

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI
FOTOKATALIS $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -POLIANILIN (PANi)
UNTUK FOTODEGRADASI METILEN BIRU**

SKRIPSI

Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Syarat Guna Memperoleh
Gelar Sarjana Sains
dalam Ilmu Kimia



Oleh : **Clarisa Dwi Arvianti**

NIM : 1908036044

**FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI WALISONGO SEMARANG
2023**

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI FOTOKATALIS $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -
POLIANILIN (PANI) UNTUK FOTODEGRADASI METILEN
BIRU**

SKRIPSI

Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Syarat Guna Memperoleh
Gelar Sarjana Sains
dalam Ilmu Kimia

Oleh

Clarisa Dwi Arvianti

1908036044

**FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI WALISONGO SEMARANG
2023**

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertandatangan di bawah ini:

Nama : Clarisa Dwi Arvianti

NIM : 1908036044

Jurusan : Kimia

Menyatakan bahwa skripsi yang berjudul:

**Sintesis dan Karakterisasi Fotokatalis $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -
Polianilin (PANI) untuk Fotodegradasi Metilen Biru**

Secara keseluruhan adalah hasil penelitian/karya saya sendiri, kecuali bagian tertentu yang dirujuk sumbernya.

Semarang, 23 Juni 2023

Pembuat Pernyataan,

Clarisa Dwi Arvianti

NIM : 1908036044

PENGESAHAN

Naskah skripsi berikut ini:

Judul : **Sintesis dan Karakterisasi Fotokatalis $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -Polianilin (PANI) untuk Fotodegradasi Metilen Biru**

Penulis : Clarisa Dwi Arvianti

NIM : 1908036044

Jurusan : Kimia

Telah diujikan dalam sidang tugas akhir oleh Dewan Penguji Fakultas Sains dan Teknologi UIN Walisongo dan dapat diterima sebagai salah satu syarat memperoleh gelar sarjana dalam Ilmu Kimia.

Semarang, 26 Juni 2023

DEWAN PENGUJI

Ketua Sidang,

Dr. Eng. Anissa Adiwena Putri M.Sc
NIP. 198504052011012015

Sekretaris Sidang,

Kholidah, M.Si
NIP. 198508112019032008

Penguji I,

Dr. Ervin Tri Suryandani M.Sc
NIP. 197407162009122081

Penguji II,

Dyah Fitasari, M.Si
NIP. 198501022019032017

Pembimbing,

Dr. Eng. Anissa Adiwena Putri, M.Sc
NIP. 198504052011012015

NOTA DINAS

Semarang, 23 Juni 2023

Yth. Ketua Program Studi Kimia
Fakultas Sains dan Teknologi
UIN Walisongo Semarang

Assalamu'alaikum. wr. wb.

Dengan ini diberitahukan bahwa saya telah melakukan bimbingan, arahan dan koreksi naskah skripsi dengan:

Judul : Sintesis dan Karakterisasi Fotokatalis
 $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -Polianilin (PANi) untuk
Fotodegradasi Metilen Biru

Nama : **Clarisa Dwi Arvianti**

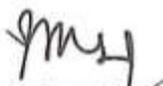
NIM : 1908036044

Jurusan : Kimia

Saya memandang bahwa naskah skripsi tersebut sudah dapat diajukan kepada Fakultas Sains dan Teknologi UIN Walisongo untuk diujikan dalam Sidang Munaqsyah.

Wassalamu'alaikum. wr. wb.

Pembimbing



Dr. Eng. Anissa Adwena Putri, M.Sc

NIP. 198504052011012015

ABSTRAK

Komposit terner $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi berhasil disintesis melalui metode pencampuran sol dan polimerisasi *in-situ*. Tahapan sintesis dimulai dari preparasi Cu_2O dan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$. Komposit terner $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi dibuat dengan berbagai variasi konsentrasi PANi, yaitu penggunaan anilin 0,10; 0,05; dan 0,03. Karakterisasi dilakukan dengan alat *Fourier Transform Infrared* (FTIR), *X-Rays Diffractometry* (XRD), dan *Diffuse Reflektansi Ultraviolet Visible* (DR-UV). Dari data diketahui spektra FTIR menunjukkan karakter Cu_2O , ZnO, dan PANi. Pola difraksi XRD menunjukkan pola kristalinitas milik Cu_2O dan ZnO berdasarkan data JCPDS No. 5-667 dan JCPDS No. 36-1451. Karakter PANi tidak dapat diidentifikasi dengan alat XRD karena jumlahnya terlalu sedikit. Penambahan ZnO dapat menggeser energi celah pita Cu_2O dari 1,94 eV menjadi 3,08 eV. Penambahan PANi juga dapat memperbesar E_g $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi(0,10) menjadi 3,22 eV. Pada uji fotodegradasi 100 mL MB 10 ppm dengan fotokatalis Cu_2O , $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$, dan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi selama 120 menit penyinaran sinar *visible* dan pengadukan pada pH 12 dihasilkan % fotodegradasi dengan *trend* berbeda. Fotodegradasi MB dengan Cu_2O ; $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$; $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi(0,03); $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi(0,05); dan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi(0,10) berturut-turut sebesar 80,2%; 81,89%; 85,72%; 87,73%; dan 90,01%. Komposit $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi(0,10) juga dapat mempertahankan lebih dari 82% pengurangan MB setelah tiga kali siklus fotodegradasi. Nilai tersebut menunjukkan hasil yang lebih tinggi dibandingkan dengan satu kali siklus fotodegradasi MB oleh Cu_2O dan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$. Stabilitas komposit terner $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi(0,10) dalam fotodegradasi MB juga dibuktikan dari spektra dan difraktogram fotokatalis tersebut.

Kata kunci: fotokatalis, komposit $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi, polimerisasi *in situ*, fotodegradasi, metilen biru

TRANSLITERASI ARAB-LATIN

A. Konsonan

ا	A	ط	t}
ب	B	ظ	z}
ت	T	ع	'
ث	s\	غ	g
خ	J	ف	f
ح	h}	ق	q
ج	Kh	ك	k
د	D	ل	l
ذ	z\	م	m
ر	R	ن	n
ز	Z	و	w
س	S	ه	h
ش	sy	ء	'
ص	s}	ي	y
ض	d}		

B. Vokal

اَ	a
اِ	i
اُ	u

C. Bacaan Madd

a> = a panjang

i> = i panjang

u> = u panjang

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah rabbil'alamin puji syukur kepada Allah *subhanahu wa ta'ala*, penulis panjatkan kepada Dzat Yang Maha Baik dan Maha Indah. Berkat-Nya lah penulis diizinkan menyelesaikan penyusunan Tugas Akhir ini guna memenuhi salah satu syarat untuk menyelesaikan studi dalam jenjang pendidikan S1 jurusan Kimia di Universitas Islam Negeri Walisongo Semarang dengan judul “Sintesis dan Karakterisasi Fotokatalis $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -Polianilin (PANi) untuk Fotodegradasi Metilen Biru”. Sholawat serta salam semoga tetap terlimpahkan kepada baginda Rasulullah *shallallahu alaihi wasallam* yang senantiasa memupuk rasa keyakinan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

Merupakan suatu hal yang dapat dibanggakan penyusunan skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik berkat adanya bantuan secara moril maupun materil dari berbagai pihak. Penulis menyadari betul tanpa adanya pihak-pihak yang terkait mungkin penyelesaian skripsi ini dapat tertunda bahkan tidak selesai sama sekali. Oleh karena itu, dengan penuh rasa hormat, penulis persembahkan ucapan terima kasih kepada semua pihak yang membantu, khususnya kepada:

1. Prof. Dr. H. Imam Taufiq, M.Ag selaku Rektor UIN Walisongo Semarang.
2. Dr. H. Ismail, M.Ag selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Walisongo Semarang.
3. Dr. Atik Rahmawati, S.Pd. M.Si selaku Ketua Jurusan Kimia UIN Walisongo Semarang.
4. Dr. Hj. Malikhatul Hidayah, S.T., M.Pd., M.T selaku Ketua Program Studi Kimia UIN Walisongo Semarang.
5. Mutista Hafshah, M.Si selaku wali dosen yang telah memberikan segala saran selama penulis menyelesaikan studi.
6. Dr. Eng. Anissa Adiwena Putri, M.Sc selaku dosen pembimbing yang telah memberikan segala bimbingan, pemikiran, saran, serta arahan yang sangat berguna dalam penyusunan skripsi.
7. Bapak/Ibu dosen dan staff di lingkungan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Walisongo Semarang terutama Program Studi Kimia yang telah banyak membantu dalam penyusunan skripsi.
8. Kedua orang tua penulis, Ns. Bayu Agustiar, S.Kep dan Betty Woro Astuti yang selalu memberikan cinta, doa, motivasi, dan kesabaran tanpa henti dalam setiap langkah hidup penulis. Lahir dan besar di tangan mereka merupakan suatu hal yang akan selalu penulis

syukuri. Penulis berharap dapat menjadi anak yang selalu dibanggakan.

9. Nenek dan kakek penulis, Kinasih, Rasinah (almarhumah) serta Suwardi Petir (almarhum) yang selalu memotivasi penulis lewat cinta dan doanya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
10. Kakak dan adik penulis tercinta, Lintang Tiara Pratiwi, Amd.Kep dan Bagus Barru Triananda yang selalu memberi dukungan dan motivasi sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
11. Teman-teman program studi kimia 2019 yang selalu memberikan semangat serta nasehat yang berharga khususnya, Khofifah Dwi Safitri, Aryzka Maharani Putri, dan Wahyu Wisnu Jati.
12. Teman-teman Balsquad, Ara, Aulia, Iren, Nafila, Rohmah, dan Yolanda yang telah menemani penulis di semester awal perkuliahan.
13. Semua pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan skripsi ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan, untuk itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang sifatnya membangun demi penyempurnaan penulisan ini ke depannya. Dengan segala harapan dan doa,

semoga skripsi ini dapat berguna bagi penulis dan pembaca pada umumnya serta khususnya bagi pengembangan ilmu pengetahuan terutama ilmu sains.

Semarang, Juni 2023

Clarisa Dwi Arvianti
1908036044

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN KEASLIAN	ii
PENGESAHAN	Error! Bookmark not defined.
NOTA DINAS	iv
ABSTRAK	v
TRANSLITERASI ARAB-LATIN	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah.....	10
C. Tujuan Penelitian.....	11
D. Manfaat Penelitian	11
BAB II	13
A. Kajian Pustaka.....	13
1. Mekanisme Fotokatalis	13
2. Semikonduktor Sebagai Fotokatalis.....	17
3. Fotokatalis Cu ₂ O.....	21
4. Fotokatalis ZnO	23
5. Fotokatalis PANi	25
6. Komposit Sebagai Inovasi dalam Peningkatan Sifat Aktivitas Fotokatalitik.....	27
7. Fotodegradasi	32
8. Metilen Biru	33
9. Teknik Karakterisasi	35
B. Kajian Penelitian yang Relevan.....	46
C. Hipotesis Penelitian.....	50
BAB III	52
A. Tempat dan Waktu Penelitian.....	52
B. Alat dan Bahan Penelitian.....	52
C. Metode Penelitian.....	53

BAB IV.....	60
A. Sintesis Cu ₂ O murni	60
B. Sintesis Cu ₂ O/ZnO	62
C. Sintesis Cu ₂ O/ZnO-PANi.....	65
D. Analisis FTIR.....	68
E. Analisis XRD.....	72
F. Analisis DR-UV	77
G. Aplikasi Fotokatalis untuk Degradasi Zat Warna Metilen Biru	78
1. Penentuan Panjang Gelombang (λ) Maksimum Metilen Biru	79
2. Kurva Standar Metilen Biru	81
3. Kinerja Fotokatalis dalam Fotodegradasi Metilen Biru	83
4. Stabilitas Fotokatalis dalam Mendegradasi Metilen Biru.....	88
BAB V	93
A. Simpulan.....	93
B. Saran	94
DAFTAR PUSTAKA	96
LAMPIRAN.....	112
RIWAYAT HIDUP	138

DAFTAR TABEL

Tabel	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Karakteristik senyawa Cu_2O secara umum	23
Tabel 2.2	Karakteristik senyawa ZnO secara umum	25
Tabel 2.3	Karakteristik senyawa anilin secara umum	27
Tabel 4.1	Daftar bilangan gelombang pada spektra FTIR untuk fotokatalis yang digunakan dalam penelitian ini dan referensi	72
Tabel 4.2	Degradasi fotokatalitik zat warna MB oleh masing-masing fotokatalis di bawah radiasi cahaya <i>visible</i>	85
Tabel 4.3	Persentase degradasi fotokatalis $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi(0,10) untuk mendegradasi MB	89

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Tingkat energi elektron	14
Gambar 2.2	Mekanisme fotokatalis	15
Gambar 2.3	Semikonduktor tipe-n dan tipe-p	18
Gambar 2.4	Struktur pita semikonduktor dan potensial redoks pada pH=7 vs NHE	19
Gambar 2.5	Spektrum cahaya dan energi foton yang sesuai dalam eV	20
Gambar 2.6	Kristalografi dari struktur kristal ZnO yang berbeda. (a) struktur <i>wurtsite</i> , (b) struktur <i>zinc blende</i> , (c) struktur <i>rocksalt</i>	24
Gambar 2.7	Struktur PANi pada tingkat okidasi yang berbeda	26
Gambar 2.8	Mekanisme fotokatalitik komposit biner Cu ₂ O-ZnO di bawah sinar <i>visible</i>	28
Gambar 2.9	Mekanisme fotokatalitik komposit terner Cu ₂ O/ZnO-PANi (a) <i>heterojunction type-II</i> dan (b) <i>Z-scheme</i> di bawah cahaya tampak	30
Gambar 2.10	Struktur kimia MB	33
Gambar 2.11	Prinsip kerja spektrofotometer UV-Vis	36
Gambar 2.12	Prinsip kerja FTIR	38
Gambar 2.13	Spektrum FTIR Cu ₂ O, Cu ₂ O/ZnO, Cu ₂ O/ZnO-PANi (0,1)	39
Gambar 2.14	Prinsip kerja XRD	41
Gambar 2.15	Pola difraksi XRD Cu ₂ O, Cu ₂ O/ZnO, Cu ₂ O/ZnO-PANi (0,1)	43

Gambar 4.1	Prosedur pembuatan material Cu_2O	60
Gambar 4.2	Prosedur pembuatan material $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$	64
Gambar 4.3	Mekanisme reaksi sintesis PANi	67
Gambar 4.4	Komposit terner hasil sintesis (a) $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi(0,03) (b) $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi(0,05) (c) $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi(0,10)	68
Gambar 4.5	Spektra FTIR fotokatalis Cu_2O ; $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$; $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi(0,03); $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi(0,05); $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi(0,10)	69
Gambar 4.6	Pola XRD standar Cu_2O , standar ZnO , Cu_2O , $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$, dan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi(0,10)	73
Gambar 4.7	Hasil spektrum DR-UV material Cu_2O , $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$, dan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi(0,10)	77
Gambar 4.8	Kurva panjang gelombang (λ) maksimum MB	80
Gambar 4.9	Kurva standar metilen biru	82
Gambar 4.10	Fotoreaktor untuk fotodegradasi MB	85
Gambar 4.11	Mekanisme degradasi metilen biru (Huang dkk., 2010)	88
Gambar 4.12	Spektrum FTIR sampel $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi(0,10) yang digunakan dan tidak digunakan tiga kali siklus fotodegradasi	90
Gambar 4.13	Pola XRD sampel $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi(0,10) yang digunakan dan tidak digunakan tiga kali siklus fotodegradasi	92

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1	Diagram alir 112
Lampiran 2	Panjang Gelombang Maksimum Metilen Biru 115
Lampiran 3	Perhitungan Pembuatan Larutan Matilen Biru 119
Lampiran 4	Data Absorbansi Larutan Standar MB pada Panjang Gelombang 665 nm 122
Lampiran 5	Perhitungan Persen Degradasi Zat warna Metilen Biru 123
Lampiran 6	Spektrum FTIR 127
Lampiran 7	Pola Difraksi XRD 130
Lampiran 8	Perhitungan Ukuran Kristal 132
Lampiran 9	Perhitungan % Kristalinitas 135
Lampiran 10	Penentuan Energi Celah Pita Fotokatalis 136

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Metilen biru (MB) merupakan zat warna yang sering digunakan pada industri tekstil. Zat warna ini memiliki dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan manusia (Baunsele & Missa, 2020). Efek negatif MB terhadap manusia dan hewan yaitu dapat mengiritasi saluran pencernaan, saluran pernapasan, dan kulit (Guo dkk., 2014). MB juga mempunyai sifat mutagenik dan karsinogenik (Alfina, 2015).

Selain berbahaya bagi makhluk hidup, zat warna MB juga berbahaya bagi lingkungan. Zat warna ini memiliki sifat yang stabil sehingga sulit terurai di alam. Hal ini disebabkan karena MB mempunyai struktur cincin benzena yang sulit diurai dalam air (Putra, 2019). Alasan lain yaitu karena sintesis zat warna diharuskan memiliki resistensi terhadap pengaruh lingkungan seperti efek pH, suhu, dan mikroba (Qodri, 2011). Akibatnya, nilai *Chemical Oxygen Demand* (COD) dalam air yang terpapar zat warna meningkat dan keseimbangan ekosistem lingkungan menjadi rusak yang ditandai dengan matinya organisme air di sekitar lokasi cemaran MB (Riyanto & Julianto, 2004).

Pengolahan limbah MB yang tidak sesuai prosedur merupakan penyebab kerusakan lingkungan oleh perbuatan manusia. Akibatnya, ekosistem lingkungan di sekitarnya bisa terganggu. Kerusakan lingkungan seperti ini telah disinggung Allah *subhanahu wa ta'ala* di dalam alquran yaitu pada surat ar-Rum ayat 41 berikut:

ظَهَرَ الْفَسَادُ فِي الْبَرِّ وَالْبَحْرِ بِمَا كَسَبَتْ أَيْدِي النَّاسِ لِيُذِيقَهُمْ بَعْضَ
الَّذِي عَمِلُوا لَعَلَّهُمْ يَرْجِعُونَ

Artinya:

"Telah tampak kerusakan di darat dan di laut disebabkan perbuatan tangan manusia; Allah menghendaki agar mereka merasakan sebagian dari (akibat) perbuatan mereka, agar mereka kembali (ke jalan yang benar)." (QS. Ar-Rum 30: Ayat 41)

Melalui ayat tersebut, Allah *subhanahu wa ta'ala* menegaskan bahwa kerusakan lingkungan di bumi ini tidak lain merupakan akibat dari perbuatan manusia yang kerap kali menuruti hawa nafsunya. Allah *subhanahu wa ta'ala* menghendaki jika manusia harus merasakan sebagian dari akibat perbuatan buruk mereka agar mereka kembali ke jalan yang benar. Selain itu, ayat ini juga memperingatkan manusia untuk turut menjaga lingkungan dengan sebaik-baiknya. Salah satu bentuk usaha yang dapat dilakukan untuk menanggulangi kerusakan lingkungan adalah mengolah limbah secara baik dan benar (Az-Zuhaili, 2013).

Mengingat dampak negatif MB, maka dibutuhkan cara untuk mengurangi kadar limbah zat warna MB pada lingkungan. Secara umum, metode pengurangan limbah zat warna diklasifikasikan menjadi tiga, yaitu secara biologis, fisika, atau kimia. Pengolahan secara biologis adalah proses pengolahan yang melibatkan dekomposisi mikrobiologis atau enzimatik, pengolahan secara fisika seperti filtrasi, adsorpsi, atau koagulasi/flokulasi, sedangkan pengolahan secara kimia dapat diupayakan melalui klorinasi dan ozonasi (Ajmal dkk., 2014).

Adsorpsi merupakan salah satu metode yang umum dilakukan untuk mengurangi limbah atau polutan. Hu dkk. (2019) telah melakukan sintesis Ag/SiO₂ menggunakan metode impregnasi basah untuk adsorpsi MB. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa Ag/SiO₂ dapat mengadsorpsi 99 % MB dari konsentrasi awal 40 mg/L selama 3 menit. Duhan dan Kaur (2021) juga telah melakukan penelitian tentang adsorpsi zat warna tersebut dengan menggunakan *polyaniline nanofiber base (PNB)*. Adsorben PNB tersebut dapat mengadsorpsi MB sekitar 86 % dari konsentrasi zat warna awal 6 mg/L selama 60 menit. Penelitian lain tentang adsorpsi MB juga telah dilakukan oleh Wang dkk. (2018). Dalam penelitian tersebut, adsorben yang digunakan adalah komposit

graphene oxide dan polianilin (GO-PANi). Hasilnya menunjukkan bahwa GO-PANi dapat mengadsorpsi 87,8 % MB selama 90 menit. Penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa metode adsorpsi merupakan metode yang efektif dalam mengurangi kadar MB. Namun demikian, metode adsorpsi memiliki kekurangan yaitu pada proses adsorpsi menyebabkan polusi sekunder karena sumber pencemar hanya dipindahkan dari satu ke media lain, yaitu dari larutan berair ke permukaan adsorben (Ajmal dkk., 2014) sehingga memerlukan pengolahan lebih lanjut untuk regenerasi adsorben. Dalam kasus ini biaya pengolahan limbah semakin bertambah.

Untuk menutupi kekurangan proses adsorpsi zat warna maka dapat dilakukan proses fotokatalisis untuk degradasi zat warna. Metode ini memiliki kelebihan, antara lain ekonomis, tidak beracun, aman, dan terbarukan (Wang, 2015). Proses fotokatalisis memanfaatkan bantuan cahaya matahari.

Muthukumaran (2019) telah melakukan penelitian tentang sintesis fotokatalis nanopartikel Cu_2O untuk degradasi MB. Dari penelitian tersebut diketahui nanopartikel Cu_2O dapat mendegradasi 91,76 % zat warna MB dengan iradiasi sinar UV selama 60 menit. Penelitian serupa tentang sintesis Cu_2O untuk fotodegradasi MB juga

telah dilakukan oleh Mrunal (2019). Penelitian tersebut menginformasikan bahwa nanopartikel Cu_2O hasil sintesis dapat mendegradasi 97 % MB pada pH 3,47 selama 120 menit di bawah sinar UV. Akter dkk. (2021) juga telah melakukan penelitian tentang fotokatalis Cu_2O untuk mendegradasi MB. Penelitian tersebut membuktikan bahwa Cu_2O dapat digunakan untuk mendegradasi 97 % MB dengan iradiasi sinar UV selama 60 menit dan 70 % MB dengan iradiasi sinar matahari selama 120 menit.

