123.101	0.5
85	0	12	1	0.87060	124.452	0.3
86	1	11	2	0.86440	126.033	2.3
87	0	2	6	0.86440	126.033	2.3
88	2	10	0	0.86010	127.170	0.2
89	2	8	3	0.85860	127.574	0.3
90	2	6	4	0.85740	127.901	0.8
91	3	1	3	0.85410	128.814	0.9
92	2	10	1	0.84880	130.329	1.6
93	2	2	5	0.84480	131.514	1.3
94	3	5	2	0.84400	131.756	1.8
95	1	9	4	0.84030	132.896	0.3
96	1	1	6	0.83710	133.911	0.1
97	0	12	2	0.83710	133.911	0.1
98	3	3	3	0.83270	135.356	0.2
99	0	4	6	0.83170	135.692	0.1
100	1	7	5	0.82860	136.758	1.1

101	0	10	4	0.82470	138.146	0.1
102	3	7	0	0.82400	138.401	0.1
103	0	8	5	0.82330	138.659	0.1
104	2	10	2	0.81700	141.068	1.3
105	1	3	6	0.81700	141.068	1.3
106	2	4	5	0.81430	142.158	1.4
107	3	7	1	0.81430	142.158	1.4
108	1	11	3	0.81130	143.414	0.1

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN G

Perhitungan Diameter Partikel menggunakan *software ImageJ*

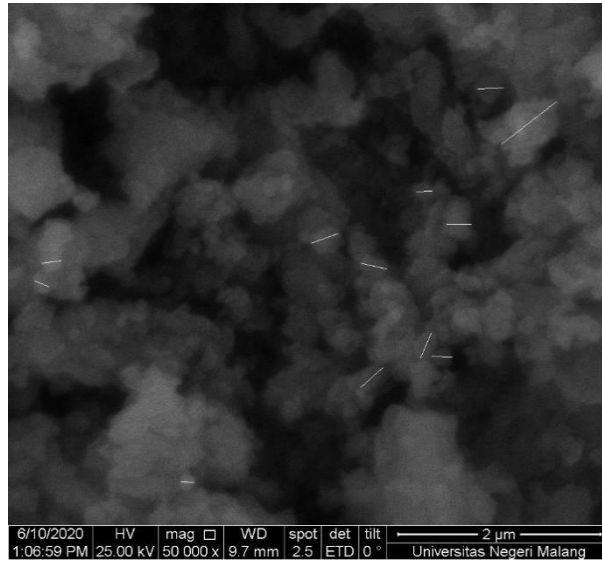
1. CuO Nanopartikel Sintesis 450°C

Tabel G. 1 Distribusi ukuran partikel CuO nanopartikel sintesis 450°C

No.	Label	Rata-rata	Min	Maks	Angle (°)	Length (nm)
1		46,412	32	54,971	-1,685	198,626
2		58,482	44	70,539	-138,27	289,508
3		66,67	50,2	79,973	-12,804	263,486
4		91,264	64,75	120,929	37,818	682,526
5		70,588	53	84,5	19,573	278,889
6		69,085	56,556	77,644	-114,55	260,002
7		58,536	50,077	68,923	2,203	151,937
8		47,045	35,909	61,545	2,603	257,2
9		65,302	32	84	0	245,255
10		102,793	85,364	116,576	6,911	194,111
11		91,932	81	102,083	-22,62	151,825
12		96,356	69	111,318	-2,603	128,6
13		60,56	35	80,001	26,854	515,567
14		84,475	63	98	0	227,072
15		46,899	32	55,087	-54,118	337,747
16		74,097	43	96,181	-147,92	920,817
17		77,576	62,156	86,581	-97,927	464,404
18		56,048	44,766	72,319	3,652	274,208
19		69,801	53	88,25	8,881	188,576
20		83,794	71,658	95,88	29,134	406,608
21		92,569	67,667	112,083	48,366	630,995
Rata-rata		71,9183	53,624	86,542	-19,357	336,569
Standar deviasi		17,0418	16,0955	19,3159	57,1529	202,604
Min.		46,412	32	54,971	-147,92	128,6
Maks.		102,793	85,364	120,929	48,366	920,817

Keterangan:

Rata-rata, minimum, maksimum merupakan tipe data bit-depth yang digunakan untuk representasi 8 bit float point (tanpa satuan).