Berdasarkan penelitian terdahulu maka dapat diketahui bahwa Cu_2O terbukti dapat diaplikasikan sebagai fotokatalis dalam degradasi MB. Cu_2O merupakan material semikonduktor tipe-p yang memiliki kelebihan di antaranya tidak beracun, keberadaannya berlimpah, dan energi celah pitanya kecil (2,2 eV) (Rej dkk., 2021). Di sisi lain penggunaan Cu_2O ternyata juga mempunyai masalah utama yang dapat membatasi pengaplikasiannya sebagai fotokatalis. Cu_2O dapat mengalami fotokorosi saat diinteraksikan dengan foton di bawah media berair. Ada sebagian ion logam dari fotokatalis Cu_2O bermigrasi ke dalam larutan sehingga sifat fotokatalitiknya menurun (Annisaputri dkk., 2020). Selain itu, penggunaan material logam oksida secara tunggal sebagai fotokatalis dapat lebih mudah mengalami rekombinasi. Hal ini menjadikan

umur pasangan elektron/*hole* sangat pendek, sehingga efek fotokatalitiknya kurang efektif (Putra, 2019). Untuk menutupi kekurangan tersebut dapat dilakukan penggabungan dua material menjadi komposit. Hal ini dilakukan agar laju rekombinasi elektron/*hole* dapat menurun (Ruzimuradov dkk, 2014). Salah satu material yang dapat digunakan dalam pembuatan material komposit berbasis Cu_2O adalah ZnO .

ZnO merupakan material semikonduktor tipe-n yang aktivitas fotokatalitiknya tinggi (Sakthivel dkk., 2003), ramah lingkungan, tidak beracun, energi celah pitanya (*band gap*) lebar (Gupta & Kumar, 2011), dan mampu menyerap 10 % sinar UV dari sinar matahari (Nair dkk., 2011). Efektivitas fotokatalis komposit $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ terhadap MB telah diteliti. Abdolhoseinzadeh dan Sheibani (2020) telah melakukan penelitian tentang sintesis komposit $\text{Cu}_2\text{O}-\text{ZnO}$ sebagai fotokatalis untuk mendegradasi MB. Hasilnya menunjukkan bahwa penggabungan dua material tersebut mengakibatkan nilai energi celah pita menjadi kecil (1,9 eV) dan komposit $\text{Cu}_2\text{O}-\text{ZnO}$ dapat mendegradasi 98 % zat warna MB (2 mg/L) dengan iradiasi sinar tampak selama 240 menit. Archela dkk. (2019) juga telah melakukan penelitian tentang penggunaan komposit $\text{Cu}_2\text{O}-\text{ZnO}$ untuk

mendegradasi zat warna MB. Hasilnya menunjukkan Cu_2O -ZnO dapat mendegradasi 91 % MB dengan iradiasi sinar *visible* selama 90 menit. Penelitian yang serupa juga dilakukan oleh Purba dkk. (2022). Dalam penelitian tersebut telah dilakukan sintesis $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}/\text{GO}$ melalui metode kopresipitasi dan hidrotermal untuk degradasi zat warna MB. Hasilnya menunjukkan bahwa komposit $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}/\text{GO}$ dapat mendegradasi 85,9 % MB di bawah sinar UV selama 120 menit.

Beberapa peneliti juga telah melakukan sintesis komposit berbasis Cu_2O menggunakan polianilin (PANi). PANi merupakan polimer yang memiliki konduktivitas listrik atau disebut dengan polimer konduktif. Sifat PANi ini antara lain stabil di lingkungan serta mudah dan murah untuk disintesis. Bilangan oksidasi PANi juga mudah berubah akibat adanya reaksi oksidasi dan reduksi maupun sifat konduktif menjadi isolatif karena reaksi asam-basa (Jain dkk., 2010). PANi telah dilaporkan memiliki aktivitas fotokatalitik yang baik dalam mendegradasi zat warna (Haspulat dkk., 2013). Wang dkk. (2013) telah membuktikan bahwa $\text{Cu}_2\text{O}/\text{PANi}$ dapat mendegradasi 99 % zat warna *Methyl Orange* (MO) dan 96 % *Rhodamine B* (RhB) dengan waktu kontak pada masing-masing sistem selama 100 menit di bawah

penyinaran sinar tampak. Mohamed dan Aazam (2014) telah membuktikan bahwa PANi/mesopori Cu_2O dapat mendegradasi 100 % tiofen dengan waktu kontak selama 120 menit dengan iradiasi sinar tampak. Penelitian lain dilakukan oleh Miao dkk. (2015) juga menunjukkan uji aktivitas komposit Grafena Oksida tereduksi/ Polianilin/ Tembaga(I) Oksida (RGO/PANi/ Cu_2O) terhadap zat warna *congo red*. Hasilnya membuktikan bahwa komposit RGO/PANi/ Cu_2O dapat mendegradasi 97,91 % *congo red* dengan waktu kontak selama 20 menit di bawah sinar *visible* menggunakan lampu Xenon.

Adapun penggunaan PANi untuk fotodegradasi zat warna MB telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Vijayalakshmi dkk. (2021) telah melakukan penelitian tentang sintesis material komposit PANi/ZnO sebagai fotokatalis untuk mendegradasi zat warna MB. Hasilnya menunjukkan bahwa komposit PANi/ZnO 10 % dapat mendegradasi 90 % zat warna MB 10 ppm dalam larutan berair dengan waktu kontak selama 160 menit di bawah penyinaran sinar matahari langsung. Saravanan dkk. (2016) telah melakukan penelitian sintesis nanokomposit PANi/ZnO dengan metode sonikasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nanokomposit PANi/ZnO 1,5 M dapat mendegradasi sekitar 99,2 % zat warna MB dalam

larutan berair dengan waktu kontak selama 180 menit di bawah penyinaran sinar tampak.

Kinerja fotokatalitik yang baik untuk komposit $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$, $\text{Cu}_2\text{O}/\text{PANi}$, maupun PANi/ZnO ini dapat dikaitkan dengan pengurangan rekombinasi elektron/*hole*, peningkatan konduktivitas listrik, dan peningkatan penyerapan zat pewarna. Terlepas dari keunggulan komposit $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$, $\text{Cu}_2\text{O}/\text{PANi}$, dan PANi/ZnO dalam mendegradasi zat warna, komposit biner juga memiliki kelemahan yaitu tidak dapat digunakan kembali berkali-kali dan potensi eksitasi elektron/*hole* cenderung berkurang secara signifikan (Meng dkk., 2019). Dengan demikian, dapat dilakukan sintesis komposit terner untuk meningkatkan aktivitas fotokatalitik dan pengaplikasiannya dalam jangka waktu lama (Meng dkk., 2019).

Mohammed dkk. (2021) telah melakukan penelitian tentang sintesis nanokomposit terner $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi dengan metode solvotermal dan polimer *in situ* untuk fotodegradasi *congo red*. Diketahui bahwa luas permukaan komposit terner $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi menjadi lebih besar ($45,32 \text{ m}^2/\text{g}$) jika dibandingkan dengan Cu_2O ($8,82 \text{ m}^2/\text{g}$) dan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ ($35,66 \text{ m}^2/\text{g}$). Efisiensi fotodegradasi *congo red* juga didapat dari Cu_2O ,

$\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$, dan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANi}$ secara berturut-turut adalah 81 %, 94 %, dan 100 % dengan waktu kontak 30 menit. Uji *reusability* juga dilakukan pada komposit terner $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANi}$. Hasilnya adalah komposit masih aktif dan mempertahankan lebih dari 92 % efisiensi degradasi awal setelah lima kali siklus degradasi.

Berdasarkan uraian latar belakang, peneliti akan melakukan sintesis dan karakterisasi komposit terner $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANi}$. Selain itu, akan dilakukan uji aktivitas fotokatalis tersebut untuk fotodegradasi MB. $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANi}$ diharapkan dapat mendegradasi MB lebih baik dibanding $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ dan Cu_2O di bawah radiasi sinar tampak.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka rumusan masalah pada penelitian ini antara lain adalah:

1. Bagaimana karakteristik Cu_2O , $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$, dan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANi}$ yang meliputi gugus fungsi, kristalinitas, dan energi celah pita?
2. Bagaimana performa fotokatalis $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANi}$ dibandingkan dengan Cu_2O dan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ dalam fotodegradasi MB?

3. Bagaimana stabilitas fotokatalis $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi setelah dilakukan tiga kali siklus fotodegradasi MB?

C. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan pada penelitian ini antara lain adalah:

1. Mengetahui karakteristik Cu_2O , $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$, dan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi yang meliputi gugus fungsi, kristalinitas, dan energi celah pita.
2. Mengetahui performa fotokatalis $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi dibandingkan dengan Cu_2O dan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ dalam fotodegradasi MB.
3. Mengetahui stabilitas fotokatalis $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi setelah dilakukan tiga kali siklus fotodegradasi MB.

D. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini antara lain adalah sebagai berikut.

1. Memberikan informasi mengenai teknik preparasi material Cu_2O , $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$, dan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi dengan metode pencampuran sol dan polimerisasi in situ.
2. Memberikan informasi mengenai karakteristik gugus fungsi, kristalinitas, dan energi celah pita Cu_2O , $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$, dan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi.

3. Menghasilkan fotokatalis dengan memanfaatkan sifat material Cu_2O , $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$, dan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}\text{-PANi}$ yang dapat digunakan untuk mendegradasi zat warna MB.

BAB II

LANDASAN PUSTAKA

A. Kajian Pustaka

1. Mekanisme Fotokatalis

Istilah fotokatalis berasal dari dua kata yaitu foto yang artinya foton (energi cahaya) dan katalis yang artinya zat yang dapat mempengaruhi laju reaksi kimia. Jadi, fotokatalis dapat didefinisikan sebagai suatu zat yang dapat mempengaruhi laju reaksi kimia dengan bantuan cahaya. Biasanya, material yang digunakan sebagai fotokatalis adalah material semikonduktor. Pada mekanisme fotokatalisis pasangan elektron/*hole* dapat terbentuk akibat radiasi sinar UV maupun *visible* ke permukaan bahan semikonduktor (Ameta dkk., 2018). Fotokatalis dapat dikategorikan menjadi dua jenis berdasarkan jenis katalisnya (Ameta dkk., 2018):

- Fotokatalisis homogen: Ketika semikonduktor yang berperan sebagai fotokatalis dan reaktan berada dalam fase yang sama, yaitu gas, padat, atau cair.

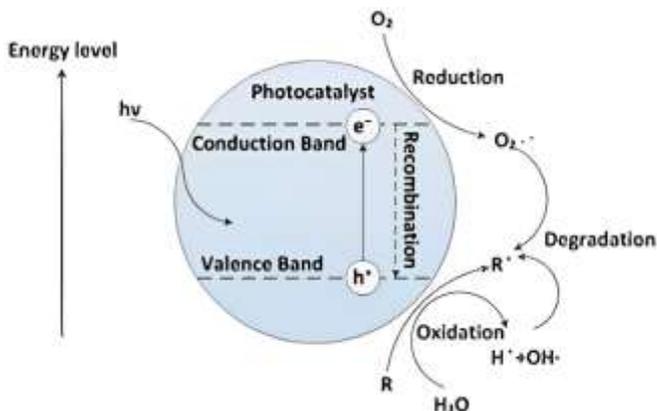
- Fotokatalisis heterogen: Ketika semikonduktor yang berperan sebagai fotokatalis dan reaktan berada dalam fase yang berbeda.

Pada bahan semikonduktor terdapat tiga daerah tingkatan energi yaitu pita valensi, celah pita, dan pita konduksi. Pita valensi merupakan daerah yang berada pada energi paling rendah. Pita konduksi merupakan daerah yang berada pada energi tinggi. Adapun celah pita merupakan celah antara pita valensi dan pita konduksi yang tidak terdapat elektron. Dengan demikian, energi celah pita adalah sejumlah energi yang dibutuhkan untuk mengeksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi (Jinkai, 2007). Tingkatan energi elektron tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Tingkat energi elektron (Ciftja, 2013)

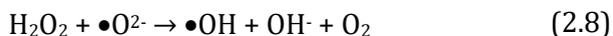
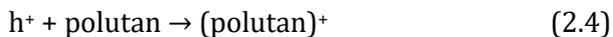
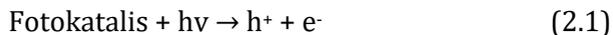
Ketika cahaya dengan energi yang lebih besar atau sama dengan energi celah pita fotokatalis diradiasikan, maka elektron dapat tereksitasi dari pita valensi ke pita konduksi sebagaimana terlihat pada Gambar 2.2. Dari peristiwa tersebut dihasilkan pasangan elektron dan *hole* pada kedua pita. Dengan adanya peristiwa tersebut, polutan organik dapat terdegradasi menjadi air dan karbon dioksida (Su, 2018).



Gambar 2.2 Mekanisme fotokatalis (Su, 2018)

Gambar 2.2 menunjukkan mekanisme pasangan elektron/*hole* tereksitasi ketika fotokatalis berada di bawah iradiasi dengan energi yang memadai. Apabila material semikonduktor diradiasi dengan energi foton, maka elektron tereksitasi dari pita valensi ke pita konduksi sehingga membentuk *hole* (h^+) pada

pita valensi. Elektron dan *hole* (h^+) yang terbentuk tersebut dapat bereaksi kembali di permukaan (rekombinasi). Elektron yang tereksitasi akan mengalami reaksi reduksi dengan oksigen menghasilkan suatu radikal superoksida ($\bullet O_2^-$), sedangkan *hole* mengalami reaksi oksidasi dengan molekul air (H_2O) sehingga membentuk radikal hidroksil aktif ($OH\bullet$) (Arutanti dkk., 2009). Selanjutnya, $\bullet O_2^-$ dan $OH\bullet$ dapat bereaksi dengan polutan organik. Akhirnya polutan organik dapat didegradasi menjadi molekul-molekul kecil yang tidak berbahaya seperti karbon dioksida (CO_2) dan air (Dong dkk., 2015). Rangkaian reaksi oksidasi dan reduksi/fotoeksitasi yang terjadi pada permukaan fotokatalis disajikan pada Persamaan 2.1 - 2.10 (Regmi dkk., 2018).



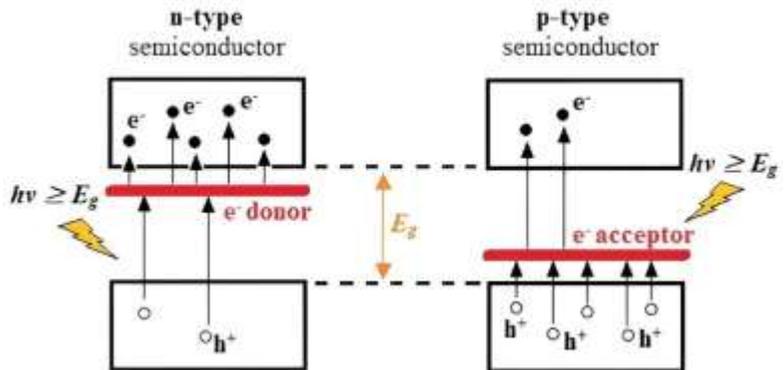


produk degradasi

2. Semikonduktor Sebagai Fotokatalis

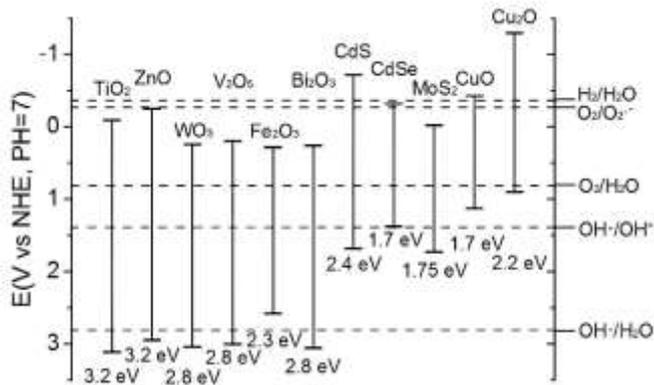
Semikonduktor merupakan material dengan sifat konduktivitas yang berada di antara bahan konduktor dan isolator (Greve, 2012). Jenis semikonduktor ada dua yaitu semikonduktor intrinsik dan ekstrinsik. Semikonduktor intrinsik memiliki jumlah elektron di pita konduksi sama dengan jumlah *hole* di pita valensi (Rockett, 2008). Adapun pada semikonduktor ekstrinsik ditambahkan pendoping sehingga jumlah elektron di pita konduksi tidak sama dengan jumlah *hole* di pita valensi (Fiore, 2021). Semikonduktor ekstrinsik diklasifikasikan sebagai semikonduktor tipe-p dan semikonduktor tipe-n. Pada semikonduktor tipe-p jumlah *hole* lebih banyak daripada jumlah elektron sehingga disebut pembawa muatan *hole*. Selanjutnya pada semikonduktor tipe-n jumlah elektron lebih banyak daripada jumlah *hole* sehingga disebut pembawa muatan elektron (Fiore, 2021). Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.3. Adapun semikonduktor tipe-n yang dapat digunakan sebagai fotokatalis adalah TiO_2 , ZnO , WO_3 , Fe_2O_3 , dll, sedangkan

semikonduktor tipe-p adalah CuO dan Cu_2O .



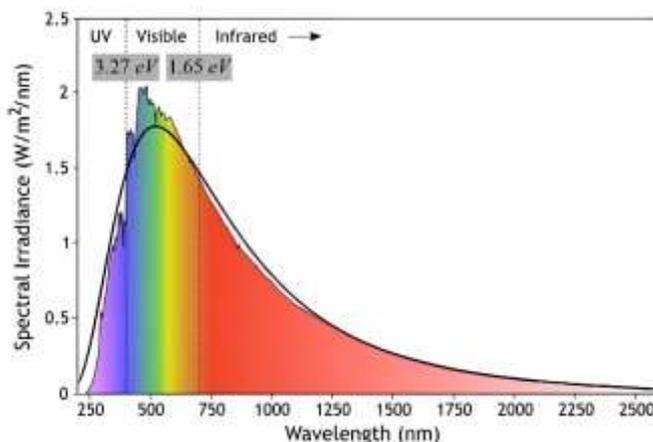
Gambar 2.3 Semikonduktor tipe-n dan tipe-p (Monfort & Plesch, 2018)

Untuk aplikasi fotokatalis, potensial redoks *hole* pita valensi harus cukup positif sedangkan elektron pita konduksi harus cukup negatif untuk menghasilkan radikal. Gambar 2.4 menunjukkan diagram struktur pita dari berbagai bahan fotokatalis dibandingkan elektroda hidrogen normal (NHE) pada $\text{pH}=7$ (Ghikov & Schmuki, 2009; Kudo & Miseki, 2009; Lu dkk., 2014).



Gambar 2.4 Struktur pita semikonduktor dan potensial redoks pada pH=7 vs NHE (Ghicov & Schmuki, 2009; Kudo & Miseki, 2009; Lu dkk., 2014)

Semikonduktor dengan celah pita lebar (TiO_2 , ZnO , WO_3 , dan sebagainya) hanya dapat menyerap cahaya dengan panjang gelombang pendek, sehingga lampu UV sering dijadikan sebagai sumber cahaya. Untuk aplikasi besar, fotokatalisis dengan penyinaran di bawah radiasi sinar tampak lebih disukai dibanding penyinaran di bawah sinar UV. Sinar *visible* menyumbang lebih dari 40 % spektrum matahari, sementara sinar UV hanya menyumbang kurang dari 4 %. Gambar 2.5 menyajikan hubungan antara celah pita dan panjang gelombang spektrum matahari. Dengan demikian, fotokatalis dengan celah pita sempit (CuO , Cu_2O , Fe_2O_3 , dan sebagainya) dapat diharapkan lebih efektif digunakan dengan penyinaran sinar matahari.



Gambar 2.5 Spektrum cahaya dan energi foton yang sesuai dalam eV (Su, 2018)

Untuk menjadi fotokatalis yang baik, bahan semikonduktor harus responsif terhadap energi foton (*photoactive*), tidak beracun, tahan terhadap perubahan di bawah pengaruh energi foton (*photosable*), dan memiliki kemampuan untuk diaktifkan secara fotokatalitik di bawah sinar matahari. TiO₂, ZnO, WO₃, CdS, ZnS, SrTiO₃, SnO₂, WSe₂, Fe₂O₃, Cu₂O, dan lain-lain termasuk di antara padatan semikonduktor yang digunakan sebagai fotokatalis (Bhatkhande dkk., 2002). Kisaran panjang gelombang bahan semikonduktor penting untuk diperhatikan dalam menentukan apakah material semikonduktor tersebut dapat bekerja sebagai fotokatalis dengan baik

di bawah sinar matahari atau tidak. Semikonduktor dengan sifat fotokatalitik yang unggul adalah yang memiliki celah pita lebar. Kinerja fotokatalitik bahan semikonduktor dengan celah pita lebar ini ditentukan melalui proses penyerapan energi foton pada daerah UV dan tingkat rekombinasinya rendah (Banerjee dkk., 2006). Di sisi lain, aktivitas fotokatalitik yang tinggi di siang hari dapat dicapai oleh fotokatalis yang memiliki energi celah pita lebih kecil dari 3 eV untuk menyerap sebagian besar spektrum matahari yang terdiri dari radiasi pada panjang gelombang *visible*, akan tetapi material semikonduktor dengan celah pita kecil ini memiliki fotoaktivitas yang rendah (Sato dkk., 1996).

3. Fotokatalis Cu_2O

Tembaga(I) oksida (Cu_2O) termasuk dalam semikonduktor tipe-p dengan celah pita sempit yang dapat dijadikan sebagai fotokatalis untuk produksi hidrogen (Ma dkk., 2021), pengurangan karbon dioksida (Roy dkk., 2021), konversi energi surya (Tran dkk., 2018), pemurnian air (Wang dkk., 2019), dan aplikasi fotokatalitik (Mrunal dkk., 2019). Fotokatalis Cu_2O untuk mengurangi konsentrasi polutan cair telah menunjukkan keunggulan efisiensi tinggi, toksisitas rendah, dan ramah lingkungan (Zheng dkk., 2009).

Partikel nano Cu_2O memiliki beberapa bentuk seperti *cube* (Kuo dkk., 2007), *octahedral* (Xu dkk., 2011), *rhombic dodecahedral* (Liang dkk., 2009), *truncated octahedral* (Chen & Xue, 2012), dan *18-facet polyhedral* (Lin dkk., 2010).

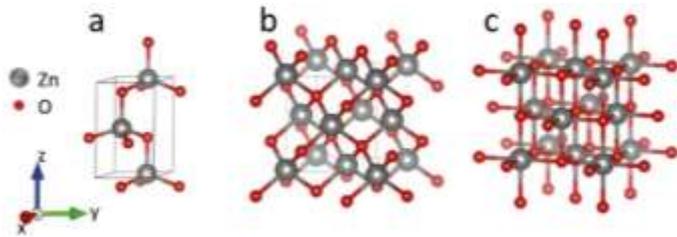
Kelemahan utama fotokatalis Cu_2O terletak pada stabilitas yang buruk di bawah radiasi sinar UV sehingga dapat mengalami fotokorosi (Kwon dkk., 2015). Hal ini dapat membatasi aplikasi fotokatalitik jangka panjang. Banyak penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan aktivitas fotokatalitik dan stabilitas fotokatalis Cu_2O dengan cara mengkomposikannya (Purba dkk., 2022). Selain fotokorosi, fotokatalis Cu_2O juga diketahui dapat mengalami rekombinasi selama reaksi fotokatalitik (Zheng dkk., 2009 & Sasmal dkk., 2016). Mekanisme Cu_2O dalam mendegradasi polutan organik dengan memanfaatkan energi foton dapat ditulis sebagaimana Persamaan 2.1 – 2.10 dengan fotokatalisnya berupa Cu_2O . Karakteristik senyawa Cu_2O secara umum dapat dilihat pada Tabel 2.1 (SDS LTS Research Laboratories, 2015).

Tabel 2.1 Karakteristik senyawa Cu_2O secara umum

Rumus kimia	Cu_2O
Berat molekul	143,09 g/mol
Warna	Serbuk merah gelap sampai ungu
Aroma	Tidak berbau
Titik leleh	1235 °C
Titik didih	1800 °C
Kelarutan	Tidak larut air
Densitas	5,749 ~ 6,14 g/cm ³

4. Fotokatalis ZnO

Seng oksida (ZnO) adalah material semikonduktor yang memiliki energi celah pita besar ($\sim 3,2$ eV) (Sutanto dkk., 2013). Umumnya, ZnO memiliki tiga struktur kristal yang berbeda yaitu *wurtzite*, *zinc blende*, dan *rocksalt* (yang dapat ditunjukkan pada Gambar 2.6). Struktur *wurtzite* terbentuk pada kondisi tekanan normal dan termasuk struktur yang stabil, sedangkan struktur *zinc blende* terbentuk pada substrat kubik, dan struktur *rocksalt* terbentuk pada kondisi dengan tekanan tinggi (Özgür dkk., 2005).



Gambar 2.6 Kristalografi dari struktur kristal ZnO yang berbeda. (a) struktur *wurtsite*, (b) struktur *zinc blende*, (c) struktur *rocksalt* (Momma & Izumi, 2011)

Sebagai aplikasi fotokatalitik, ada beberapa sifat yang memberikan keunggulan ZnO dibandingkan dengan katalis lain. ZnO memiliki rekombinasi elektron yang jauh lebih rendah (Quintana dkk., 2007). Selain itu, ZnO dapat dengan mudah disintesis (Pawar dkk., 2011) dan mampu menyerap cahaya pada panjang gelombang 365 nm (Lestari, 2011). Mekanisme fotokatalis ZnO dalam mendegradasi polutan organik dapat dituliskan sebagaimana pada Persamaan 2.1 – 2.10 dengan fotokatalisnya berupa ZnO. Karakteristik senyawa ZnO secara umum dapat dilihat pada Tabel 2.2 (Dar, 2015).

Tabel 2.2 Karakteristik senyawa ZnO secara umum

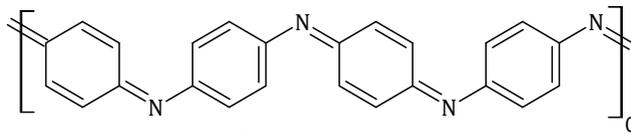
Rumus kimia	ZnO
Berat molekul	81,4084 g/mol
Warna	Putih atau bubuk putih kekuningan
Aroma	Tidak berbau
Rasa	Pahit
Titik leleh	1975°C
Kelarutan	Tidak larut air, larut pada asam dan basa
Densitas	5,6 g/cm ³
pH	6,95 (<i>American process</i>)- 7,37 (<i>French process</i>)

5. Fotokatalis PANi

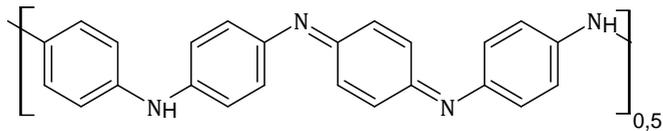
Polianilin (PANi) tergolong dalam jenis polimer konduktif. PANi dapat disintesis melalui reaksi polimerisasi anilin (C₆H₅NH₂). Anilin adalah senyawa turunan benzena yang memiliki satu gugus amina (-NH₂) (Kertati, 2008). Anilin memiliki sifat mudah disintesis, tahan terhadap korosi, dan stabil terhadap lingkungan (Kroschwitz, 1990).

Sebagaimana disajikan pada Gambar 2.7, PANi memiliki beberapa tingkatan oksidasi antara lain basa leukomeraldin (LB) tereduksi penuh, basa emeraldin (EB) setengah teroksidasi, dan basa pernigranilin (PB) teroksidasi penuh (Mihardi, 2008). Berdasarkan kestabilannya, struktur EB memiliki kestabilan yang

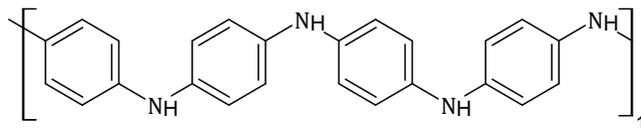
paling baik dibandingkan dengan LB dan PB.



Pernigranilin



Emeraldin



Leukoemeraldin

Gambar 2.7 Struktur PANi pada tingkat okidasi yang berbeda (Li dkk., 2009)

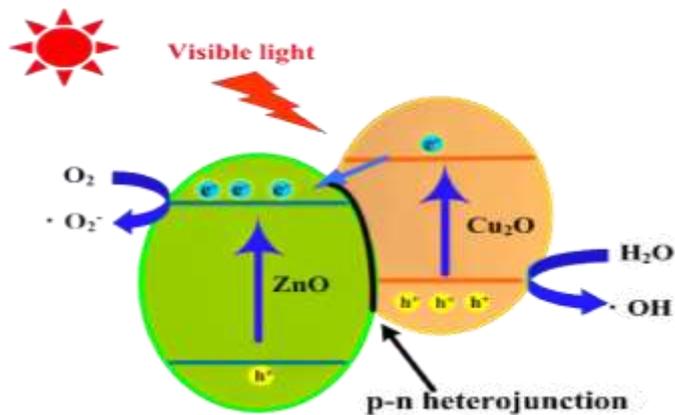
PANi memiliki kelebihan yaitu konduktivitas yang terkontrol dalam rentang $10^{-10} - 10^1 \text{ S cm}^{-1}$ dengan konduktivitas ionik dan proton, aktivitas redoks, stabil dalam kondisi ekstrim, stabilitas termal tinggi, dan mudah disintesis (Sapurina & Shishov, 2008). Tabel 2.3 menunjukkan karakteristik anilin (Hadiana, 2012).

Tabel 2.3 Karakteristik senyawa anilin secara umum

Rumus kimia	$C_6H_5NH_2$
Berat molekul	93,13 g/mol
Warna	Coklat muda
Titik didih	184 °C
Titik leleh	-6 °C
Kelarutan	0,3 g/L
Densitas	1,021 g/cm ³
pH	8,8 pada 36 g/L pada 20 °C

6. Komposit Sebagai Inovasi dalam Peningkatan Sifat Aktivitas Fotokatalitik

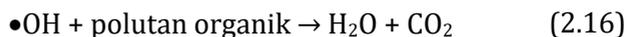
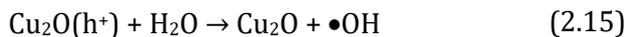
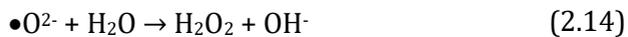
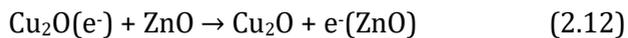
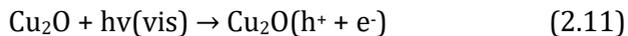
Komposit didefinisikan sebagai material baru yang terbentuk dari dua atau lebih material pembentuknya. Saat ini ada dua jenis komposit yang berbeda yaitu komposit biner dan terner. Komposit biner melibatkan penggunaan dua material yang berbeda, sedangkan dalam komposit terner menggunakan tiga bahan material yang berbeda (Scibioh & Viswanathan, 2020). Material komposit diyakini sebagai material yang lebih baik dari material pembentuknya. Hal ini dikarenakan material komposit memiliki sifat mekanik dan karakteristik gabungan dari material pembentuknya (Riyanto & Julianto, 2004).

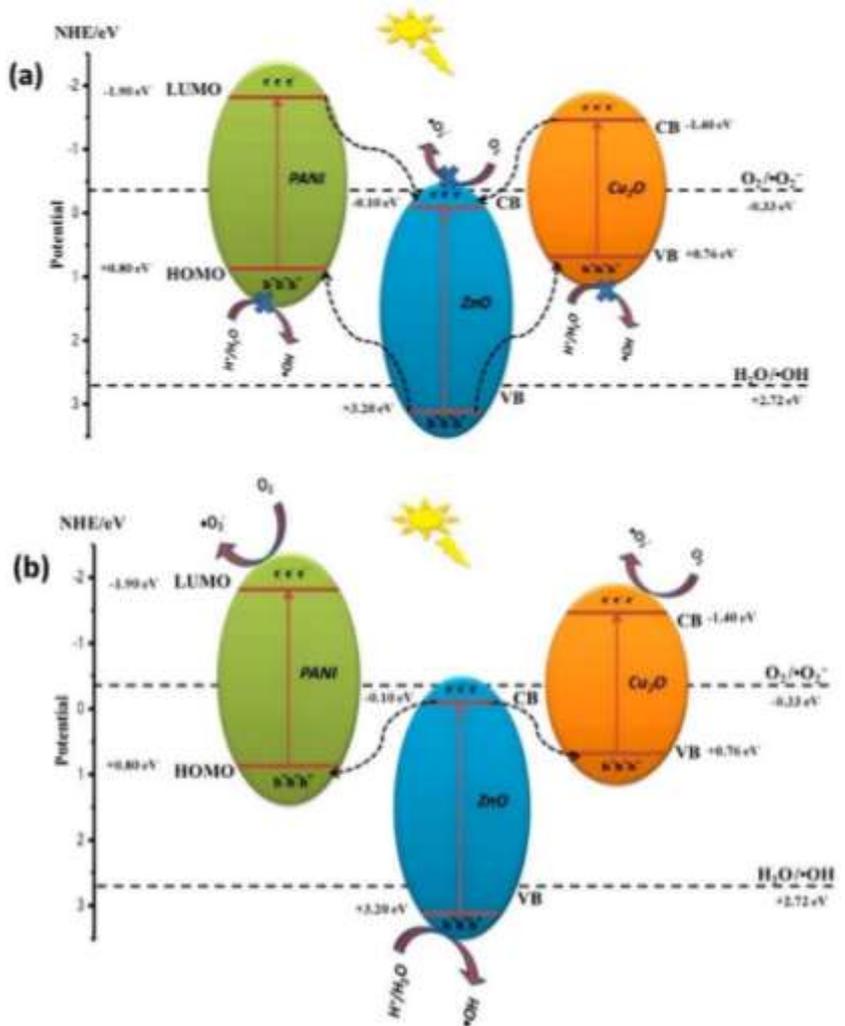


Gambar 2.8 Mekanisme fotokatalitik komposit biner Cu_2O - ZnO di bawah sinar *visible* (Wang dkk., 2018)

Gambar 2.8 memperlihatkan contoh mekanisme fotokatalis komposit biner $\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$ di bawah cahaya tampak. Energi celah pita ZnO diperkirakan sebesar 3,2 eV; sedangkan energi celah pita nanopartikel Cu_2O sebesar 2,2 eV. Ketika ZnO sebagai semikonduktor tipe-n dan Cu_2O sebagai semikonduktor tipe-p membentuk *heterojunction*, terdapat perbedaan konsentrasi elektron/*hole* yang jelas pada masing-masing pita bahan semikonduktor. Untuk mencapai keadaan setimbang, elektron akan berpindah dari Cu_2O ke ZnO dan *hole* akan bergerak dengan arah yang berlawanan (Kandjani dkk., 2015). Ketika nanokomposit diradiasi sinar *visible*, elektron yang berada pada pita valensi (VB) Cu_2O akan

terekstasi ke pita konduksi (CB) Cu_2O . Kemudian elektron tersebut berpindah ke CB ZnO sehingga terdapat banyak elektron pada CB ZnO . Hal ini menimbulkan reaksi redoks yang lebih efisien dan terbentuk banyak radikal oksigen ($\bullet\text{O}\cdot$). Hal yang sama terjadi pada VB ZnO . Apabila material dikenai energi foton maka terbentuk pasangan elektron/*hole*. Selanjutnya *hole* berpindah dari VB ZnO ke VB Cu_2O sehingga terdapat banyak *hole* pada VB Cu_2O . Hal ini menyebabkan reaksi antara *hole* dengan air membentuk radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$). Semakin banyak $\bullet\text{O}\cdot$ dan $\bullet\text{OH}$ maka akan semakin banyak polutan yang dapat terdekomposisi (Wang dkk., 2018). Mekanisme komposit biner $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ dalam mendegradasi polutan organik dapat ditulis sebagai Persamaan 2.11 – 2.16 (Wang dkk., 2018).





Gambar 2.9 Mekanisme fotokatalitik komposit terner Cu₂O/ZnO-PANI (a) *heterojunction type-II* dan (b) *Z-scheme* di bawah cahaya tampak (Mohammed dkk., 2021)

Selain dikompositkan secara biner, fotokatalis dapat dikompositkan secara terner. Gambar 2.9 menunjukkan mekanisme fotokatalisis yang terjadi pada komposit terner $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi. Gambar 2.9(a) menyajikan mekanisme transpor elektron/*hole* secara *heterojunction* tipe II. Elektron pada keadalan *Lowest Unoccupied Molecular Orbital* (LUMO) PANi dan CB Cu_2O akan pindah ke tingkat energi yang lebih rendah yaitu ke CB ZnO . Adapun *hole* pada VB ZnO akan pindah ke keadalan *Highest Occupied Molecular Orbital* (HOMO) PANi dan VB Cu_2O . Namun, potensial redoks dari pasangan $\text{O}_2/\bullet\text{O}_2^-$ (-0,33 eV) lebih negatif daripada potensial CB ZnO (-0,10 eV). Demikian pula, potensial redoks pasangan $\text{H}_2\text{O}/\bullet\text{OH}$ (+2,72 eV) lebih positif daripada potensial HOMO PANi (+0,80 eV) dan VB Cu_2O (+0,76 eV). Hal ini mengakibatkan reaksi redoks sulit terjadi dan pembentukan $\bullet\text{O}_2^-$ dan $\bullet\text{OH}$ dari O_2 dan H_2O . Dengan demikian jalur transfer elektron/*hole* fotokatalis tidak dapat mengikuti *heterojunction* tipe II sebagaimana Gambar 2.9(a).

Gambar 2.9(b) menjelaskan mekanisme transpor elektron/*hole* secara *Z-scheme*. Ketika sinar *visible* diradiasi pada fotokatalis, baik Cu_2O , ZnO , dan PANi akan menyerap energi foton untuk menghasilkan

elektron dan *hole*. Elektron yang dihasilkan pada ZnO memiliki potensi reduksi yang lebih kecil daripada elektron pada Cu₂O dan PANi, sehingga akan dengan cepat bereaksi dengan *hole* pada HOMO PANi dan VB Cu₂O. Akibatnya transport elektron dari CB ZnO melewati HOMO PANi dan VB Cu₂O kemudian dilanjutkan ke LUMO PANi dan CB Cu₂O. Elektron dengan potensial reduksi yang jauh lebih tinggi pada LUMO PANi (-1,9 eV) dan CB Cu₂O (-1,4 eV), serta *hole* dengan potensial oksidasi yang lebih tinggi pada VB ZnO dapat mempertahankan potensial redoks untuk waktu yang sangat lama sehingga mekanisme transpor elektron/*hole* secara *Z-scheme* lebih mudah terjadi (Mohammed dkk., 2021).

7. Fotodegradasi

Fotodegradasi adalah proses penguraian suatu zat atau senyawa dengan bantuan foton (Saba, 2019). Prinsip kerja fotodegradasi adalah ketika fotokatalis diradiasi maka akan terbentuk pasangan elektron/*hole* yang kemudian mengalami reaksi redoks dengan air dan oksigen membentuk radikal bebas yang dapat bereaksi dengan senyawa yang akan didegradasi (Saba, 2019). Efisiensi fotodegradasi (%) terhadap waktu penyinaran dapat diperkirakan dari pengukuran

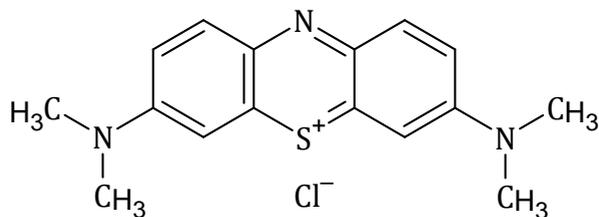
spektrum absorbansi UV-Vis menurut Persamaan 2.17 (Widihati dkk., 2011).

$$\text{Fotodegradasi (\%)} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% \quad (2.17)$$

C_0 adalah konsentrasi awal zat warna (sebelum radiasi) dan C_t adalah konsentrasi setelah waktu penyinaran tertentu.

8. Metilen Biru

Metilen biru (MB) dikenal juga sebagai *methylthioninium chloride* dengan rumus molekul $C_{16}H_{18}N_3SCl$. Pada suhu kamar, MB berupa serbuk berwarna hijau tua yang memberikan warna biru bila dilarutkan dalam air (Sowmyashree dkk., 2021). MB memiliki massa molekul relatif 319,85 gram/mol dalam bentuk anhidratnya. Titik lelehnya antara 100 sampai 110 °C dan memiliki massa jenis 1,0 g/mL pada 20 °C. Kelarutannya adalah 43,6 g/L dalam air. MB juga dapat larut dalam etanol (Mohammed dkk., 2014). Gambar 2.10 menunjukkan struktur kimia MB.



Gambar 2.10 Struktur kimia MB

MB adalah salah satu pewarna dasar/kationik yang paling dikenal dan telah banyak digunakan dalam industri wol, sutra, kapas, dan farmasi (Lv dkk., 2019). Penggunaan lain MB yaitu sebagai indikator redoks dalam kimia analitik dan sebuah generator peroksida. Pewarna ini juga digunakan pada kertas, pakaian, dan rambut.

Produksi dan penggunaan MB dapat mengakibatkan polusi pada badan air. MB memiliki serapan UV maksimal pada 663 nm. MB sukar terurai langsung oleh sinar matahari (Masoumbeigi & Rezaee, 2015). MB ada dalam bentuk ionik pada nilai pH 5 hingga 9. Nama IUPAC-nya adalah *3,7-bis(Dimethylamino)-phenothiazin-5-ium chloride* (Mohammed dkk., 2014).

Senyawa MB tidak memiliki gugus fungsi yang terhidrolisis dalam kondisi lingkungan (Du dkk., 2011). Adanya beberapa cincin aromatik dalam struktur molekulnya menyebabkan pewarna ini sangat stabil dan biodegradasinya sangat sulit. MB telah diklasifikasikan memiliki sifat "tahan luntur" yang baik terhadap cahaya yang berarti tahan terhadap kerusakan oleh sinar matahari (Mohammed dkk., 2014).

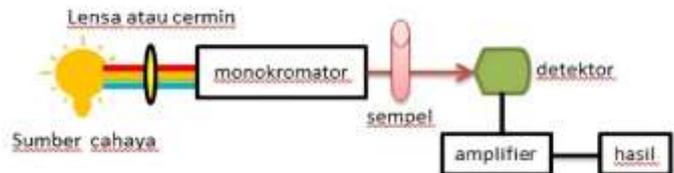
Cemaran MB dapat menimbulkan risiko serius bagi organisme hidup (Raveendra dkk., 2014). MB dapat menyebabkan beberapa masalah kesehatan, seperti gangguan permanen pada mata manusia dan hewan, sulit bernapas jika terhirup, menimbulkan sensasi terbakar pada mulut, menyebabkan mual, dan muntah (Gajbhiye, 2012; Mojsov dkk., 2016). Pewarna ini bersifat karsinogenik, mutagenik, dan toksik bagi kehidupan (Tavakoli-Azar dkk., 2020).

9. Teknik Karakterisasi

a. Spektrofotometri *Ultra Violet-Visible* (UV-Vis)

Spektrofotometri UV-Vis adalah metode analisis yang melibatkan sumber radiasi elektromagnetik ultra violet dekat (200 nm-380 nm) dan sinar *visible* (380 nm-780 nm). Pada spektrofotometer terdapat dua bagian penting yaitu spektrometer dan fotometer. Spektrometer merupakan alat untuk menghasilkan sinar dari spektrum dengan panjang gelombang tertentu, sedangkan fotometer merupakan alat untuk mengukur intensitas cahaya yang ditransmisikan atau diabsorpsi. Analisis spektrofotometri UV-Vis digunakan untuk mengetahui nilai absorban suatu sampel larutan pada panjang gelombang tertentu.

Kemudian dari nilai absorban tersebut dapat dianalisis konsentrasi suatu zat dalam larutan (Adam dkk., 2020).



Gambar 2.11 Prinsip kerja spektrofotometer UV-Vis (Saba, 2019)

Pada Gambar 2.11 disajikan prinsip kerja spektrofotometer UV-Vis di mana terjadi interaksi antara energi berupa sinar monokromatis dari sumber sinar dengan sampel uji. Sumber lampu yang digunakan dalam spektrofotometer UV-Vis dibagi menjadi dua yaitu lampu tungsten (*wolfram*) digunakan untuk mengukur sampel pada daerah *visible* (350-2200 nm). Jenis lampu lainnya yaitu lampu deuterium digunakan pada panjang gelombang UV (200-380 nm) (Adam dkk., 2020).

Pada prinsip kerja spektrofotometer UV-Vis, sumber cahaya polikromatis dipancarkan ke prisma melalui celah. Prisma berperan untuk memecah cahaya polikromatis menjadi cahaya monokromatis. Cahaya akan melewati celah optik yang bergerak secara otomatis berdasarkan

panjang gelombang yang diinginkan. Kemudian sinar monokromatis yang telah melewati prisma berinteraksi dengan sampel dan akhirnya masuk ke detektor yang berfungsi untuk menyerap sinar dan mengubahnya menjadi sinyal elektrik. Kemudian sinyal diteruskan ke rekorder untuk dibaca dan diubah menjadi % transmisi atau absorbansi. Kemudian % transmisi diteruskan dan diterjemahkan menghasilkan absorban dan panjang gelombang tertentu yang dapat dianalisis (Adam dkk., 2020). Absorbansi sampel (A) dihitung dari Persamaan 2.18.