Gambar G. 1 Perhitungan diameter CuO nanopartikel Sintesis 450°C

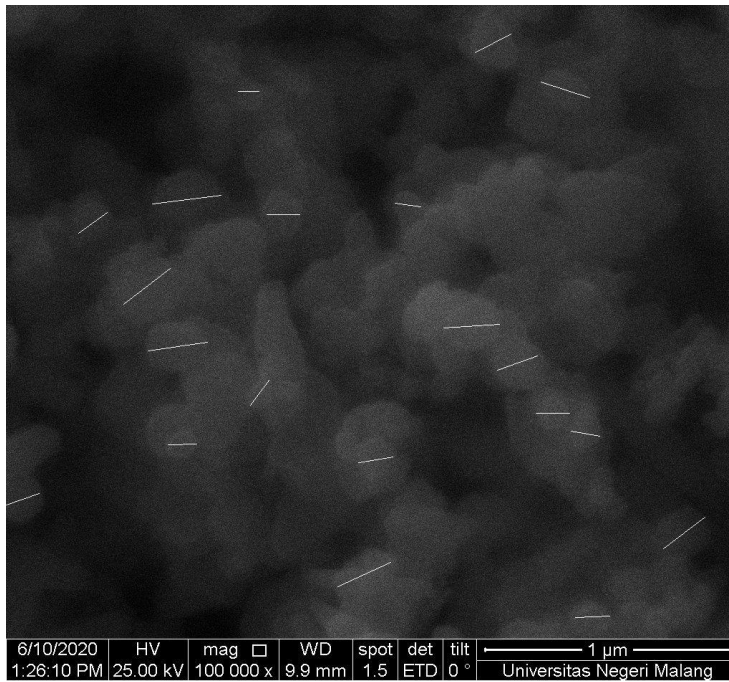
2. CuO Nanopartikel Komersil

Tabel G. 2 Distribusi ukuran partikel CuO nanopartikel sintesis komersil

No.	Label	Rata-rata	Min	Maks	Angle (°)	Length (nm)
1		62,804	48,775	77,4	1,432	116,655
2		66,158	51,507	82,847	19,654	173,365
3		68,292	45	89	0	137,026
4		60,14	42,98	75	8,227	244,498
5		60,949	42,406	73,392	-10,491	120,083
6		76,24	57,346	102,128	3,668	227,872
7		55,396	34,388	71,416	-17,928	208,368
8		54,562	39,553	69,522	-0,616	135,576
9		66,067	49,764	81,704	8,791	143,08
10		38,927	23,398	52,663	37,185	212,248
11		67,255	49,667	82,917	2,386	140,063
12		43,446	29,646	56,808	7,125	282,061
13		42,729	29,985	57,294	-160,82	141,992
14		70,055	55	87,32	53,393	126,746
15		61,126	42,697	81,639	37,569	238,39
16		47,26	37,422	64,932	35,942	143,623
17		70,393	48	92,765	24,677	236,736
18		56,462	37	68,246	27,474	163,826
19		58,191	39,389	89,111	-7,907	105,656
20		52,258	37,537	66,797	-0,324	85,757
21		45,982	23	56,841	10,176	115,184
Rata-rata		58,3187	41,1648	75,2258	3,79105	166,609762
Standar deviasi		10,2989	9,57196	13,3215	41,8709	54,9892158
Min.		38,927	23	52,663	-160,82	85,757
Maks.		76,24	57,346	102,128	53,393	282,061

Keterangan:

Rata-rata, minimum, maksimum merupakan tipe data bit-depth yang digunakan untuk representasi 8 bit float point (tanpa satuan).