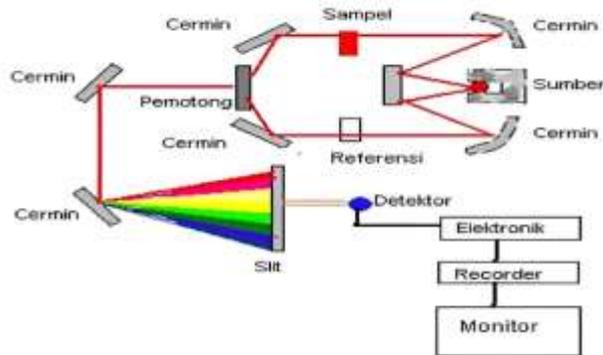
$$A = \log \left[\frac{I_0}{I} \right] \quad (2.18)$$

I adalah intensitas cahaya yang ditransmisikan melalui sampel dan I_0 adalah intensitas cahaya yang datang.

b. Spektrofotometri Fourier Transform Infra Red (FTIR)

Spektrofotometri FTIR adalah metode analisis untuk mendeteksi gugus fungsi, mengidentifikasi suatu senyawa, dan menganalisis campuran sampel (Saba, 2019). Hampir semua senyawa kimia dapat menunjukkan karakteristiknya di daerah spektrum IR. Hal ini menjadikan FTIR dapat

digunakan untuk menganalisis senyawa baik secara kualitatif maupun kuantitatif (Simonescu, 2012).

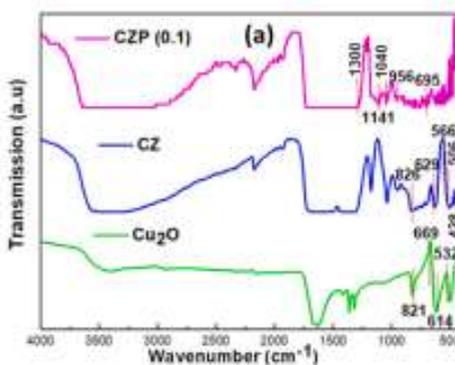


Gambar 2.12 Prinsip kerja FTIR (Gunawan, 2012)

Gambar 2.12 menunjukkan prinsip kerja spektrofotometer FTIR. Prinsip kerja FTIR dimulai dari sumber IR yang dihasilkan akibat pemanasan pada temperatur tinggi oleh listrik terhadap suatu bahan yang berada pada sumber energi tersebut. Kemudian radiasi IR yang dihasilkan dipecah oleh *beam splitter* menjadi dua bagian sinar radiasi. Sebagian menuju ke referensi (tempat pembandingan) dan sebagian lagi menuju tempat sampel. Selanjutnya kedua berkas tersebut masuk menuju pemotong sehingga keluar *output* sinar yang diteruskan ke monokromator. Berikutnya,

sinar dipecah menurut panjang gelombangnya dan difokuskan untuk keluar melalui celah menuju detektor. Detektor mengubah sinar tersebut menjadi sinar elektrik dan diinterpretasikan dalam bentuk spektrum IR oleh bantuan perangkat lunak yang ada di dalam komputer (Sari dkk., 2018).

Bentuk spektrum inframerah Cu_2O , $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$, $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANi}(0,1)$ dapat dilihat dari salah satu penelitian Mohammed (2021) yang tercantum pada Gambar 2.13. Spektra inframerah menyajikan informasi mengenai gugus fungsi pada sampel yang dipelajari.



Gambar 2.13 Spektrum FTIR Cu_2O , $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$, $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANi}(0,1)$ (Mohammed, 2021)

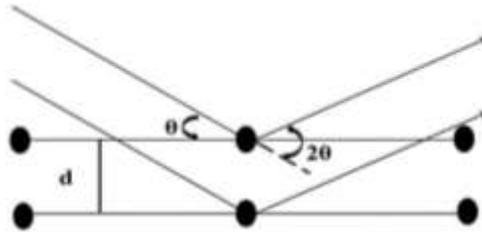
Berdasarkan Gambar 2.13 tersebut, adanya Cu_2O ditandai dengan puncak yang muncul pada bilangan

gelombang 540; 624; 676; dan 827 cm^{-1} semuanya berkorelasi dengan ikatan Cu–O. Pita pada 3400 cm^{-1} dan 1642 cm^{-1} dikaitkan dengan getaran OH sedangkan pita pada 2924 cm^{-1} dikaitkan dengan peregangan C–H. Sementara itu, pita pada 1316 dan 1369 cm^{-1} dikaitkan dengan peregangan C–O. Pada spektrum $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ muncul pita pada 449 cm^{-1} disebabkan oleh ikatan Zn–O, sedangkan pita pada 510 cm^{-1} dikaitkan dengan defek oksigen pada ZnO. Pita pada 563; 629; 664 dan 825 cm^{-1} dikaitkan dengan vibrasi ulur Cu–O dalam Cu_2O . Begitu pula pada spektrum $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi (0,1), puncak yang terkait dengan PANi dapat dilihat pada 1300; 1141; 1040; 956 dan 695 cm^{-1} . Puncak pada 1300 dan 1141 cm^{-1} terkait dengan mode C–H dan C=C dari gugus benzenoid PANI, sedangkan puncak pada 1040 cm^{-1} dikaitkan dengan gugus kuinonoid PANi, dan puncak pada 956 dan 695 cm^{-1} dikaitkan dengan ikatan C–H dan C–C dari gugus benzenoid.

c. X-Rays Diffractometry (XRD)

Alat difraksi sinar X (XRD) adalah alat yang digunakan untuk mengidentifikasi kristalinitas suatu padatan. Apabila kisi kristal dikenai radiasi sinar X, maka berkas sinar-x monokromatik

dengan sudut datang (θ) dan panjang gelombang (λ) menjadi terdifraksi ke arah tertentu sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Prinsip kerja XRD (Adam dkk., 2020)

Prinsip kerja alat ini adalah ketika *X-Ray tube* dan sensor bergerak dengan sudut tertentu serta saling mendekat sambil mendeteksi adanya hamburan sinar X atau tidak. Pada saat terjadi interferensi destruktif (dua gelombang berlawanan fase) maka sensor tidak akan mendeteksi adanya intensitas, sedangkan pada saat terjadi interferensi konstruktif (dua gelombang sefase) maka sensor akan mendeteksi adanya intensitas sinar X sehingga didapat grafik data yang menunjukkan puncak intensitas. Pengukuran tersebut dilakukan terus-menerus hingga batas sudut yang telah ditentukan sehingga didapat grafik antara sudut terhadap intensitas. Hukum Bragg menyatakan bahwa suatu kristal memiliki susunan atom yang

tersusun secara teratur dan berulang dan juga memiliki jarak antar atom yang ordenya sama dengan panjang gelombang sinar-X. Akibatnya, apabila seberkas sinar-X ditembakkan pada suatu material kristalin maka sinar tersebut akan menghasilkan pola difraksi khas sebagaimana yang ditunjukkan pada Persamaan 2.19 (Will, 2006).

$$n\lambda = 2d\sin(\theta) \quad (2.19)$$

n adalah orde difraksi, d adalah jarak antara bidang difraksi, λ adalah panjang gelombang sinar X, dan θ adalah sudut difraksi Bragg. Dengan demikian, kerapatan elektron dan jarak antara atom tetangga dapat ditentukan. Adapun Persamaan Scherrer (Persamaan 2.20) digunakan untuk menghitung ukuran kristal (Monshi dkk., 2012).

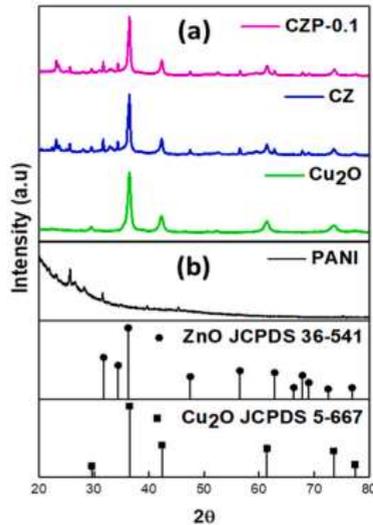
$$D = \frac{k\lambda}{\beta_{hkl}\cos\theta} \quad (2.20)$$

D adalah ukuran kristal nanopartikel, λ adalah panjang gelombang sinar X, θ adalah sudut difraksi Bragg, β adalah lebar penuh pada setengah maksimum (FWHM) dari puncak tertinggi, dan k adalah konstanta Scherrer = 0,9. Selain itu, untuk mengetahui derajat kristalinitas dapat diperoleh melalui Persamaan 2.21 (Tarani dkk., 2023).

$$X_c = \frac{A_{cr}}{A_{cr} + A_{am}} \times 100\% \quad (2.21)$$

X_c adalah derajat kristalinitas, A_{cr} adalah area puncak kristal, dan A_{am} adalah area puncak amorf.

Bentuk pola difraksi Cu_2O , $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$, $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi (0,1) dapat dilihat dari salah satu penelitian yaitu pada penelitian Mohammed (2021) yang dapat dilihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Pola difraksi XRD Cu_2O , $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$, $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi (0,1) (Mohammed dkk., 2021)

Puncak pada 2θ dan bidang kristal = $29,4^\circ$ (110), $36,3^\circ$ (101), $42,1^\circ$ (200), $52,2^\circ$ (211), $61,1^\circ$ (220), $73,1^\circ$ (311), dan $77,0^\circ$ (222) yang dapat diindeks ke JCPDS No. 5-667, semuanya bertepatan dengan

struktur kubik Cu_2O . Hal ini menegaskan pembentukan Cu_2O murni. Kristalinitas Cu_2O dibuktikan dengan puncak difraksi yang tajam. Demikian pula, dalam pola XRD $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$, puncak pada 2θ dan bidang kristal = $34,66^\circ$ (100), $34,34^\circ$ (002), $36,47^\circ$ (101), $47,44^\circ$ (102), $56,58^\circ$ (110), $62,75^\circ$ (103), dan $67,84^\circ$ (112) dapat diindeks ke JCPDS No. 36-1451, semuanya berkorelasi dengan bidang heksagonal ZnO . Demikian pula puncak pada 2θ dan bidang kristal = $29,4^\circ$ (110), $36,3^\circ$ (101), $42,1^\circ$ (200), $52,2^\circ$ (211), $61,1^\circ$ (220), $73,1^\circ$ (311), dan $77,0^\circ$ (222) menegaskan adanya Cu_2O , maka menunjukkan bahwa ZnO berhasil dikompositkan dengan Cu_2O dalam komposit. Untuk PANi, adanya puncak difraksi amorf yang dihasilkan dari rantai polianilin muncul pada 2θ $25,24^\circ$ menandakan pembentukannya, namun pada pola XRD $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi (0,1), puncak yang ada hampir semuanya dikaitkan dengan Cu_2O dan ZnO . Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa jumlah PANi terlalu rendah dan puncak difraksinya jauh lebih lemah daripada kristal Cu_2O dan ZnO karena sifat amorf PANi.

d. Spektroskopi *UV-Vis Diffuse Reflectance (DR-UV)*

Spektroskopi DR-UV digunakan untuk mengetahui energi celah pita (*band gap*) suatu material. Data yang diperoleh adalah nilai % reflektansi sampel. Dari data tersebut dapat dilakukan plot data dengan mengacu persamaan Kubelka-Munk sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan 2.21.

$$F(R) = \frac{K}{S} = \frac{(1 - R)^2}{2R} \quad (2.22)$$

$F(R)$ adalah faktor Kubelka-Munk, K adalah koefisien absorbansi, S adalah koefisien scattering, dan R adalah nilai reflektansi.

Energi celah pita diukur berdasarkan pada intensitas sinar UV dan *visible* yang direfleksikan oleh suatu material uji. Prinsip kerja instrumen DR-UV didasarkan pada lapisan material yang diradiasi oleh beberapa foton dan kemudian material tersebut menyerap atau menghamburkan foton (Saba, 2019). Energi celah pita diperoleh dari grafik hubungan antara $h\nu$ (eV) terhadap $(F(R'_{\infty})h\nu)^{1/2}$. Nilai $h\nu$ (eV) ditentukan oleh Persamaan 2.22.

$$E_g = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.23)$$

E_g adalah energi celah pita (eV), h adalah tetapan Planck ($6,624 \times 10^{-34}$ Js), c adalah kecepatan cahaya di udara ($2,998 \times 10^8$ m/s), dan λ adalah panjang gelombang (nm). Energi celah pita semikonduktor adalah besarnya $h\nu$ pada saat $(F(R')h\nu)^2=0$ yang diperoleh dari persamaan regresi linier kurva tersebut (Sanjaya dkk., 2017).

B. Kajian Penelitian yang Relevan

Penggunaan fotokatalis untuk mengurangi konsentrasi zat warna pada larutan berair telah banyak dikembangkan di dunia penelitian. Semikonduktor Cu_2O dapat digunakan sebagai fotokatalis. Beberapa peneliti telah melakukan sintesis material Cu_2O dan mengaplikasikannya sebagai fotokatalis untuk mendegradasi zat warna. Muthukumaran (2019) melakukan penelitian tentang sintesis Cu_2O sebagai fotokatalis MB. Tujuan dari penelitian tersebut adalah untuk mengetahui efektivitas fotokatalis Cu_2O dalam mendegradasi zat warna MB di bawah sinar UV. Penelitian dilakukan dengan konsentrasi awal MB sebesar 10^{-5} M dalam larutan berair, massa fotokatalis Cu_2O yang digunakan sebesar 20 mg, dan fotodegradasi dilakukan

pada λ maks = 663 nm. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa nanopartikel Cu_2O dapat mendegradasi 91,76 % zat warna MB dengan radiasi sinar UV selama 60 menit. Pada tahun yang sama, Mrunal (2019) melakukan penelitian serupa. Pada penelitiannya digunakan 1000 mL MB dengan konsentrasi awal $1,56 \times 10^{-5}$ M, 100 mg fotokatalis Cu_2O , dan fotodegradasi dilakukan pada λ maks = 664 nm. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa nanopartikel Cu_2O dapat mendegradasi 97 % MB selama 120 menit di bawah sinar UV. Penggunaan Cu_2O sebagai fotokatalis memiliki kekurangan yaitu dapat mengalami fotokorosi dan mudah mengalami rekombinasi. Hal ini menjadikan umur pasangan elektron/*hole* sangat pendek, sehingga efek fotokatalitiknya kurang efektif (Putra, 2019). Untuk menutupi kekurangan tersebut dapat dilakukan penggabungan dua material menjadi komposit biner.

Archela dkk. (2019) melakukan penelitian tentang penggunaan komposit Cu_2O -ZnO untuk mendegradasi zat warna MB. Tujuan dari penelitian tersebut adalah untuk membandingkan aktivitas fotokatalitik Cu_2O , ZnO, dan Cu_2O -ZnO untuk mendegradasi zat warna MB. Hasil sintesis ketiga material tersebut menunjukkan bahwa penambahan Cu_2O pada ZnO dapat memperkecil energi

celah pita fotokatalis menjadi 3,2 eV. Adapun energi celah pita dari Cu_2O , ZnO , dan $\text{Cu}_2\text{O-ZnO}$ berturut-turut adalah 2,3 eV; 3,3 eV; dan 3,2 eV. Hasil uji fotokatalitik menunjukkan bahwa $\text{Cu}_2\text{O-ZnO}$ dapat mendegradasi 91 % MB dengan radiasi sinar *visible* selama 90 menit, sedangkan pada kondisi yang sama Cu_2O dan ZnO dapat mendegradasi 50 % dan 43 % MB. Satu tahun setelahnya, Abdolhoseinzadeh dan Sheibani (2020) melakukan penelitian tentang sintesis komposit $\text{Cu}_2\text{O-ZnO}$ sebagai fotokatalis untuk mendegradasi MB. Hasil sintesis komposit $\text{Cu}_2\text{O-ZnO}$ menunjukkan bahwa penggabungan dua material tersebut mengakibatkan nilai energi celah pita menjadi kecil (1,9 eV). Hal ini mengakibatkan fotokatalis dapat menyerap cahaya pada daerah spektrum *visible* dan memungkinkannya dalam penyerapan foton yang lebih banyak untuk eksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi. Untuk mengetahui % degradasi zat warna MB, peneliti menggunakan 100 mL MB dengan konsentrasi awalnya sebesar 2 mg/L dan massa fotokatalis $\text{Cu}_2\text{O-ZnO}$ yang digunakan sebanyak 50 mg. Hasil uji fotodegradasi menunjukkan bahwa komposit $\text{Cu}_2\text{O-ZnO}$ dapat mendegradasi 98 % di bawah radiasi sinar *visible* selama 240 menit. Berdasarkan dua penelitian tersebut, maka penggunaan ZnO dapat

berperan dalam menghambat rekombinasi pasangan elektron/*hole* pada Cu_2O selama fotodegradasi. Namun, komposit biner juga memiliki kelemahan yaitu tidak dapat digunakan kembali berkali-kali dan potensi eksitasi elektron/*hole* cenderung berkurang secara signifikan (Meng dkk., 2019). Dengan demikian, dapat dilakukan sintesis komposit terner untuk meningkatkan aktivitas fotokatalitik dan pengaplikasiannya dalam jangka waktu lama (Meng dkk., 2019).

Mohammed (2021) melakukan penelitian tentang sintesis nanokomposit terner $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi dengan metode solvotermal dan polimer *in situ* sebagai fotokatalis zat warna *congo red*. Tujuan penelitian tersebut adalah untuk membandingkan material tunggal Cu_2O , komposit biner $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$, dan komposit terner $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi untuk mendegradasi zat warna *congo red*. Hasil sintesis menunjukkan bahwa luas permukaan komposit terner $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi menjadi lebih besar ($45,32 \text{ m}^2/\text{g}$) jika dibandingkan dengan Cu_2O ($8,82 \text{ m}^2/\text{g}$) dan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ ($35,66 \text{ m}^2/\text{g}$). Hasil uji aktivitas fotokatalis sebagai fotodegradasi *congo red* menunjukkan bahwa Cu_2O , $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$, dan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi secara berturut-turut dapat mendegradasi 81 %, 94 %, dan 100 % *congo red* dengan waktu kontak 30 menit. Uji *reusability* juga

dilakukan pada komposit terner $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi. Hasilnya adalah komposit masih aktif dan mempertahankan lebih dari 92 % efisiensi degradasi awal setelah lima kali siklus degradasi.

Uji fotokatalis $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi hingga saat ini baru dilakukan terhadap zat warna *congo red* sebagaimana penelitian Mohammed (2021). Pada penelitian ini, akan dilakukan sintesis, karakterisasi, dan uji aktivitas fotokatalis $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi terhadap zat warna MB dengan metode sintesis yang berbeda. Peneliti akan melakukan sintesis dengan metode pencampuran sol dan polimer *in situ*.

C. Hipotesis Penelitian

Cu_2O merupakan bahan semikonduktor tipe-p yang dapat digunakan dalam fotodegradasi zat warna. Namun bahan ini memiliki kelemahan dalam aktivitas fotokatalitiknya yaitu dapat mengalami fotokorosi dan mudah mengalami rekombinasi. Kelemahan tersebut mengakibatkan aktivitas fotokatalis kurang efektif dalam mendegradasi zat warna. Untuk menutupi kelemahan tersebut maka dalam penelitian ini dibuat komposit terner $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi. $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi dipandang mampu meningkatkan efek fotokatalitik Cu_2O karena perubahan

stabilitas material. Dengan demikian pada penelitian ini, $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi disintesis dengan harapan mampu mendegradasi MB lebih baik dibanding Cu_2O dan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ di bawah radiasi sinar *visible* serta mampu mempertahankan efisiensi degradasi setelah melalui beberapa kali siklus degradasi.

BAB III

METODE PENELITIAN

A. Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Kimia UIN Walisongo Semarang. Karakterisasi FTIR dilakukan di Laboratorium Terpadu Universitas Diponegoro, karakterisasi XRD dilakukan di Laboratorium Terpadu Universitas Islam Indonesia, dan karakterisasi DR-UV dilakukan di Laboratorium Kimia FMIPA Universitas Indonesia. Waktu penelitian dilakukan pada bulan Januari - Mei 2023.

B. Alat dan Bahan Penelitian

1. Alat-alat Penelitian

Alat-alat yang akan digunakan pada kegiatan penelitian ini adalah spektrofotometer UV-Vis (Thermo Scientific Orion AquaMate 8000), *Fourier Transform Infra Red* (FTIR, Perkin-Elmer UATR Spectrum Two), *X-Rays Diffractometry* (XRD, Bruker D2 Phaser), dan *UV-Visible Diffuse Reflectance* (DR-UV, Shimadzu UV-2450), Centrifuge (Gammy PLC-05), kuvet, seperangkat alat gelas, spatula, *water bath*, *magnetic stirrer*, neraca analitik, oven, lampu *visible* (Ecolink LED Buld 12W), dan kertas saring.

2. Bahan-bahan Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (Tembaga(II) Asetat Monohidrat, Merck, p.a), $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ (glukosa, Merck, p.a), $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ (Amonium Peroksidisulfat/APS, Merck, p.a), NaOH (Natrium Hidroksida, Merck, p.a), $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Seng Asetat Dihidrat, Merck, p.a), H_2O (akuades), HCl (Asam Klorida, Merck, p.a), $\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$ (Anilin, Merck, p.a), dan $\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{N}_3\text{SCI}$ (metilen biru, Merck).

C. Metode Penelitian

1. Sintesis Cu_2O Murni

Sintesis Cu_2O dalam penelitian ini mengacu pada prosedur yang telah dilakukan oleh Kumar dkk. (2020). Sebanyak 14,974 gram $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ dilarutkan dalam 50 mL akuades dan diaduk menggunakan *stirrer* selama 15 menit dengan kecepatan 750 rpm sehingga diperoleh larutan prekursor dengan konsentrasi 1,5 M. Dalam gelas beaker yang berbeda, sebanyak 27,03 gram glukosa dilarutkan ke dalam 50 mL akuades dan diaduk menggunakan *stirrer* selama 15 menit dengan kecepatan 750 rpm. Kemudian, dalam gelas beaker

berbeda pula, sebanyak 12 gram NaOH dilarutkan ke dalam 50 mL akuades menggunakan batang pengaduk. Selanjutnya, larutan glukosa ditambahkan sedikit demi sedikit ke dalam larutan tembaga(II) asetat hingga warna berubah menjadi hijau kebiruan. Campuran ini selanjutnya ditambahkan dengan larutan NaOH sambil diaduk menggunakan *stirrer*. Larutan kemudian diaduk selama 30 menit pada suhu 60 °C sampai terjadi perubahan warna menjadi warna merah bata dan terbentuk endapan Cu_2O . Tahapan sintesis dilakukan sebanyak tiga kali. Semua larutan hasil sintesis dijadikan dalam satu gelas beaker dan diaduk. Larutan diambil 1/3 bagian untuk dibiarkan selama 12 jam agar mengendap. Setelah itu, endapan disaring dan dicuci dua kali dengan etanol dan dua kali dengan akuades. Selanjutnya endapan dikeringkan 12 jam pada suhu 60°C. Sisa 2/3 bagian larutan yang lain digunakan sebagai sol dalam pembuatan komposit $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$.

2. Sintesis Komposit Biner $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$

Sintesis ZnO dalam penelitian ini mengacu pada prosedur yang telah dilakukan oleh Ungula & Dejene (2016). Mula-mula 16,467 gram serbuk $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ dicampur dengan 50 mL akuades dan diaduk menggunakan *stirrer* dengan kecepatan

750 rpm selama 20 menit pada suhu 35°C. Dalam gelas beaker yang berbeda; sebanyak 6 gram NaOH dicampur dengan 100 mL akuades dan diaduk dengan *stirrer* dengan kecepatan 750 rpm selama 20 menit pada suhu 35°C. Larutan NaOH dicampur dengan larutan $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ dan diaduk kembali selama sekitar 120 menit hingga terbentuk sol ZnO. Tahapan sintesis dilakukan sebanyak dua kali. Sol ZnO dicampur sedikit demi sedikit dengan sol Cu_2O sambil terus diaduk selama 150 menit pada suhu kamar untuk menghasilkan endapan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$. Endapan didiamkan selama 12 jam, lalu disaring dan dicuci dengan akuades. Endapan kemudian dikeringkan 12 jam pada suhu 60°C.

3. Sintesis Komposit Terner $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi

Pembuatan Polianilin dilakukan dengan monomer anilin sebagai bahan utamanya. Anilin (0,10; 0,05; dan 0,03 mL) dan 10 mL HCl 0,1 M masing-masing diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 30 menit sehingga terbentuk anilin hidroklorida. Larutan ini kemudian disebut sebagai larutan monomer. Kemudian, 1 gram komposit $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ yang telah disiapkan ditambahkan ke dalam larutan monomer. Pada bagian terpisah; 0,2852 gram amonium

peroksidisulfat (APS) dilarutkan ke dalam 25 mL akuades dan diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 30 menit hingga warna menjadi bening. Larutan ini disebut sebagai larutan inisiator. Kemudian dalam larutan monomer dan komposit tersebut ditetesi sedikit demi sedikit larutan inisiator sambil diaduk menggunakan *magnetic stirrer* pada suhu 0-5 °C selama 4-5 jam agar polimerisasi sempurna. Endapan Cu₂O/ZnO-PANi disaring dan dicuci menggunakan akuades dan etanol hingga filtrat pencuciannya menjadi bening. Selanjutnya, endapan dikeringkan di suhu 60°C selama 12 jam. Dalam tahap ini diperoleh Cu₂O/ZnO-PANi yang berupa serbuk berwarna coklat. Cu₂O/ZnO-PANi dinotasikan dengan Cu₂O/ZnO-PANi(0,10); Cu₂O/ZnO-PANi(0,05); dan Cu₂O/ZnO-PANi(0,03) yang menunjukkan jumlah PANi dalam sampel.

4. Karakterisasi

Karakteristik material Cu₂O, Cu₂O/ZnO, dan Cu₂O/ZnO-PANi yang diperoleh ditentukan berdasarkan analisis FTIR, XRD serta DR-UV dan sisanya diaplikasikan sebagai fotokatalis. Analisis menggunakan FTIR digunakan untuk mengetahui gugus fungsi dari sampel yang diuji sehingga dapat

diketahui senyawa tersebut merupakan senyawa yang diinginkan. Adapun karakterisasi XRD untuk mengetahui kristalinitas sampel. Analisis DR-UV digunakan untuk mengetahui energi celah pita dari sampel.

5. Penentuan Panjang Gelombang Metilen Biru

Penentuan panjang gelombang maksimum metilen biru dilakukan mengacu pada metode yang dilakukan oleh Widihati (2011). Panjang gelombang maksimum diukur menggunakan larutan dengan konsentrasi 2 mg/L pada panjang gelombang 400-700 nm dengan spektrofotometer UV-Vis.

6. Pembuatan Kurva Standar Metilen Biru

Kurva standar MB dibuat dari data absorbansi larutan MB pada konsentrasi 0 ppm, 2 ppm, 4 ppm, 6 ppm, 8 ppm, dan 10 ppm yang diukur pada panjang gelombang maksimum MB. Selanjutnya, persamaan garis lurus dapat diperoleh seperti yang ditunjukkan oleh Persamaan 3.1.

$$y = mx + a \quad (3.1)$$

Keterangan:

y = absorbansi

m = slope atau kemiringan dari kurva standar

x = konsentrasi

a = intersep atau perpotongan terhadap sumbu y (Andriana, 2016).

7. Uji Aktivitas Fotokatalis

Aktivitas fotokatalitik katalis pada degradasi MB dilakukan dengan langkah sebagai berikut: ke dalam lima buah gelas beker 250 mL ditambahkan 100 mL larutan MB (10 ppm) dan 100 mg fotokatalis Cu_2O , $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$, $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANi}$ (0,10), $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANi}$ (0,05), dan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANi}$ (0,03) yang telah diatur pH-nya pada pH 12. Pengaturan pH dilakukan dengan menambahkan larutan NaOH 3 M. Selanjutnya suspensi yang diperoleh diaduk dan diradiasi dengan lampu *visible* selama 120 menit. Setelah proses pengadukkan dan radiasi, pemisahan antara suspensi dan filtrat dilakukan melalui sentrifugasi pada kecepatan 3000 rpm selama 30 menit. Filtrat yang didapat dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum MB. Masing-masing uji fotodegradasi dilakukan sebanyak dua kali. Selanjutnya nilai % degradasi dihitung sesuai Persamaan 2.17 (Kumar dkk., 2020).

8. Uji Stabilitas Fotokatalis

Untuk menguji stabilitas fotokatalitik, fotokatalis $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANi}$ yang memiliki %

fotodegradasi tertinggi digunakan untuk tiga kali siklus degradasi. Fotokatalis disaring, dicuci, dan dikeringkan untuk digunakan kembali setelah setiap siklus. Filtrat yang didapat setelah tiga kali siklus fotodegradasi MB masing-masing dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum MB dan dihitung nilai persen degradasi sesuai Persamaan 2.17. Fotokatalis yang telah melewati tiga kali siklus tersebut dikarakterisasi kembali menggunakan XRD dan FTIR untuk mengetahui kristalinitasnya.

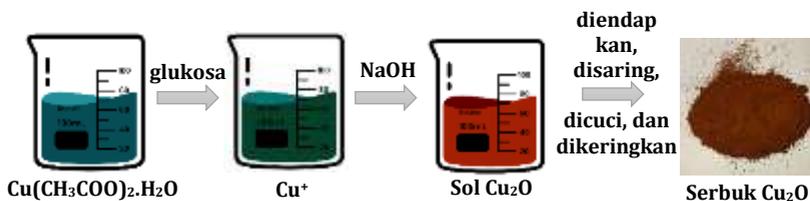
BAB IV

PEMBAHASAN

Sintesis Cu_2O , $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$, dan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANI}$ dilakukan pada penelitian ini untuk mengetahui aktivitas degradasinya terhadap zat warna MB. Hasil sintesis dikarakterisasi dengan instrumen FTIR, XRD, dan DR-UV untuk mengidentifikasi karakter dari material tersebut.

A. Sintesis Cu_2O murni

Sintesis sampel merupakan tahap awal dalam penelitian yang penting dilakukan karena dapat mempengaruhi kesuksesan hasil. $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ digunakan sebagai prekursor dalam pembuatan Cu_2O karena menurut Putri (2022) $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ketika didehidrasi akan terurai dan menghasilkan Cu_2O .

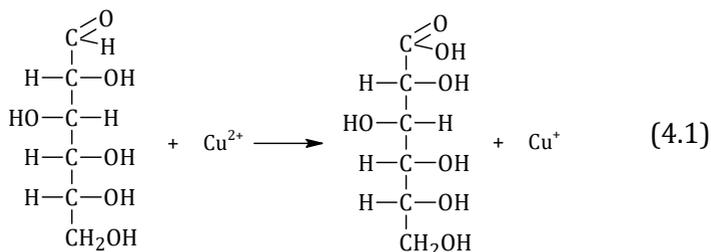


Gambar 4.1 Prosedur pembuatan material Cu_2O

Sintesis diawali dengan melarutkan masing-masing padatan $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, glukosa, dan NaOH ke dalam pelarut akuades. Partikel zat terlarut akan menyebar pada pelarutnya, sehingga zat akan lebih mudah direaksikan

dalam bentuk larutan daripada berupa padatan. Tahapan sintesis Cu_2O dapat dilihat seperti Gambar 4.1. Larutan glukosa ditambahkan ke dalam larutan tembaga(II) asetat. Larutan glukosa berfungsi sebagai zat pereduksi yang dapat mengubah Cu^{2+} menjadi Cu^+ karena glukosa mempunyai gugus gula pereduksi yaitu gugus aldehyd. Perubahan yang terjadi pada saat pencampuran antara tembaga(II) asetat dengan glukosa adalah warna menjadi lebih pekat dan agak kehijauan. Campuran ini selanjutnya ditambahkan dengan larutan NaOH . Larutan NaOH berfungsi sebagai pemberi suasana basa. Setelah dicampurkan dengan NaOH , larutan menjadi keruh dan berwarna merah bata. Setelah larutan didiamkan, endapan terlihat mengendap di permukaan larutan.

Menurut Anggraini dan Damayanti (2019) reaksi yang terjadi selama proses sintesis Cu_2O berlangsung ditunjukkan dalam Persamaan 4.1 dan 4.2.



Selanjutnya, ion Cu^+ akan mengendap sebagai Cu_2O dalam suasana basa seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 4.2.



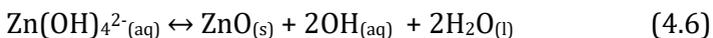
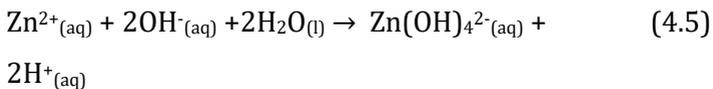
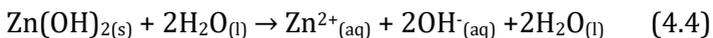
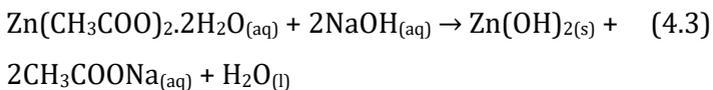
Terbentuknya endapan berwarna merah bata menjadi salah satu indikator bahwa Cu_2O berhasil disintesis (Su, 2018). Endapan disaring dengan tujuan agar filtrat dan residunya terpisah. Selanjutnya endapan dicuci dengan etanol dan akuades agar zat pengotor yang tidak diharapkan dapat larut dan terpisah dari endapan sehingga Cu_2O dengan kemurnian tinggi dapat diperoleh. Endapan yang telah dicuci kemudian dikeringkan pada suhu 60°C dalam oven dengan tujuan untuk menghilangkan kandungan air. Dalam penelitian ini digunakan suhu 60°C merujuk pada penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh Mohammed (2021). Penelitian tersebut berhasil melakukan sintesis material Cu_2O . Cu_2O yang terbentuk berupa serbuk berwarna merah bata. Untuk mengidentifikasi karakter Cu_2O , maka dilakukan proses karakterisasi menggunakan FTIR, XRD dan DR-UV.

B. Sintesis $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$

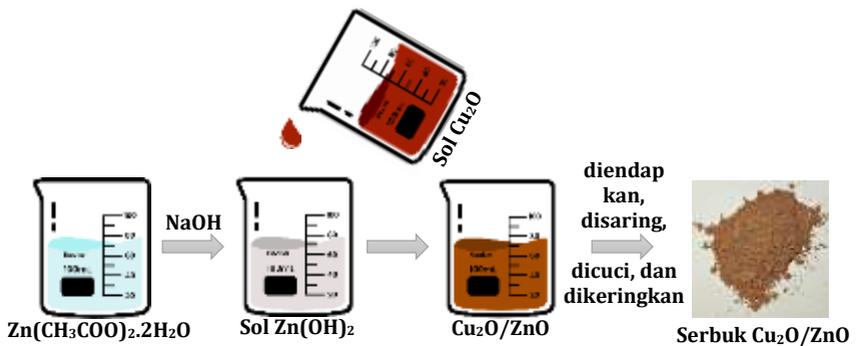
Sintesis material $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ melalui proses pencampuran sol. Proses ini dilakukan dengan

mencampurkan sol Cu_2O dengan sol ZnO untuk membentuk komposit $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$. Sol Cu_2O berasal dari tahap sintesis sebelumnya, sedangkan sol ZnO diperoleh dari mereaksikan $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ dengan NaOH . Senyawa $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ merupakan penyedia unsur Zn. Serbuk $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ yang dilarutkan dalam air menghasilkan larutan bening yang dapat diaduk sehingga diperoleh larutan homogen. Ketika $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ direaksikan dengan NaOH , akan dihasilkan senyawa $\text{Zn}(\text{OH})_2$ berupa larutan koloid berwarna putih (Novarini & Wahyudi, 2011). Fungsi NaOH dalam sintesis ZnO yaitu sebagai sumber ion OH^- . Setelah NaOH dicampurkan seluruhnya dengan $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, larutan diaduk kembali selama sekitar 120 menit dengan tujuan agar larutan homogen dan terbentuk sol ZnO .

Menurut Osman & Mustafa (2015), reaksi yang terjadi selama proses sintesis ZnO berlangsung adalah sebagaimana yang ditunjukkan pada Persamaan 4.3 - 4.6.



Rute pembentukan ZnO yaitu melalui larutan seng asetat yang berubah menjadi koloid $\text{Zn}(\text{OH})_2$ terlebih dahulu dalam larutan alkali (Persamaan 4.3). Selama proses, koloid $\text{Zn}(\text{OH})_2$ larut menjadi Zn^{2+} dan OH^- (Persamaan 4.4). Kelebihan ion OH^- dari molekul NaOH akan bereaksi dengan Zn^{2+} dan OH^- membentuk kompleks $\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}$ (Persamaan 4.5). Ketika larutan diaduk menggunakan *stirrer* dan sistem mencapai derajat kejenuhan ZnO, inti ZnO akan terbentuk (Persamaan 4.6) (Osman & Mustafa, 2015).



Gambar 4.2 Prosedur pembuatan material $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$

Tahapan sintesis komposit $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ dapat dilihat seperti Gambar 4.2. Pembentukan komposit $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ dilakukan dengan mencampurkan sol $\text{Zn}(\text{OH})_2$ sedikit demi sedikit ke dalam sol Cu_2O sambil terus diaduk yang bertujuan agar menghasilkan endapan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ homogen. Endapan didiamkan dan disaring dengan tujuan

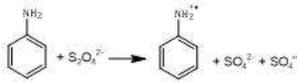
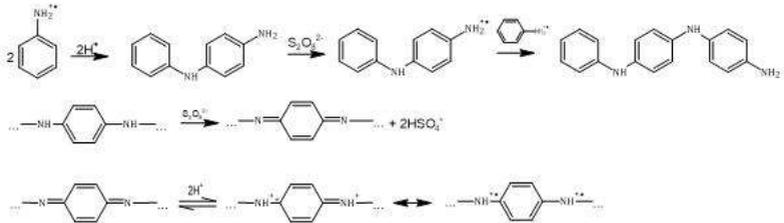
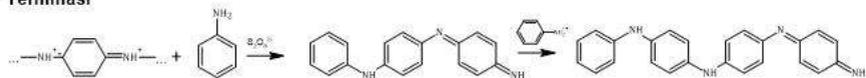
agar filtrat dan residunya terpisah. Kemudian endapan dicuci dengan akuades agar zat pengotor yang tidak diharapkan dapat terpisah dari endapan. Endapan kemudian dikeringkan pada suhu 60°C dengan tujuan untuk menghilangkan kandungan air.

Adapun Cu₂O/ZnO yang terbentuk dari penelitian yang dilakukan berupa serbuk dengan warna coklat. Penampakan Cu₂O setelah dikompositkan dengan ZnO menghasilkan serbuk yang berwarna lebih muda/pudar daripada Cu₂O sendiri. Untuk mengidentifikasi karakter Cu₂O/ZnO, maka dilakukan proses karakterisasi menggunakan FTIR, XRD dan DR-UV.

C. Sintesis Cu₂O/ZnO-PANi

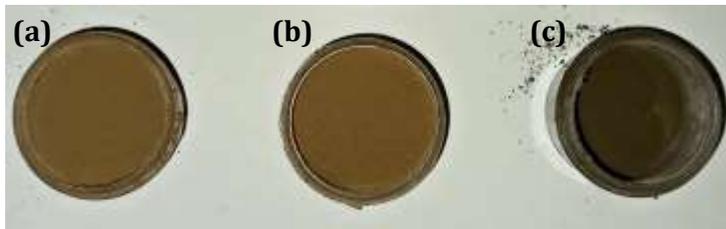
Sintesis komposit terner Cu₂O/ZnO-PANi dilakukan secara polimerisasi *in situ* dengan menggunakan monomer anilin (C₆H₅NH₂) dan oksidator amonium persulfat ((NH₄)₂S₂O₈) dengan tambahan komposit Cu₂O/ZnO sebagai logam oksida. Adapun polimerisasi *in situ* dipilih karena metode ini memiliki kelebihan yaitu proses antarmuka yang baik antara *filler* dan polimer, proses sintesis yang mudah dilakukan dan didukung dengan kemudahan dalam ketersediaan alat dan bahannya serta biaya sintesis yang relatif murah (Andari dkk., 2022).

Sintesis PANi pada penelitian ini dilakukan pada suhu 0-5°C karena menurut penelitian yang dilakukan oleh Juliana (2017), PANi yang disintesis pada suhu rendah (0°C) memiliki luas permukaan yang lebih besar dibandingkan dengan PANi yang disintesis pada suhu ruang (28°C). Area permukaan yang lebih luas menawarkan lebih banyak sisi katalis yang dapat berinteraksi dengan zat warna MB, sehingga menghasilkan fotokatalis dengan efisiensi fotodegradasi yang lebih besar (Mohammed dkk., 2021). Pada proses sintesisnya, larutan yang dihasilkan yaitu berwarna hijau pekat kehitaman. Hal ini sesuai dengan PANi hasil sintesis Chomari & Kusumawati (2012) yang menunjukkan warna serupa. Menurut Mahmood (2014), reaksi yang terjadi selama proses sintesis PANi berlangsung ditunjukkan dalam Gambar 4.3.

Inisiasi**Propagasi****Terminasi**

Gambar 4.3 Mekanisme reaksi sintesis PANi (Mezhuev dkk., 2017)

Pada saat sintesis PANi, terjadi polimerisasi dengan konfigurasi "head-to-tail". Mekanisme reaksi (Gambar 4.3) meliputi tiga langkah yaitu inisiasi, propagasi, dan terminasi. Mula-mula, gugus amina dalam anilin teroksidasi dan menghasilkan radikal. Selanjutnya radikal bereaksi dengan molekul anilin lain menghasilkan dimer. Gugus amina pada monomer anilin akan terus mengalami reaksi oksidasi dan rantai polimer terus terbentuk sampai salah satu reaktan habis.

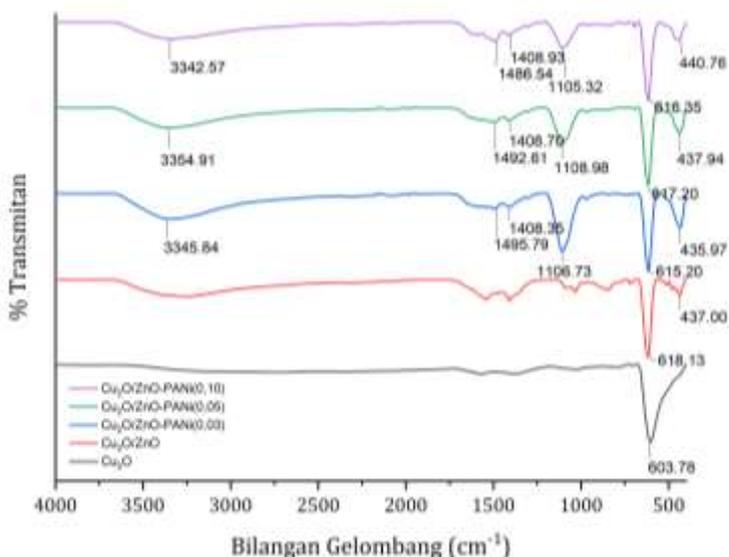


Gambar 4.4 Komposit terner hasil sintesis (a) $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi(0,03) (b) $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi(0,05) (c) $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi(0,10)

Gambar 4.4 menunjukkan komposit terner $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi hasil sintesis dengan variasi jumlah anilin yang berbeda. Semakin banyak anilin yang direaksikan, maka warna komposit $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi semakin gelap. Hal ini mengidentifikasi secara fisik bahwa PANi yang terbentuk semakin pekat. $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi diidentifikasi karakternya menggunakan FTIR. $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi dengan % fotodegradasi tertinggi juga dianalisis dengan XRD dan DR-UV.

D. Analisis FTIR

Karakterisasi menggunakan FTIR digunakan untuk mengetahui adanya gugus fungsi pada katalis Cu_2O , $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$, dan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi. Fotokatalis tersebut mempunyai pita serapan yang khas yaitu muncul pada bilangan gelombang $4000\text{-}400\text{ cm}^{-1}$ (Mohammed dkk., 2021).



Gambar 4.5 Spektra FTIR fotokatalis Cu₂O; Cu₂O/ZnO; Cu₂O/ZnO-PANi(0,03); Cu₂O/ZnO-PANi(0,05); Cu₂O/ZnO-PANi(0,10)

Spektra FTIR Cu₂O; Cu₂O/ZnO; Cu₂O/ZnO-PANi(0,03); Cu₂O/ZnO-PANi(0,05); dan Cu₂O/ZnO-PANi(0,10) ditunjukkan pada Gambar 4.5. Pada spektra Cu₂O, terdapat serapan dengan bilangan gelombang 603 cm⁻¹ yang berkorelasi dengan ikatan Cu-O. Ini menandakan kemurnian Cu₂O yang disintesis, karena tidak ada puncak terkait dengan CuO yang mungkin muncul pada 588 cm⁻¹, 534 cm⁻¹, dan 480 cm⁻¹ (Mohammed dkk., 2021). Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Gopalakrishnan (2014) menunjukkan bahwa Cu₂O teridentifikasi pada bilangan gelombang 624 cm⁻¹.

Pada spektrum FTIR komposit $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$, muncul pita pada bilangan gelombang 437 cm^{-1} yang disebabkan oleh ikatan $\text{Zn}-\text{O}$, sedangkan pita pada bilangan gelombang 618 cm^{-1} dikaitkan dengan vibrasi ulur $\text{Cu}-\text{O}$ dalam Cu_2O . Hasil ini sesuai dengan penelitian terdahulu oleh Mohammed (2021) yang menunjukkan serapan pada pita pada bilangan gelombang 449 cm^{-1} dikaitkan dengan bentuk heksagonal pada ZnO dan serapan pada bilangan gelombang 664 cm^{-1} dikaitkan dengan vibrasi ulur $\text{Cu}-\text{O}$ dalam Cu_2O .