Gambar G. 2 Perhitungan diameter CuO nanopartikel komersil

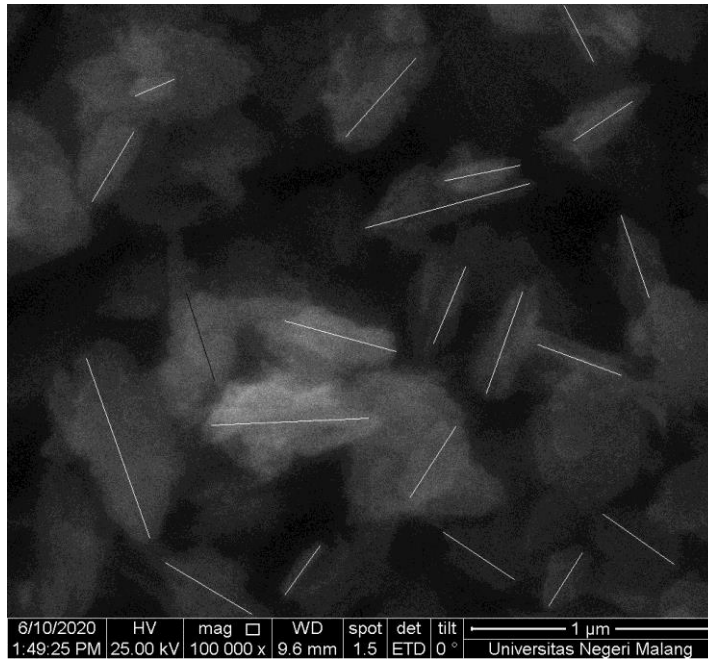
3. CuO Nanorod

Tabel G. 3 Distribusi ukuran partikel CuO nanorod

No.	Label	Rata-rata	Min	Maks	Angle (°)	Length (nm)
1		63,657	41,711	90,948	-70,508	801,802
2		55,926	37,242	76,369	-109,6	453,169
3		105,488	75,619	135,761	2,534	661,465
4		100,084	52	135,927	-15,376	485,204
5		50,518	35,924	63,522	54,462	251,53
6		68,207	26,858	93,429	11,514	322,275
7		51,34	28,85	73,519	-112,69	348,628
8		84,674	63,208	107,379	23,199	178,147
9		67,08	47,127	85,919	-120,96	340,991
10		45,706	31,705	60,018	57,724	262,833
11		66,909	46	98,93	-20,136	373,72
12		69,052	37	85,305	33,69	295,191
13		78,456	62,629	97,164	57,095	355,236
14		36,904	23	54,403	-33,69	358,447
15		48,215	33	65,648	-71,274	364,314
16		61,85	39	78,556	48,24	439,025
17		36,077	26,538	49,786	-35,218	365,064
18		59,655	39,081	85	-62,301	264,195
19		52,496	37,469	72,406	-30,828	422,229
20		41,361	26,226	55,901	50,964	276,942
21		47,735	30,77	82,712	15,173	710,826
Rata-rata		61,4948	40,0456	83,2668	-15,619	396,72538
Standar deviasi		18,7444	13,7013	23,4007	58,5865	156,84796
Min.		36,077	23	49,786	-120,96	178,147
Maks.		105,488	75,619	135,927	57,724	801,802

Keterangan:

Rata-rata, minimum, maksimum merupakan tipe data bit-depth yang digunakan untuk representasi 8 bit float point (tanpa satuan).



Gambar G. 3 Perhitungan diameter CuO nanorod

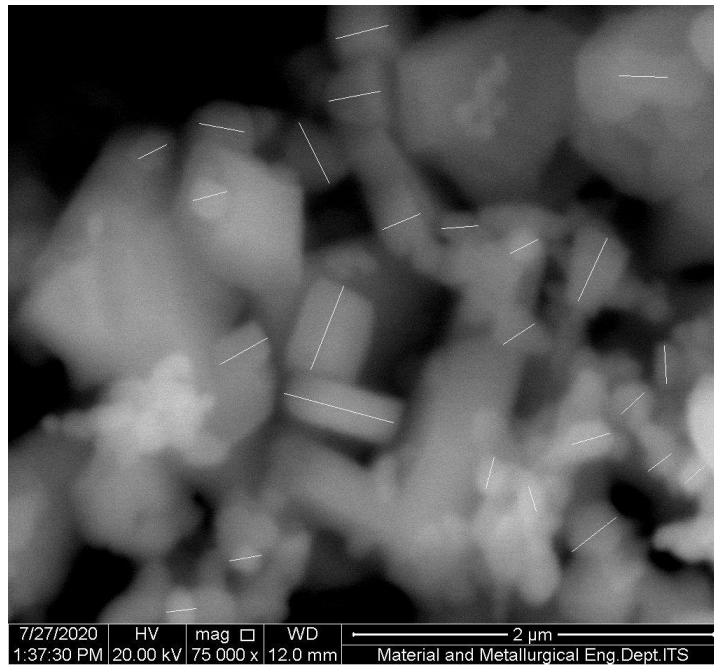
4. CuO Nanopartikel Sintesis 700°C

Tabel G. 4 Distribusi ukuran partikel CuO nanopartikel sintesis 700°C

No.	Label	Rata-rata	Min	Maks	Angle (°)	Length (nm)
1		124,291	93	138,512	61,928	526,108
2		131,692	69,564	157,63	-15,068	624,966
3		164,589	125	177	14,657	259,906
4		127,896	115	140,893	43,152	169,683
5		184,756	172	193,777	-72,553	141,925
6		109,817	60	132,903	37,875	308,749
7		128,569	84	151,024	37,147	160,155
8		76,719	40	98,023	10,856	287,543
9		88,637	57	104,309	14,4	295,55
10		103,699	80,152	118,333	22,543	221,989
11		139,572	117	152,693	25,974	167,821
12		147,559	128,881	161,857	6,789	163,622
13		129,082	103	144,677	10,081	176,809
14		54	30	73,446	-63,435	371,954
15		108,109	83	123,761	33,389	203,856
16		96,503	75	105,444	93,18	209,218
17		126,148	88,75	140,333	29,197	301,342
18		81,648	60,407	102	26,565	173,002
19		134,18	123	143,13	-1,66	269,725
20		79,145	48	93,59	169,209	253,913
21		87,186	73	93,769	4,399	203,786
Rata-rata		115,419	86,9407	130,8144762	23,2679	261,5058095
Standar deviasi		31,6134	34,445	30,63763026	49,2632	121,9463393
Min.		54	30	73,446	-72,553	141,925
Maks.		184,756	172	193,777	169,209	624,966

Keterangan:

Rata-rata, minimum, maksimum merupakan tipe data bit-depth yang digunakan untuk representasi 8 bit float point (tanpa satuan).