Spektrum $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}-\text{PANi}(0,03)$ memperlihatkan puncak yang terkait dengan PANi pada bilangan gelombang $1495, 1408$ dan 1106 cm^{-1} yang menunjukkan peregangan pada ikatan $\text{C}=\text{C}$ gugus quinoid, $\text{C}=\text{C}$ gugus benzenoid, dan peregangan ikatan $\text{C}-\text{N}$. Adapun untuk puncak-puncak lain seperti pada 970 cm^{-1} dikaitkan dengan vibrasi $\text{C}-\text{H}$. Selanjutnya pita pada bilangan gelombang 3345 cm^{-1} dikaitkan dengan ikatan $\text{N}-\text{H}$. Adanya Cu_2O di dalam matriks PANi ditunjukkan oleh pergeseran serapan pada bilangan gelombang 615 cm^{-1} , sedangkan adanya ZnO di dalam matriks PANi ditunjukkan oleh pergeseran serapan pada bilangan gelombang 435 cm^{-1} . Terdapat sedikit perbedaan dari bilangan gelombang PANi di $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}-\text{PANi}(0,05)$ yaitu pada bilangan

gelombang 1492 cm^{-1} (ikatan C=C gugus quinoid), 1408 cm^{-1} (C=C gugus benzenoid), 1108 cm^{-1} (peregangan ikatan C-N), 970 cm^{-1} (vibrasi C-H), dan 3354 cm^{-1} (ikatan N-H). Adanya Cu_2O dan ZnO di dalam matriks PANi(0,05) ditunjukkan pada bilangan gelombang 617 cm^{-1} dan 437 cm^{-1} . Begitu pula perbedaan dari bilangan gelombang PANi di $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi(0,10) yaitu pada bilangan gelombang 1486 cm^{-1} (ikatan C=C gugus quinoid), 1408 cm^{-1} (C=C gugus benzenoid), 1105 cm^{-1} (peregangan ikatan C-N), 967 cm^{-1} (vibrasi C-H), dan 3342 cm^{-1} (ikatan N-H). Adanya Cu_2O dan ZnO di dalam matriks PANi(0,10) ditunjukkan pada bilangan gelombang 616 cm^{-1} dan 440 cm^{-1} . Berdasarkan kelima spektrum di atas, daftar bilangan gelombang Cu_2O , $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$, $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi(0,03), $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi(0,05), dan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi(0,10) dapat dilihat dalam Tabel 4.1.

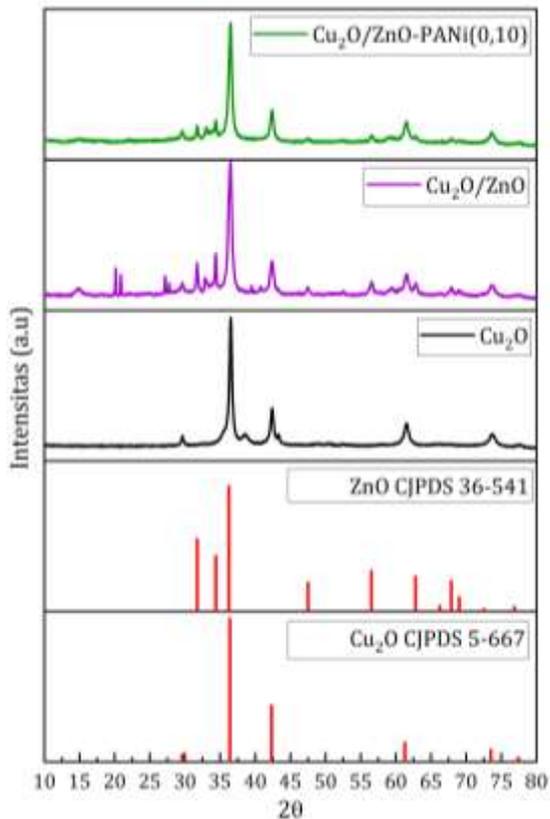
Tabel 4.1 Daftar bilangan gelombang pada spektra FTIR untuk fotokatalis yang digunakan dalam penelitian ini dan referensi

No	Cu ₂ O	Cu ₂ O/ ZnO	Cu ₂ O/ ZnO- PANi (0,03)	Cu ₂ O/ ZnO- PANi (0,05)	Cu ₂ O/ ZnO- PANi (0,10)	Referensi	Gugus Fungsi
1.	603 cm ⁻¹	618 cm ⁻¹	615 cm ⁻¹	617 cm ⁻¹	616 cm ⁻¹	624 cm ⁻¹ (Gopalakris hnan, 2014)	Cu-O
2.	-	437 cm ⁻¹	435 cm ⁻¹	437 cm ⁻¹	440 cm ⁻¹	449 cm ⁻¹ (Mohamme d, 2021)	Zn-O
3.	-	-	1106 cm ⁻¹	1108 cm ⁻¹	1105 cm ⁻¹	1143 cm ⁻¹ (Widiyanti, 2018)	vibrasi C-N
4.	-	-	1495, cm ⁻¹	1492 cm ⁻¹	1486 cm ⁻¹	1570 cm ⁻¹ (Gopalakris hnan, 2014)	C=C gugus quinoi d
5.	-	-	1408 cm ⁻¹	1408 cm ⁻¹	1408 cm ⁻¹	1496 cm ⁻¹ (Gopalakris hnan, 2014)	C=C gugus benzen oid
6.	-	-	970 cm ⁻¹	970 cm ⁻¹	967 cm ⁻¹	879 cm ⁻¹ (Widiyanti, 2018)	vibrasi C-H
7.	-	-	3345 cm ⁻¹	3354 cm ⁻¹	3342 cm ⁻¹	3443 cm ⁻¹ (Ayad, 2017)	Vibrasi N-H

E. Analisis XRD

Karakterisasi menggunakan XRD bertujuan untuk mengetahui fasa, % kristalinitas, struktur kristal, dan ukuran kristal pada fotokatalis Cu₂O, Cu₂O/ZnO, dan Cu₂O/ZnO-PANi. Fotokatalis tersebut mempunyai pola

difraksi yang khas yaitu muncul pada 2θ 10° - 80° (Mohammed dkk., 2021).



Gambar 4.6 Pola XRD standar Cu_2O , standar ZnO, Cu_2O , $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$, dan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANI}(0,10)$

Gambar 4.6 menggambarkan pola difraksi Cu_2O , $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$, dan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANI}(0,10)$ bersama dengan pola standar Cu_2O (sesuai dengan JCPDS No. 5-667) dan pola standar ZnO (sesuai dengan JCPDS No. 36-1451).

Untuk Cu_2O , puncak pada 2θ dan bidang kristal = $29,647^\circ$ (110); $36,512^\circ$ (101); $42,401^\circ$ (200); $52,561^\circ$ (211); $61,519^\circ$ (220); $73,698^\circ$ (311); dan $77,498^\circ$ (222) yang dapat diindeks ke JCPDS No. 5-667, dan hasil tersebut bertepatan dengan struktur kubik Cu_2O . Oleh karena itu material Cu_2O hasil sintesis memiliki tingkat kemurnian yang tinggi. Kristalinitas Cu_2O dibuktikan dengan puncak difraksi yang tajam. Adapun % kristalinitas Cu_2O setelah dihitung menggunakan Persamaan 2.21 yaitu sebesar 73,84%.

Pola XRD $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ pada Gambar 4.6 menunjukkan puncak pada 2θ dan bidang kristal = $31,736^\circ$ (100); $34,374^\circ$ (002); $36,457^\circ$ (101); $47,494^\circ$ (102); $56,539^\circ$ (110); $62,83^\circ$ (103); $66,465^\circ$ (200); $67,885^\circ$ (112); $69,010^\circ$ (201); $72,527^\circ$ (004); dan $76,722^\circ$ (202) dapat diindeks ke JCPDS No. 36-1451. Hasil tersebut berkorelasi dengan bidang heksagonal ZnO . Sedangkan puncak pada 2θ dan bidang kristal = $29,645^\circ$ (110); $36,457^\circ$ (101); $42,388^\circ$ (200); $52,540^\circ$ (211); $61,560^\circ$ (220); $73,688^\circ$ (311); dan $77,724^\circ$ (222) menegaskan adanya Cu_2O . Dengan demikian, pola XRD ini menunjukkan bahwa ZnO berhasil dikompositkan bersama Cu_2O . Kristalinitas komposit $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ juga dibuktikan dengan puncak difraksi yang tajam. Adapun % kristalinitas komposit $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ setelah

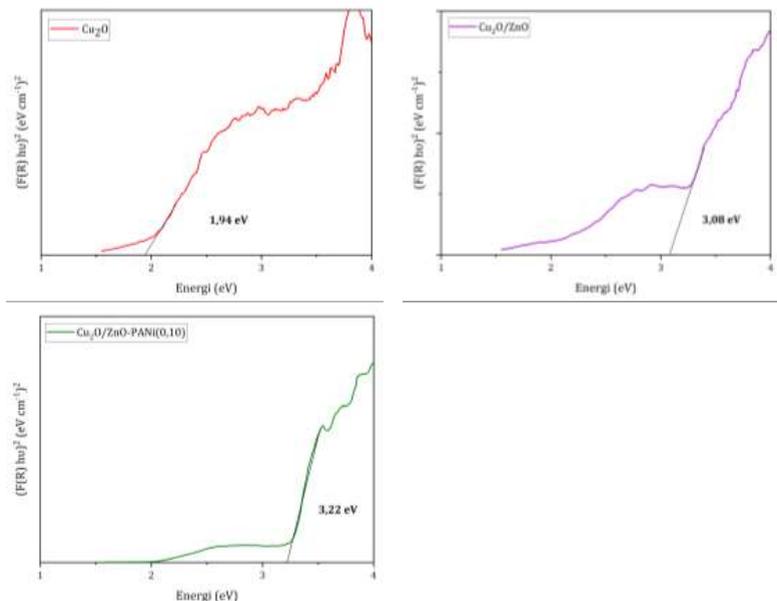
dihitung menggunakan Persamaan 2.21 yaitu sebesar 55,47%.

Pola XRD $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANi}(0,10)$ juga disajikan pada Gambar 4.6. Puncak pada 2θ dan bidang kristal = $31,734^\circ$ (100); $34,393^\circ$ (002); $36,476^\circ$ (101); $47,439^\circ$ (102); $56,540^\circ$ (110); $62,844^\circ$ (103); $67,865^\circ$ (112); dan $69,320^\circ$ (201). Demikian pula, puncak pada 2θ dan bidang kristal = $29,645^\circ$ (110); $36,476^\circ$ (101); $42,413^\circ$ (200); $52,589^\circ$ (211); $61,490^\circ$ (220); $73,603^\circ$ (311); dan $77,684^\circ$ (222) menegaskan adanya Cu_2O . Untuk PANi, pola puncak difraksinya kurang terlihat karena jumlah PANi terlalu sedikit. Adapun menurut Mohammed (2021), puncak difraksi PANi terlihat pada daerah sekitar $25,24^\circ$. Namun demikian, pada pola XRD $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANi}(0,10)$ hasil sintesis, puncak yang ada hampir semuanya dikaitkan dengan Cu_2O dan ZnO , hal ini disebabkan oleh fakta bahwa jumlah PANi terlalu rendah, dan puncak difraksinya jauh lebih lemah daripada kristal Cu_2O dan ZnO karena sifat amorf PANi. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Mohammed (2021). Adapun % kristalinitas komposit $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANi}(0,10)$ setelah dihitung menggunakan Persamaan 2.21 setelah dihitung menggunakan Persamaan 2.21 yaitu sebesar 49,83%.

Ukuran kristal rata-rata Cu_2O , $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$, dan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANi}(0,10)$ dihitung menggunakan tiga puncak tertinggi XRD masing-masing sampel melalui persamaan Debye-Scherrer seperti pada Persamaan 2.20 sebagaimana yang dilakukan oleh Mohammed (2021). Rata-rata ukuran kristalit Cu_2O terhitung 13,91 nm, sedangkan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ dan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANi}(0,10)$ masing-masing terhitung 10,20 dan 9,61 nm. Ukuran kristal $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANi}(0,10)$ tampak lebih kecil dari ukuran kristal Cu_2O maupun $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$, meskipun dimodifikasi dengan PANi. Hal ini mungkin saja terjadi karena pada proses polimerisasi dengan pengadukan konstan untuk membentuk $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANi}(0,10)$ menyebabkan ukuran kristalit menjadi lebih kecil (Mohammed dkk., 2021). Adapun ukuran kristal yang didapat berukuran nanomaterial, di mana reaksi fotokatalisis akan efektif apabila ukuran kristal berada pada ukuran nano yaitu 1-100 nm (Naimah dkk., 2011). Semakin kecil ukuran kristal fotokatalis, maka kemampuan fotokatalis dalam mendegradasi zat warna semakin baik.

F. Analisis DR-UV

Karakterisasi menggunakan instrumen DR-UV berfungsi untuk mengetahui energi celah pita pada sampel. Pengukuran energi celah pita merupakan parameter yang sangat penting untuk sampel fotokatalis karena kerja logam semikonduktor sebagai material yang digunakan untuk fotodegradasi zat warna ini dipengaruhi oleh energi celah pita.



Gambar 4.7 Hasil spektrum DR-UV material Cu_2O , $\text{Cu}_2\text{O/ZnO}$, dan $\text{Cu}_2\text{O/ZnO-PANI}(0,10)$

Perhitungan energi celah pita dilakukan dengan menggunakan persamaan Kubelka Munk. Penentuan energi celah pita dilakukan dengan membuat kurva

hubungan antara $(F(R)h\nu)^2$ dengan energi $(h\nu)$ yang dapat dilihat pada Gambar 4.7. Celah pita Cu_2O , $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$, dan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANi}(0,10)$ didapatkan masing-masing yaitu sebesar 1,94 eV; 3,08 eV; dan 3,22 eV. Peningkatan celah pita disebabkan oleh pembentukan komposit dengan ZnO dan PANi. Dengan demikian, pengkompositan material menyebabkan energi celah pita semakin membesar sehingga rekombinasi elektron dan *hole* lebih sukar terjadi dibandingkan dengan Cu_2O murni. Ketika efek rekombinasi dapat diminimalkan, maka akan lebih banyak elektron yang dapat tereksitasi dari pita valensi menuju pita konduksi. Semakin banyak elektron dan *hole* yang terbentuk, maka semakin efektif terjadinya reaksi redoks untuk menghasilkan $\bullet\text{O}_2^-$ dan $\bullet\text{OH}$. Semakin banyak $\bullet\text{O}_2^-$ dan $\bullet\text{OH}$, maka semakin banyak senyawa MB yang dapat terdegradasi.

G. Aplikasi Fotokatalis untuk Degradasi Zat Warna Metilen Biru

Pada penelitian ini, fotokatalis yang digunakan adalah Cu_2O , $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$, dan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANi}$ dengan tiga variasi yaitu $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANi}(0,03)$, $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANi}(0,05)$, dan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANi}(0,10)$. Adapun senyawa targetnya berupa

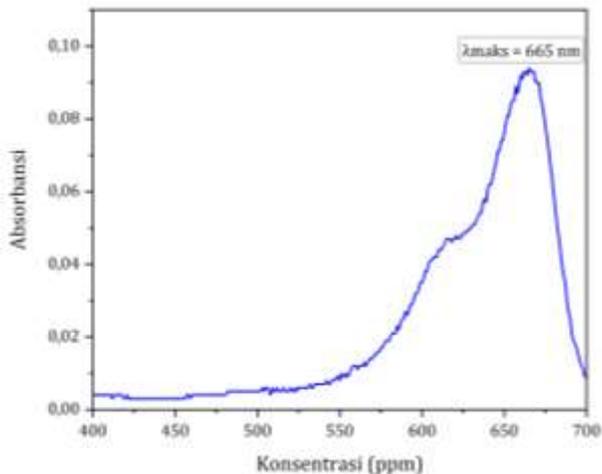
zat warna MB, sumber cahaya (foton) berasal dari lampu sinar *visible*.

1. Penentuan Panjang Gelombang (λ) Maksimum Metilen Biru

Panjang gelombang (λ) maksimum merupakan nilai absorbansi tertinggi dari suatu senyawa yang diukur. Penentuan panjang gelombang (λ) maksimum dilakukan dengan tujuan untuk dapat melakukan perhitungan kadar MB dalam larutan berair dengan kepekaan yang tinggi dan kesalahan yang kecil (Agusty, 2012). Di sisi lain, penentuan panjang gelombang (λ) maksimum digunakan untuk membuat kurva standar (Nasution dkk., 2019). Spektrofotometer UV-Vis dapat digunakan untuk menentukan panjang gelombang (λ) maksimum MB karena pada zat warna ini memiliki gugus kromofor -N=N- yang menyebabkan senyawa ini menjadi berwarna (Erwanto dkk., 2020). Pelarut yang digunakan pada penetapan panjang gelombang (λ) maksimum MB adalah akuades sehingga blanko yang digunakan juga akuades. Fungsi dari larutan blanko adalah untuk mengkalibrasi alat spektrofotometer UV-Vis agar dapat meminimalisir kesalahan pada pemakaian alat sehingga diperoleh nilai absorbansi

dan panjang gelombang (λ) maksimum sampel dengan teliti (Mustika dkk., 2018).

Hasil panjang gelombang (λ) maksimum yang didapat untuk MB adalah 665 nm. Hal tersebut sama dengan penelitian Baunsele & Missa (2020) yang mengatakan bahwa panjang gelombang (λ) maksimum larutan MB adalah 665 nm. Dengan demikian, pada panjang gelombang 665 nm diharapkan dapat memberikan kepekaan sampel yang mengandung MB dengan maksimal. Gambar 4.8 menunjukkan panjang gelombang maksimum MB.



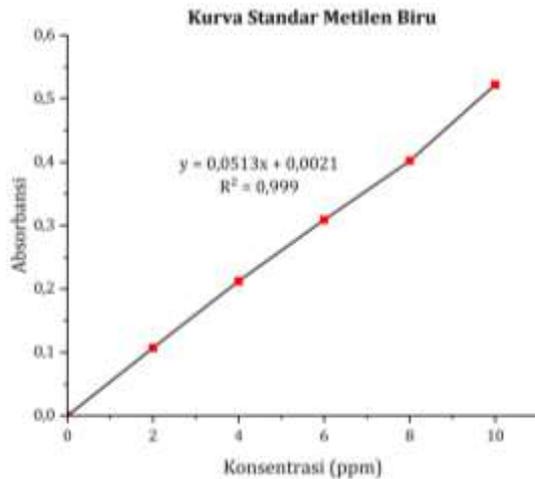
Gambar 4.8 Kurva panjang gelombang (λ) maksimum MB

Selanjutnya panjang gelombang (λ) maksimum MB digunakan untuk menentukan kurva standar.

2. Kurva Standar Metilen Biru

Pembuatan kurva standar digunakan untuk mencari persamaan regresi linear sehingga dapat digunakan dalam perhitungan konsentrasi analit dalam sampel yang absorbansinya sudah diukur (Syahirah & Cahyati, 2021). Kurva standar ini merupakan grafik yang menghubungkan konsentrasi zat warna MB dengan absorbansi MB, sehingga membentuk garis linear (Nasution dkk., 2019).

Kurva standar MB dilakukan pada konsentrasi larutan standar sebesar 0, 2, 4, 6, 8, dan 10 ppm. Larutan standar tersebut diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang (λ) maksimum MB. Nilai absorbansi yang didapatkan selanjutnya digunakan untuk membuat kurva hubungan antara konsentrasi (x) dan absorbansi (y). Dari kurva tersebut, Persamaan 3.13 dapat diperoleh seperti yang terlihat pada Gambar 4.9.



Gambar 4. 9 Kurva standar metilen biru

Dalam penelitian ini didapatkan persamaan regresi linear $y = 0,0513x + 0,0021$ dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,999 dan koefien korelasi (r) sebesar 0,9994. Nilai yang dihasilkan sudah tergolong baik karena menurut Widihati (2011), nilai koefisien relasi (r) yang mendekati 1 atau sama dengan 1 adalah nilai linearitas yang sangat baik. Nilai koefisien relasi (r) yang mendekati 1 tersebut menunjukkan titik data yang memiliki hubungan linear sempurna. Hal ini menunjukkan bahwa seiring meningkatnya konsentrasi sampel (X) maka nilai absorbansi sampel (Y) juga meningkat. Berdasarkan persamaan regresi linear tersebut, konsentrasi

larutan MB dapat dihitung dengan memasukkan nilai absorbansi.

3. Kinerja Fotokatalis dalam Fotodegradasi Metilen Biru

Aktivitas fotokatalis terhadap fotodegradasi MB diuji pada fotoreaktor seperti Gambar 4.11 di bawah penyinaran sinar *visible*. Masing-masing fotokatalis Cu_2O , $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$, $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANi}(0,03)$, $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANi}(0,05)$, dan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANi}(0,10)$ diuji kinerjanya dengan kondisi yang sama yaitu dengan massa fotokatalisnya sebanyak 100 mg, konsentrasi larutan awal MB 10 ppm dengan volume 100 mL yang diatur pH-nya pada pH 12 dan waktu penyinaran selama 120 menit di dalam reaktor. pH yang digunakan pada penelitian ini ada di pH 12 atau pH basa. Hal ini karena zat warna MB merupakan zat warna kationik (bermuatan positif). Dalam penelitian Wati (2021) disebutkan bahwa zat warna MB mengandung turunan amina yang bermuatan positif. Pewarna kationik akan teradsorpsi pada fotokatalis bermuatan negatif. Dalam larutan dasarnya, fotokatalis cenderung memperoleh muatan negatif yang menghasilkan peningkatan adsorpsi pewarna bermuatan positif karena meningkatnya daya tarik

elektrostatik. Pada pH asam, ion H^+ sebagai spesies dominan bersaing dengan pewarna MB kationik, yang menurunkan adsorpsi molekul MB pada permukaan fotokatalis. Sedangkan pada pH basa, ion OH^- sebagai spesies dominan tidak akan bersaing dengan MB, karena OH^- akan ditolak oleh permukaan fotokatalis yang bermuatan negatif dan akan tetap berada dalam larutan dalam jumlah besar (Khan dkk., 2022). Hal ini mengakibatkan zat warna MB efektif terdegradasi dalam keadaan basa. Hal yang sama juga didapatkan dari penelitian Erwanto (2020) yang menunjukkan bahwa degradasi optimum zat warna MB terjadi pada pH basa (pH 11).

Setelah waktu penyinaran selesai, larutan disentrifugasi dengan tujuan untuk memisahkan antara suspensi dan filtrat. Filtrat hasil fotodegradasi diukur absorbansinya dengan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum MB yaitu 665 nm. Masing-masing uji fotodegradasi dilakukan secara duplo dengan tujuan untuk memperoleh data dengan tingkat keakuratan yang tinggi (Nadhila & Nuzlia, 2021).



Gambar 4.10 Fotoreaktor untuk fotodegradasi MB

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, penambahan ZnO dan PANi dapat mempengaruhi penurunan konsentrasi MB. % degradasi zat warna MB untuk masing-masing fotokatalis dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Degradasi fotokatalitik zat warna MB oleh masing-masing fotokatalis di bawah radiasi cahaya *visible*

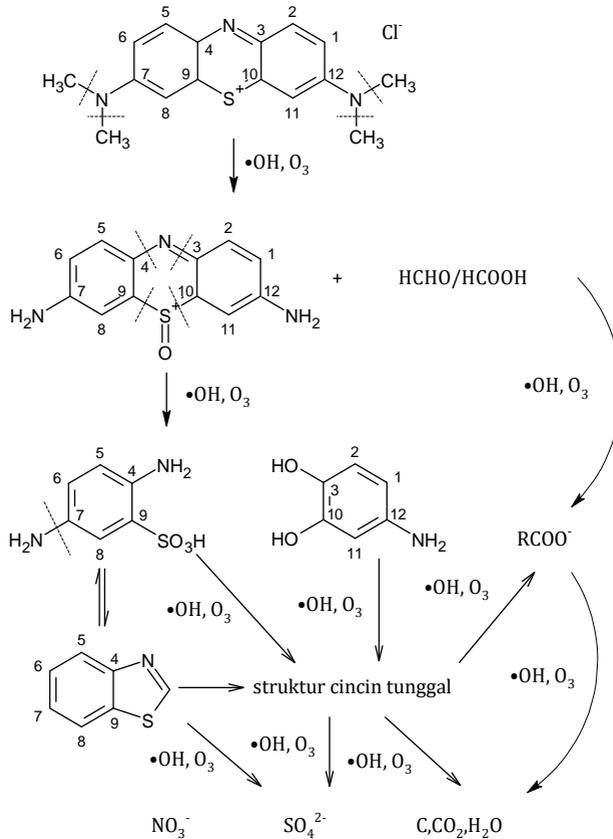
Sampel fotokatalis	% Fotodegradasi		
	Percobaan ke-1	Percobaan ke-2	Rata-rata
Cu ₂ O	79,88%	80,53%	80,2%
Cu ₂ O/ZnO	81,24%	82,54%	81,89%
Cu ₂ O/ZnO-PANi(0,03)	86,11%	85,40%	85,75%
Cu ₂ O/ZnO-PANi(0,05)	88,19%	87,28%	87,73%
Cu ₂ O/ZnO-PANi(0,10)	90,34%	89,69%	90,01%

Tabel 4.2 menunjukkan bahwa sampel $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANi}(0,10)$ memiliki kemampuan fotodegradasi zat warna MB yang paling baik. Hal ini sejalan dengan Mohammed (2021) yang melakukan uji fotodegradasi menggunakan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANi}(0,10)$ terhadap zat warna *congo red*. Diketahui dari penelitian tersebut bahwa komposit terner dapat meningkatkan kinerja fotokatalitik. Penambahan ZnO dan PANi secara efisien meningkatkan efisiensi degradasi Cu_2O dalam mendegradasi zat warna MB. Pembentukan komposit secara signifikan meningkatkan efisiensi degradasi fotokatalis bila dibandingkan dengan katalis murninya. Jika dibandingkan dengan Cu_2O dan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$, komposit $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANi}(0,10)$ memiliki aktivitas fotokatalis yang lebih unggul terhadap zat pewarna anionik (Mohammed, 2021) maupun kationik. Namun, $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANi}(0,10)$ hasil sintesis Mohammed (2021) dapat mendegradasi 100% zat warna anionik (*congo red*), sedangkan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANi}(0,10)$ hasil sintesis pada penelitian ini hanya dapat mendegradasi 90,01% zat warna kationik (MB). Di lain sisi, degradasi fotokatalitik $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANi}(0,10)$ lebih cepat dalam mendegradasi pewarna anionik (*congo red*) yaitu

selama 30 menit. Ketika ditambahkan ZnO dan PANi, aktivitas Cu_2O sebagai fotokatalis semakin meningkat dan % fotodegradasinya semakin tinggi. Hal ini disebabkan karena pada saat fotokatalis Cu_2O kontak dengan zat warna dalam jangka waktu tertentu, fotokorosi Cu_2O dapat ditekan dengan adanya PANi dan ZnO.

Gambar 4.11 menunjukkan mekanisme degradasi zat warna MB. Menurut Huang dkk. (2010), degradasi MB berlangsung melalui tahap sebagai berikut:

- (i) Demetilasi, di mana ikatan N- CH_3 terputus, kemudian $-\text{CH}_3$ dioksidasi menjadi HCHO atau HCOOH.
- (ii) Pemutusan cincin aromatik pusat MB dan kemudian cincin aromatik samping. Pada tahap ini, radikal aktif memecah ikatan C-S dan C-N molekul thionine.
- (iii) Konversi fragmen yang dihasilkan dari dua langkah pertama menjadi spesies intermediet, seperti spesies R-NH_3^+ , fenol, anilin dan aldehida/karboksilat
- (iv) Konversi intermediet ini menjadi produk akhir, seperti CO_2 , H_2O , SO_4^{2-} dan NH_3^- .



Gambar 4.11 Mekanisme degradasi metilen biru (Huang dkk., 2010)

4. Stabilitas Fotokatalis dalam Mendegradasi Metilen Biru

Uji stabilitas dilakukan terhadap fotokatalis $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANi}(0,10)$. Komposit terner ini digunakan untuk tiga kali siklus degradasi. Tabel 4.3 menunjukkan

data pengamatan uji stabilitas fotokatalis $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi(0,10).

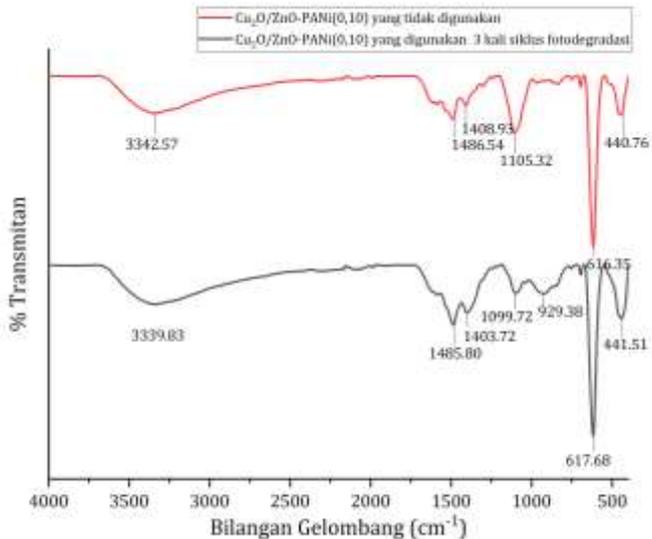
Tabel 4.3 Persentase degradasi fotokatalis $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi(0,10) untuk mendegradasi MB

Siklus	% Fotodegradasi		
	Percobaan ke-1	Percobaan ke-2	Rata-rata
Ke-1	90,34%	89,69%	90,01%
Ke-2	87,48%	87,99%	87,73%
Ke-3	84,75%	83,84%	84,29%

Dari data dalam Tabel 4.3, diketahui bahwa efisiensi masih dipertahankan di atas 82% setelah tiga kali siklus fotodegradasi. Siklus pertama fotodegradasi memperoleh data % fotodegradasi sebesar 90,01%. Setelah dua kali siklus fotodegradasi terjadi pengurangan % fotodegradasi dari 90,01% menjadi 87,73%. Begitupun setelah tiga kali fotodegradasi, % fotodegradasi mengalami pengurangan lagi menjadi 84,29%. Pengurangan bertahap dalam efisiensi degradasi dapat dikaitkan dengan agregasi partikel katalis selama proses fotodegradasi.

Untuk mengetahui karakter fisika dan kimia sampel sebelum dan sesudah uji fotodegradasi, dilakukan analisis dengan alat XRD dan FTIR untuk sampel $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi(0,10). Hal ini dilakukan dengan tujuan untuk melihat apakah ada perubahan

struktur kimia dan fisika dalam sampel yang dikaitkan dengan stabilitasnya.

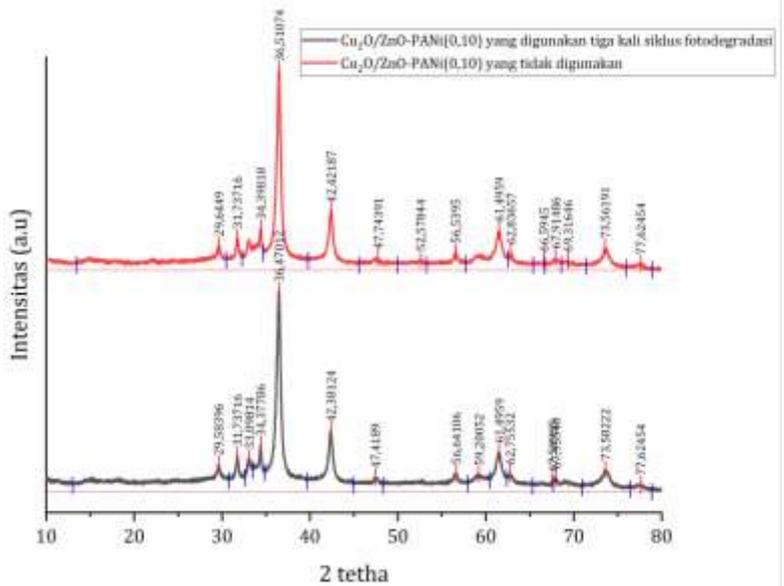


Gambar 4.12 Spektrum FTIR sampel Cu₂O/ZnO-PANi(0,10) yang digunakan dan tidak digunakan tiga kali siklus fotodegradasi

Gambar 4.12 menunjukkan perbandingan antara spektrum FTIR dari Cu₂O/ZnO-PANi(0,1) sebelum dan setelah tiga kali siklus fotodegradasi zat warna MB. Kedua spektrum pada Gambar 4.12 tampak mirip dan tidak mengalami banyak perubahan. Hal ini menunjukkan bahwa struktur kimia Cu₂O/ZnO-PANi(0,10) mempunyai kestabilan yang baik. Hasil ini juga menunjukkan peran PANi dalam mencegah fotokorosi Cu₂O, karena tidak ada puncak yang muncul

terkait CuO atau Cu (produk fotokorosi dari Cu₂O) bahkan setelah penggunaan hingga tiga kali siklus.

Kestabilan material Cu₂O/ZnO-PANi(0,1) sebagai fotokatalis juga dibuktikan dengan pola XRD yang ditunjukkan pada Gambar 4.13. Sebagaimana spektrum FTIR, pola difraksi dari Cu₂O/ZnO-PANi(0,1) setelah tiga kali penggunaan mirip dengan sampel yang tidak digunakan untuk fotodegradasi. Hal ini menunjukkan bahwa kristalinitas Cu₂O/ZnO-PANi(0,10) dapat dipertahankan setelah tiga kali proses fotodegradasi. Kestabilan Cu₂O/ZnO-PANi(0,10) yang baik menyebabkan fotokatalis tersebut dapat mempertahankan lebih dari 82% pengurangan konsentrasi MB setelah tiga kali siklus fotodegradasi. Adapun % kristalinitas Cu₂O/ZnO-PANi(0,10) yang digunakan setelah uji stabilitas setelah dihitung menggunakan Persamaan 2.21 adalah 48,69%.



Gambar 4.13 Pola XRD sampel $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANI}(0,10)$ yang digunakan dan tidak digunakan tiga kali siklus fotodegradasi

BAB V

SIMPULAN DAN SARAN

A. Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa :

1. Cu_2O , $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$, dan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi yang disintesis mengandung gugus-gugus fungsi spesifik yaitu Cu-O, Zn-O, ikatan C=C gugus quinoid, C=C gugus benzenoid, peregangan ikatan C-N, vibrasi C-H, dan ikatan N-H. Kristalinitas Cu_2O , $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$, dan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi(0,10) sesuai karakter pola difraksi Cu_2O dan ZnO berdasarkan JCPDS No. 5-667 dan JCPDS No. 36-1451 dengan % kristalinitas masing-masing yaitu 73,84%; 55,47%; dan 49,83%. Penambahan PANi dan ZnO dapat mengubah nilai energi celah pita material, dibuktikan dengan pergeseran E_g dari Cu_2O , $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$, dan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi(0,10) masing-masing sebesar 1,94 eV; 3,08 eV; dan 3,22 eV.
2. Penambahan PANi dalam $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ dapat meningkatkan % fotodegradasi MB. Hal ini dibuktikan dengan nilai % fotodegradasi MB oleh $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi. $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi dengan berbagai variasi jumlah anilin juga diketahui masih memiliki % fotodegradasi yang lebih tinggi dibandingkan oleh Cu_2O dan

Cu₂O/ZnO saja. % fotodegradasi MB oleh Cu₂O, Cu₂O/ZnO, Cu₂O/ZnO-PANi(0,03), Cu₂O/ZnO-PANi(0,05), dan Cu₂O/ZnO-PANi(0,10) berturut-turut sebesar 80,2%; 81,89%; 85,72%; 87,73%; dan 90,01%.

3. Diketahui terjadi penurunan % fotodegradasi MB secara bertahap setelah tiga kali siklus fotodegradasi oleh Cu₂O/ZnO-PANi(0,10). % fotodegradasi dari siklus satu sampai tiga berturut-turut 90,01%; 87,73%; dan 84,29%. Analisis dengan FTIR dan XRD Cu₂O/ZnO-PANi(0,10) menunjukkan bahwa sampel fotokatalis tersebut memiliki kestabilan yang baik. Hal ini dibuktikan dengan spektrum dan difraktogram dari sampel Cu₂O/ZnO-PANi(0,10) yang digunakan dan tidak digunakan uji stabilitas tidak mengalami banyak perubahan.

B. Saran

Untuk penelitian berikutnya, peneliti menyarankan beberapa hal sebagai berikut:

1. Perlu adanya karakterisasi menggunakan SEM untuk mengidentifikasi morfologi sampel.

2. Dilakukan sintesis, karakterisasi, dan uji fotodegradasi dengan konsentrasi PANi yang lebih tinggi.
3. Dilakukan optimasi pH, waktu kontak, konsentrasi zat warna, dan dosis fotokatalis.
4. Dilakukan uji kinetika fotodegradasi.
5. Dilakukan uji untuk mengidentifikasi molekul yang terbentuk akibat fotodegradasi zat warna MB.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdolhoseinzadeh, A., & Sheibani, S. 2020. Enhanced Photocatalytic Performance of Cu₂O Nano-Photocatalyst Powder Modified by Ball Milling and ZnO. *Advanced Powder Technology*. 31(1): 40–50. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.09.035>
- Adam, R. E. 2020. *Synthesis and Characterization of Some Nanostructured Materials for Visible Light-driven Photo Processes*. Disertasi. Norrköping: Linköping Studies in Science and Technology.
- Agusty, I. P. 2012. *Penggunaan Zeolit Terimpregnasi TiO₂ untuk Mendegradasi Zat Warna Congo Red*. Skripsi. Surabaya: Universitas Airlangga.
- Ajmal, A., Majeed, I., Malik, R. N., Idriss, H., & Nadeem, M. A. 2014. Principles and Mechanisms of Photocatalytic Dye Degradation on TiO₂ Based Photocatalysts: A Comparative Overview. *Royal Society of Chemistry*. 4(70): 37003–37026. <https://doi.org/10.1039/c4ra06658h>
- Akter, J., Sapkota, K. P., Hanif, M. A., Islam, M. A., Abbas, H. G., & Hahn, J. R. 2021. Kinetically Controlled Selective Synthesis of Cu₂O and CuO Nanoparticles Toward Enhanced Degradation of Methylene Blue Using Ultraviolet and Sun Light. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 123. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105570>
- Alfina, B. T., Wardhani, S., & T, R. T. 2015. Sintesis TiO₂-N/Zeolit untuk Degradasi Metilen Biru. *Kimia Student Jurnal*. 1(1): 599–605.
- Ameta, R., Solanki, M. S., Benjamin, S., & Ameta, S. C. 2018. Photocatalysis. *Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: Emerging Green Chemical Technology*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810499-6.00006-1>
- Andari, D., Adfa, M., & S, S. Y. 2022. Komposit Polianilin/Logam Oksida: Sintesis, Karakterisasi dan Aplikasi: Sebuah Telaah Pustaka. *Rafflesia Journal of Natural and Applied*

- Sciences*. 2(1): 128–134.
- Andriana, N. 2016. *Pemanfaatan Silika Gel Berbasis Abu Terbang (Fly Ash) Batubara PLTU Paiton-Probolinggo Sebagai Adsorben Zat Warna Metilen Biru*. Skripsi. Jember: Universitas Jember.
- Anggraini, D. I., & Damayanti, D. 2019. Studi Antidiabetes Kombinasi Ekstrak Etanol Kubis (*Brassica oleracea* L.) dan Tomat (*Solanum lycopersicum* L.) SECARA IN VITRO. *Jurnal Ilmiah As-Syifaa*. 11(1): 30–37. <https://doi.org/10.33096/jifa.v11i1.503>
- Annisaputri, W. A., Azzah, A. N., & Wibisono, R. D. 2020. Studi Potensi Fotokatalis dari Material Kerangka Logam-Organik (Metal-Organic Framework) untuk Degradasi Zat Pewarna Limbah Batik. *The Indonesian Green Technology Journal*. 9(2): 42–53. <https://doi.org/10.21776/ub.igtj.2020.009.02.03>
- Archela, E., Camargo, L. P. de, Pelissari, M. R. da S., & Dall'Antonia, L. H. 2019. n-ZnO/p-Cu₂O Heterojunction Electrode: Characterization and Evaluation of Their Photoelectrochemical Properties. *International Journal of Electrochemical Science*. 14(4): 3581–3594. <https://doi.org/10.20964/2019.04.04>
- Arutanti, O., Abdullah, M., Khairurrijal, & Mahfudz, H. 2009. Penjernihan Air Dari Pencemar Organik dengan Proses Fotokatalis pada Permukaan Titanium Dioksida (TiO₂). *Nanosains & Nanoteknologi*. 4: 53–55.
- Ayad, M. M., Amer, W. A., Kotp, M. G., Minisy, I. M., Rehab, A. F., Kopecký, D., & Fitl, P. 2017. Synthesis of Silver-Anchored Polyaniline-Chitosan Magnetic Nanocomposite: A Smart System for Catalysis. *RSC Advances*. 7(30): 18553–18560. <https://doi.org/10.1039/c7ra02575k>
- Az-Zuhaili, W. 2013. *Tafsir Al-Wasith* (1st ed.). Depok: Gema Insani.
- Banerjee, S., Gopal, J., Muraleedharan, P., Tyagi, A. K., & Raj, B. 2006. Physics and Chemistry of Photocatalytic Titanium Dioxide: Visualization of Bactericidal Activity Using

- Atomic Force Microscopy. *Current Science Association*. 90(10): 1378–1383.
<https://www.jstor.org/stable/24091987>
- Baunsele, A. B., & Missa, H. 2020. Kajian Kinetika Adsorpsi Metilen Biru Menggunakan Adsorben Sabut Kelapa. *Akta Kimia Indonesia*. 5(2): 76–85.
<https://doi.org/10.12962/j25493736.v5i2.7791>
- Bhatkhande, D. S., Pangarkar, V. G., & Beenackers, A. A. C. M. 2002. Photocatalytic Degradation for Environmental Applications - A Review. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 77(1): 102–116.
<https://doi.org/10.1002/jctb.532>
- Chen, K., & Xue, D. 2012. PH-Assisted Crystallization of Cu₂O: Chemical Reactions Control The Evolution from Nanowires to Polyhedra. *CrystEngComm*. 14(23): 8068–8075. <https://doi.org/10.1039/c2ce26084k>
- Chomari, M. N., & Kusumawati, D. H. 2012. Variasi Molaritas H₂SO₄ pada Polianilin/H₂SO₄ Variations in the Molarity of H₂SO₄ at Polyaniline/H₂SO₄. *Journal Sains Dan Matematika*. 1(1): 29–32.
- Ciftja, O. 2013. Understanding Electronic Systems in Semiconductor Quantum Dots. *Physica Scripta*. 88(5).
<https://doi.org/10.1088/0031-8949/88/05/058302>
- Dar, G. N. 2015. *Metal Oxide Nanostructures and Their Applications*. Thesis. Greece: University of Patras.
- Dong, H., Zeng, G., Tang, L., Fan, C., Zhang, C., He, X., & He, Y. 2015. An Overview on Limitations of TiO₂-Based Particles for Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants and The Corresponding Countermeasures. *Water Research*. 79: 128–146.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.04.038>
- Du, J. J., Yuan, Y. P., Sun, J. X., Peng, F. M., Jiang, X., Qiu, L. G., Xie, A. J., Shen, Y. H., & Zhu, J. F. 2011. New Photocatalysts Based on MIL-53 Metal-Organic Frameworks for The Decolorization of Methylene Blue Dye. *Journal of Hazardous Materials*. 190: 945–951.