Gambar G. 4 Perhitungan diameter CuO nanopartikel sintesis 700°C

LAMPIRAN H

Perhitungan Nilai Efisiensi DSSC

Dari data pengukuran arus (I) dan tegangan (V) yang dihasilkan di bawah iradiansi 100 mW/cm^2 , maka dapat diketahui nilai performansi (η) DSSC. Beberapa parameter yang perlu diketahui di antaranya:

V_{oc} = Tegangan tertinggi ketika arus sama dengan 0 (V)

I_{sc} = Arus tertinggi ketika tegangan sama dengan 0 (mA)

J_{sc} = Rapat arus (I_{sc} dibagi dengan luas permukaan DSSC) (mA/cm^2)

MPP = *Maximum Power Point* (titik daya maksimum) dari hasil pengukuran I-V (mW)

V_{MPP} = Tegangan yang menghasilkan daya di titik maksimum hasil pengukuran I-V (V)

I_{MPP} = Arus yang menghasilkan daya di titik maksimum hasil pengukuran I-V (mA)

P_{Max} = Daya maksimum dari sel surya (mW)

P_{cahaya} = Daya cahaya matahari yang diukur melalui piranometer (mW/cm^2)

A = Luas permukaan DSSC (cm^2)

Dengan menggunakan persamaan (3.13), (3.14), (3.15), dan (3.16) sebagai berikut:

$$FF = \frac{V_{MPP} \cdot J_{MPP}}{V_{oc} \cdot J_{sc}}$$

$$P_{Max} = V_{oc} \cdot J_{sc} \cdot FF$$

$$\eta = \frac{P_{Max}}{P_{cahaya}}$$

$$P_{cahaya} = I \text{ (W/m}^2\text{)} = \frac{E}{S}$$

$$J_{sc} = \frac{I_{sc}}{A}$$

Tabel H. 1 Parameter-parameter dan hasil perhitungan efisiensi DSSC

Sampel	Voc (V)	Isc (mA)	Jsc (mA/cm ²)	Vmpp (V)	Impp (mA)	Jmpp (mA/cm ²)	Pmpp (mW)	FF	Pmax (mW)	Pirano-meter (μV)	Pcahaya (mW/cm ²)	Efisiensi	Efisiensi (%)
CuO Komersil	0,09	0,0007	0,0028	0,0412	0,0004	0,0016	$1,648 \cdot 10^{-5}$	0,262	0,00006592	11000,09	76,602298	$8,6 \cdot 10^{-7}$	8,6055E-05
CuO Nps Sintesis 700°C	0,1316	0,0009	0,0036	0,0804	0,0004	0,0016	$3,216 \cdot 10^{-5}$	0,272	0,00012864	11070	77,089136	$1,67 \cdot 10^{-6}$	0,00016687
CuO Nps Sintesis 450°C	0,035	0,0002	0,0008	0,025	0,000125	0,0005	$3,125 \cdot 10^{-6}$	0,446	0,0000125	11230	78,203343	$1,59 \cdot 10^{-7}$	1,5984E-05
CuO Nanorod	0,088	0,0008	0,0032	0,0497	0,000355	0,00142	$1,764 \cdot 10^{-5}$	0,251	0,000070574	10230	75,220588	$9,38 \cdot 10^{-7}$	9,3823E-05

BIODATA PENULIS



Penulis bernama Winda Nur Azizah. Dilahirkan di Banjarmasin, 20 April 1998. Penulis menyelesaikan pendidikan sekolah dasar pada tahun 2010 di SD Islam Sabilal Muhtadin Banjarmasin, pada tahun 2013 penulis menamatkan pendidikan sekolah menengah pertama di SMP Negeri 2 Banjarmasin, dan pada tahun 2016 penulis menamatkan sekolah menengah atas di SMA Negeri 1 Banjarmasin. Penulis mampu menyelesaikan gelar sarjana teknik pada tahun 2020 di Departemen Teknik Fisika, FTIRS, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Semasa kuliah penulis aktif dalam kepengurusan Unit Kegiatan Mahasiswa Shorinji Kempo ITS. Penulis berhasil menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “Sintesis dan Karakterisasi Nanopartikel dan Nanorod CuO sebagai Fotokatoda *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC) Tipe P”. Kritik, saran, atau diskusi lebih lanjut mengenai Tugas Akhir ini dari pembaca, dapat menghubungi penulis melalui email windanuraz.98@gmail.com.