- <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.04.029>
- Duhan, M., & Kaur, R. 2021. Nano-Structured Polyaniline as A Potential Adsorbent for Methylene Blue Dye Removal from Effluent. *Journal of Composites Science*. 5(1): 1-11. <https://doi.org/10.3390/jcs5010007>
- Erwanto, Yulinda, & Nabela, Q. 2020. Pengaruh Penambahan Ion Nitrat (NO₃) Terhadap Kinetika Fotogedadrasi Zat Warna Metilen Biru Menggunakan Zeolit-TiO₂. *Inovasi Teknik Kimia*. 5(2): 59-67.
- Fiore, J. M. 2021. *Semiconductor Devices - Theory and Application*. LibreTexts.
- Gajbhiye, S. B. 2012. Photocatalytic Degradation Study of Methylene Blue Solutions and Its Application to Dye Industry Effluent. *International Journal of Modern Engineering Research*. 2(3): 1204-1208.
- Ghikov, A., & Schmuki, P. 2009. Self-ordering Electrochemistry: A Review on Growth and Functionality of TiO₂ Nanotubes and Other Self-aligned MO_x Structures. *Chemical Communications*. 20: 2791-2808. <https://doi.org/10.1039/b822726h>
- Gopalakrishnan, K., Ramesh, C., Elango, M., & Thamilselvan, M. 2014. Optical and Magnetic Studies on Cu₂O/PANI Nanocomposite Prepared by Chemical Polymerization Method. *ISRN Materials Science*. 1-7. <https://doi.org/10.1155/2014/567927>
- Greve, D. W. 2012. *Semiconductor devices and technology*. Pittsburgh: Carnegie Mellon University. <https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-1729-1.50036-6>
- Gunawan, B., & Azhari, C. D. 2012. Karakteristik Spektrometri IR dan Scanning Electron Microscopy (SEM) Sensor Gas dari Bahan Polimer Poly Ethelyn Glycol (PEG). *Jurnal Sains Dan Teknologi*. 3(2): 1-17.
- Guo, J. Z., Li, B., Liu, L., & Lv, K. 2007. Removal of Methylene Blue from Aqueous Solutions by Chemically Modified Bamboo. *Chemosphere*. 54: 407-418. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.03.118>

- Gupta, M. K., & Kumar, B. 2011. High Tc Ferroelectricity in V-Doped ZnO Nanorods. *Journal of Materials Chemistry*. 21(38): 14559–14562. <https://doi.org/10.1039/c1jm12107c>
- Hadiana, D. 2012. *Polimerisasi Anilin Oleh Horseradish Peroksidase dan Karakteritiknya*. Skripsi. Depok: Universitas Indonesia.
- Haspulat, B., Gülce, A., & Gülce, H. 2013. Efficient Photocatalytic Decolorization of Some Textile Dyes Using Fe Ions Doped Polyaniline Film on ITO Coated Glass Substrate. *Journal of Hazardous Materials*. 260: 518–526. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.06.011>
- Hu, M., Yan, X., Hu, X., Feng, R., & Zhou, M. 2019. Synthesis of Silver Decorated Silica Nanoparticles with Rough Surfaces as Adsorbent and Catalyst for Methylene Blue Removal. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. 89(3): 754–763. <https://doi.org/10.1007/s10971-018-4871-z>
- Huang, F., Chen, L., Wang, H., & Yan, Z. 2010. Analysis of the degradation mechanism of methylene blue by atmospheric pressure dielectric barrier discharge plasma. *Chemical Engineering Journal*. 162(1): 250–256. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.05.041>
- Jain, S., Surwade, S. P., Agnihotra, S. R., Dua, V., Eliason, P. A., Morose, G. J., & Manohar, S. K. 2010. Green chemistry synthesis of nanostructured poly(2,5-dimethoxyaniline). *Green Chemistry*. 12(4): 585–58. <https://doi.org/10.1039/b923400d>
- Jinkai, Z. 2007. *Modified Titanium Dioxide (TiO₂) Photocatalyst for the Degradation of Organic Pollutants in Wastewater*. Thesis. Queenstown: National University of Singapore. <https://scholarbank.nus.edu.sg/handle/10635/13307>
- Juliana, A. R. 2017. *Sintesis Polianilin dengan Metode Polimerisasi Oksidatif Sebagai Elektroda Untuk Proses Adsorpsi-Desorpsi Ion Na⁺ dan Cl⁻*. Skripsi. Jakarta: Universitas Negeri Jakarta.
- Kandjani, A. E., Sabri, Y. M., Periasamy, S. R., Zohora, N., Amin,

- M. H., Nafady, A., & Bhargava, S. K. 2015. Controlling Core/Shell Formation of Nanocubic p-Cu₂O/n-ZnO Toward Enhanced Photocatalytic Performance. *Langmuir*. 31(39): 10922–10930. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.5b01019>
- Kertati, S. 2008. *Sintesis dan Karakterisasi Polianilin Dari Alinium Asetat dan Anilium Propionat Serta Aplikasinya Sebagai Sensor Uap Amonia*. Skripsi. Depok: Universitas Indonesia.
- Khan, I., Saeed, K., Zekker, I., Zhang, B., Hendi, A. H., Ahmad, A., Ahmad, S., Zada, N., Ahmad, H., Shah, L. A., & Khan, T. S. 1 and I. 2022. Review on Methylene Blue: Its Properties, Uses, Toxicity and Photodegradation. *Water*. 14(2): 1–30. <https://doi.org/10.5040/9781501365072.12105>
- Kroschwitz, J. I. 1990. *Polymers: Polymer Characterization And Analysis*. John Wiley & Sons. 992.
- Kudo, A., & Miseki, Y. 2009. Heterogeneous Photocatalyst Materials for Water Splitting. *Chemical Society Reviews*. 38(1): 253–278. <https://doi.org/10.1039/b800489g>
- Kumar, N., Parui, S. S., Limbu, S., Mahato, D. K., Tiwari, N., & Chauhan, R. N. 2020. Structural and Optical Properties of Sol-Gel Derived CuO and Cu₂O Nanoparticles. *Materials Today*. 41: 237–241. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.800>
- Kuo, C. H., Chen, C. H., & Huang, M. H. 2007. Seed-Mediated Synthesis of Monodispersed Cu₂O Nanocubes with Five Different Size Ranges from 40 to 420 nm. *Advanced Functional Materials*. 17(18): 3773–3780. <https://doi.org/10.1002/adfm.200700356>
- Kwon, Y., Soon, A., Han, H., & Lee, H. 2015. Shape Effects of Cuprous Oxide Particles on Stability in Water and Photocatalytic Water Splitting. *Journal of Materials Chemistry A*. 3(1): 156–162. <https://doi.org/10.1039/c4ta04863f>
- Lestari, D. 2011. *Preparasi Nanokomposit ZnO/TiO₂ dengan Metode Sonokimia serta Uji Aktivitasnya untuk*

- Fotodegradasi Fenol*. Tugas Akhir. Semarang: Universitas Negeri Semarang.
- Li, D., Huang, J., & Kaner, R. B. 2009. Polyaniline Nanofibers: A Unique Polymer Nanostructure for Versatile Applications. *ChemInform*. 40(16): 135–145.
<https://doi.org/10.1002/chin.200916271>
- Liang, X., Gao, L., Yang, S., & Sun, J. 2009. Facile Synthesis and Shape Evolution of Single-Crystal Cuprous Oxide. *Advanced Materials*. 21(20): 2068–2071.
<https://doi.org/10.1002/adma.200802783>
- Lin, X. F., Zhou, R. M., Zhang, J. Q., & Sheng, X. H. 2010. Preparation and Photocatalytic Activity of Cu₂O Nanoparticles. *Materials Science-Poland*. 28(2): 504–511.
- Lu, X., Xie, S., Yang, H., Tong, Y., & Ji, H. 2014. Photoelectrochemical Hydrogen Production from Biomass Derivatives and Water. *Chemical Society Reviews*. 43(22): 7581–7593.
<https://doi.org/10.1039/c3cs60392j>
- Lv, J., Tang, M., Quan, R., & Chai, Z. 2019. Synthesis of Solar Heat-Reflective ZnTiO₃ Pigments with Novel Roof Cooling Effect. *Ceramics International*. 45(12): 15768–15771.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.05.081>
- Ma, B., Bi, J., Lv, J., Kong, C., Yan, P., Zhao, X., Zhang, X., Yang, T., & Yang, Z. 2021. Inter-embedded Au-Cu₂O Heterostructure for The Enhanced Hydrogen Production from Water Splitting Under The Visible Light. *Chemical Engineering Journal*. 405.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126709>
- Mahmood, N., Islam, M., & Mahmood, A. 2014. *Handbook of Carbon Nanotubes-Polymer Nanocomposites*. LAMBERT Academic Publishing.
- Masoumbeigi, H., & Rezaee, A. 2015. Removal of Methylene Blue (MB) Dye from Synthetic Wastewater Using UV/H₂O₂ Advanced Oxidation Process. *Journal of Health Policy and Sustainable Health*. 2(1): 160–166.
- Meng, S., Zhang, J., Chen, S., Zhang, S., & Huang, W. 2019.

- Perspective on Construction of Heterojunction Photocatalysts and The Complete Utilization of Photogenerated Charge Carriers. *Applied Surface Science*. 476: 982–992. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.01.246>
- Mezhuev, Y. O., Korshak, Y. V., & Shtilman, M. I. 2017. Oxidative polymerization of aromatic amines: kinetic features and possible mechanisms. *Russian Chemical Reviews*. 86(12): 1271–1285. <https://doi.org/10.1070/rcr4755>
- Miao, J., Xie, A., Li, S., Huang, F., Cao, J., & Shen, Y. 2015. A Novel Reducing Graphene/Polyaniline/Cuprous Oxide Composite Hydrogel with Unexpected Photocatalytic Activity for The Degradation of Congo Red. *Applied Surface Science*. 360: 594–600. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.11.005>
- Mihardi, I. 2008. *Karakteristik Optik dan Listrik Polianilin yang di Doped HCl*. Skripsi. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Mohamed, R. M., & Aazam, E. S. 2014. Preparation and Characterization of Core-Shell Polyaniline/Mesoporous Cu₂O Nanocomposites for The Photocatalytic Oxidation of Thiophene. *Applied Catalysis A: General*. 480: 100–107. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2014.04.039>
- Mohammed, A. M., Mohtar, S. S., Aziz, F., Aziz, M., & Ul-Hamid, A. 2021. Cu₂O/ZnO-PANI Ternary Nanocomposite as an Efficient Photocatalyst for The Photodegradation of Congo Red Dye. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 9(2): 105065. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105065>
- Mohammed, A. S., & A, I. 2014. Removal of Methylene Blue Using Low Cost Adsorbent: A Review. *Research Journal of Chemical Sciences*. 4(1): 91–102.
- Mojsov, K. D., Andronikov, D., Janevski, A., Kuzelov, A., & Gaber, S. 2016. The Application of Enzymes for the Removal of Dyes From. *Advanced Technologies*. 5(1): 81–86.
- Momma, K., & Izumi, F. 2011. VESTA 3 for Three-Dimensional Visualization of Crystal, Volumetric and Morphology Data.

- Journal of Applied Crystallography*. 44(6): 1272–1276.
<https://doi.org/10.1107/S0021889811038970>
- Monfort, O., & Plesch, G. 2018. Bismuth Vanadate-Based Semiconductor Photocatalysts: a Short Critical Review on The Efficiency and The Mechanism of Photodegradation of Organic Pollutants. *Environmental Science and Pollution Research*. 25(20): 19362–19379.
<https://doi.org/10.1007/s11356-018-2437-9>
- Monshi, A., Foroughi, M. R., & Monshi, M. R. 2012. Modified Scherrer Equation to Estimate More Accurately Nano-Crystallite Size Using XRD. *World Journal of Nano Science and Engineering*. 2(3): 154–160.
<https://doi.org/10.4236/wjnse.2012.23020>
- Mrunal, V. K., Vishnu, A. K., Momin, N., & Manjanna, J. 2019. Cu₂O Nanoparticles for Adsorption and Photocatalytic Degradation of Methylene Blue Dye from Aqueous Medium. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*. 12: 100265.
<https://doi.org/10.1016/j.enmm.2019.100265>
- Mustika, I., Indrawati, A., & Warsyidah, A. A. 2018. Uji Efektifitas Biji Kelor (*Moringa Oleifera*) Terhadap Penurunan Kadar Besi (Fe) Air Sumur Gali Di Desa Buhung Bundang Kecamatan Bontotiro Kabupaten Bulukumba. *Jurnal Media Laboran*. 8(1): 9–14.
- Muthukumar, M., Niranjani, S., Samuel Barnabas, K., Narayanan, V., Raju, T., & Venkatachalam, K. 2019. Green Route Synthesis and Characterization of Cuprous Oxide (Cu₂O): Visible Light Irradiation Photocatalytic Activity of MB Dye. *Materials Today*. 14: 563–568.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.04.179>
- Nadhila, H., & Nuzlia, C. 2021. Analisis Kadar Nitrit Pada Air Bersih Dengan Metode Spektrofotometri Uv-Vis. *Amina*. 1(3): 132–138.
<https://doi.org/10.22373/amina.v1i3.492>
- Naimah, S., Balai, R. E., Kimia, B., Kemasan, D., & Perindustrian, K. 2011. Efek Fotokatalisis Nano TiO₂ Terhadap

- Mekanisme Antimikrobia E coli dan Salmonella. *Jurnal Riset Industri*. 2: 113–120.
- Nair, M. G., Nirmala, M., Rekha, K., & Anukaliani, A. 2011. Structural, Optical, Photocatalytic and Antibacterial Activity of ZnO and Co Doped ZnO Nanoparticles. *Materials Letters*. 65(12): 1797–1800. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2011.03.079>
- Nasution, A. Y., Mardhiyani, D., Putriani, K., Ananda, D., & Saputro, V. 2019. Perbandingan Kadar Vitamin C Pada Nanas Segar dan Keripik Nanas Dengan Metode Spektrofotometri UV-Vis. *JOPS (Journal Of Pharmacy and Science)*. 3(1): 15–20. <https://doi.org/10.36341/jops.v3i1.1067>
- Novarini, O. E., & Wahyudi, T. 2011. Menggunakan Surfaktan Sebagai Stabilisator dan Aplikasinya Pada Pembuatan Tekstil Anti Bakteri Synthesis Of Zinc Oxide (ZnO) Nanoparticles Using Surfactant As A Stabilizing Agent and It's Applications In Antibacterial Textiles Fabrication. *Arena Tekstil Volume*. 26(2): 81–87.
- Osman, D. A. M., & Mustafa, A. M. 2015. Synthesis and Characterization of Zinc Oxide Nanoparticles using Zinc Acetate Dihydrate and Sodium Hydroxide. *Journal of Nanoscience and Nanoengineering*. 1(4): 248–251. <http://www.aiscience.org/journal/jnnhttp://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>
- Özgür, Ü., Alivov, Y. I., Liu, C., Teke, A., Reshchikov, M. A., Doğan, S., Avrutin, V., Cho, S. J., & Morkoç, H. 2005. A Comprehensive Review of ZnO Materials and Devices. *Journal of Applied Physics*. 98(4): 1–103. <https://doi.org/10.1063/1.1992666>
- Pawar, R. C., Shaikh, J. S., Babar, A. A., Dhere, P. M., & Patil, P. S. 2011. Aqueous Chemical Growth of ZnO Disks, Rods, Spindles and Flowers: pH Dependency and Photoelectrochemical Properties. *Solar Energy*. 85(5): 1119–1127. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.03.008>

- Purba, F. J., Tarigan, K., Sitorus, Z., Frida, E., Bukit, N., & Simbolon, D. H. 2022. Cu₂O/ZnO Nanocomposite and Oxide with Photocatalysis for Textile Dyes/Dye Reduction. *Journal of Tianjin University Science and Technology*. 55(02): 388–398.
<https://doi.org/10.17605/OSF.IO/3JD56>
- Putra, B. B. P. 2019. *Sintesis dan Karakterisasi Fotokatalis TiO₂ Anatas/Rutil Variasi Komposisi sebagai Pendegradasi Zat Warna Metilen Biru*. Skripsi. Malang: Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim.
- Putri, M. P. 2022. *Sintesis Dan Karakterisasi Komposit Cu/CuO-Cu₂O/Karbon Aktif Sebagai Katalis Pada Isomerisasi N-Heptana*. Yogyakarta: Universitas Islam Indonesia.
- Qodri, A. A. 2011. *Fotodegradasi Zat Warna Remazol Yellow FG dengan Fotokatalis Komposit TiO₂/SiO₂*. Skripsi. Surakarta: Universitas Sebelas Maret.
- Quintana, M., Edvinsson, T., Hagfeldt, A., & Boschloo, G. 2007. Comparison of Dye-Sensitized ZnO and TiO₂ Solar Cells: Studies of Charge Transport and Carrier Lifetime. *Journal of Physical Chemistry C*. 111(2): 1035–1041.
<https://doi.org/10.1021/jp065948f>
- Raveendra, R. S., Prashanth, P. A., Hari Krishna, R., Bhagya, N. P., Nagabhushana, B. M., Raja Naika, H., Lingaraju, K., Nagabhushana, H., & Daruka Prasad, B. 2014. Synthesis, Structural Characterization of Nano ZnTiO₃ Ceramic: An Effective Azo Dye Adsorbent and Antibacterial Agent. *Journal of Asian Ceramic Societies*. 2(4): 357–365.
<https://doi.org/10.1016/j.jascer.2014.07.008>
- Regmi, C., Joshi, B., Ray, S. K., Gyawali, G., & Pandey, R. P. 2018. Understanding Mechanism of Photocatalytic Microbial Decontamination of Environmental Wastewater. *Frontiers in Chemistry*. 6(33): 1–6.
<https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00033>
- Rej, S., Bisetto, M., Naldoni, A., & Fornasiero, P. 2021. Well-defined Cu₂O Photocatalysts for Solar Fuels and Chemicals. *Journal of Materials Chemistry A*. 9(10): 5915–

5951. <https://doi.org/10.1039/d0ta10181h>
- Riyanto, & Julianto, T. S. 2004. Degradasi Senyawa Metilen Biru dengan Metode Elektrolisis Menggunakan Elektroda Platinum. *Jurnal Universitas Islam Indonesia*. 1–10.
- Rockett, A. 2008. *The Materials Science of Semiconductors*. Springer. <https://doi.org/10.1201/9780429298035-3>
- Roy, A., Jadhav, H. S., & Gil Seo, J. 2021. Cu₂O/CuO Electrocatalyst for Electrochemical Reduction of Carbon Dioxide to Methanol. *Electroanalysis*. 33(3): 705–712. <https://doi.org/10.1002/elan.202060265>
- Ruzimuradov, O., Nurmanov, S., Hojamberdiev, M., Prasad, R. M., Gurlo, A., Broetz, J., Nakanishi, K., & Riedel, R. 2014. Preparation and characterization of macroporous TiO₂-SrTiO₃ heterostructured monolithic photocatalyst. *Materials Letters*. 116: 353–355. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2013.11.065>
- Saba, A. K. 2019. *Green Synthesis SnO₂NPs dengan Ekstrak Daun Bayam Merah (Amaranthus tricolor L.) untuk Aplikasi Fotodegradasi Zat Warna Bromophenol Blue*. Skripsi. Yogyakarta: Universitas Islam Indonesia.
- Sakthivel, S., Neppolian, B., Shankar, M. V., Arabindoo, B., Palanichamy, M., & Murugesan, V. 2003. Solar Photocatalytic Degradation of Azo Dye: Comparison of Photocatalytic Efficiency of ZnO and TiO₂. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 77(1): 65–82. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(02\)00255-6](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(02)00255-6)
- Sanjaya, H., Rida, P., & Nigsih, S. K. W. (2017). Degradasi Methylene Blue Menggunakan Katalis ZnO-PEG Dengan Metode Fotosonolisis. *Eksakta: Berkala Ilmiah Bidang MIPA*. 18(2): 21–29. <https://doi.org/10.24036/eksakta/vol18-iss02/45>
- Sapurina, I., & Shishov, M. A. 2008. Oxidative Polymerization of Aniline: Molecular Synthesis of Polyaniline and The Formation of Supramolecular Polyaniline Structures. *Polymer International*. 57(12): 1295–1325. <https://doi.org/10.1002/pi.2476>

- Saravanan, R., Sacari, E., Gracia, F., Khan, M. M., Mosquera, E., & Gupta, V. K. 2016. Conducting PANI Stimulated ZnO System for Visible Light Photocatalytic Degradation of Coloured Dyes. *Journal of Molecular Liquids*. 221: 1029–1033. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.06.074>
- Sari, N. W., Fajri, M. Y., & W., A. 2018. Analisis Fitokimia dan Gugus Fungsi Dari Ekstrak Etanol Pisang Goroho Merah (*Musa Acuminata* (L)). *Indonesian Journal of Biotechnology and Biodiversity*. 2(1): 30–34.
- Sasmal, A. K., Pal, J., Sahoo, R., Kartikeya, P., Dutta, S., & Pal, T. 2016. Superb Dye Adsorption and Dye-Sensitized Change in Cu₂O-Ag Crystal Faces in The Dark. *Journal of Physical Chemistry C*. 120(38): 21580–21588. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b07300>
- Sato, T., Masaki, K., Sato, K. I., Fujishiro, Y., & Okuwaki, A. 1996. Photocatalytic Properties of Layered Hydrous Titanium Oxide/CdS-ZnS Nanocomposites Incorporating CdS-ZnS Into The Interlayer. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 67(4): 339–344. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4660\(199612\)67:4<339::AID-JCTB585>3.0.CO;2-1](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4660(199612)67:4<339::AID-JCTB585>3.0.CO;2-1)
- Scibioh, M. A., & Viswanathan, B. 2020. Fundamentals and Energy Storage Mechanisms-Overview. *Materials for Supercapacitor Applications*. 15–33. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819858-2.00002-0>
- Simonescu, C. M. 2012. Application of FTIR Spectroscopy in Environmental Studies. *Advanced Aspects of Spectroscopy*. Intech: 77–86. <https://doi.org/10.5772/48331>
- Sowmyashree, A. S., Somya, A., Kumar, C. B. P., & Rao, S. 2021. Novel Nano Corrosion Inhibitor, Integrated Zinc Titanate Nanoparticles: Synthesis, Characterization, Thermodynamic and Electrochemical Studies. *Surfaces and Interfaces*. 22: 100812. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100812>
- Su, Y. 2018. *Copper Oxide Nano Photocatalyst for Wastewater Purification using Visible Light*. Dissertation. Cambridge:

University of Cambridge.

- Sutanto, H., Nurhasanah, I., Hidayanto, E., Arifin, Z., Tipis, L., Coating, S., & Blue, M. 2013. Deposis Lapisan Tipis Fotokatalis Seng Oksida (ZnO) Berukuran Nano dengan Teknik Penyemprotan dan Aplikasinya untuk Pendegradasi Pewarna Methylene Blue. *Jurnal Fisika Unnes*. 3(1): 69–75.
- Syahirah, A. N., & Cahyati, R. 2021. Indonesian Journal of Chemical Science and Technology. *Articel*. 4(2): 61–65.
- Tavakoli-Azar, T., Mahjoub, A. R., Sadjadi, M. S., Farhadyar, N., & Sadr, M. H. 2020. Improving the Photocatalytic Performance of a Perovskite ZnTiO₃ Through ZnTiO₃@S Nanocomposites for Degradation of Crystal Violet and Rhodamine B Pollutants Under Sunlight. *Inorganic Chemistry Communications*. 119: 108091. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2020.108091>
- Tran, M. H., Cho, J. Y., Sinha, S., Gang, M. G., & Heo, J. 2018. Cu₂O/ZnO Heterojunction Thin-film Solar Cells: The Effect of Electrodeposition Condition and Thickness of Cu₂O. *Thin Solid Films*. 661: 132–136. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2018.07.023>
- Ungula, J., & Dejene, B. F. 2016. Effect of Solvent Medium on The Structural, Morphological and Optical Properties of ZnO Nanoparticles Synthesized by The Sol-gel Method. *Physica B: Condensed Matter*. 480: 26–30. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2015.10.007>
- Vijayalakshmi, S., Kumar, E., Ganeshbabu, M., Venkatesh, P. S., & Rathnakumar, K. 2021. Structural, Electrical, and Photocatalytic Investigations of PANI/ZnO Nanocomposites. *Ionics*. 27(7): 2967–2977. <https://doi.org/10.1007/s11581-021-04041-w>
- Wang, H., Duan, M., Guo, Y., Wang, C., Shi, Z., Liu, J., & Lv, J. 2018. Graphene Oxide Edge Grafting of Polyaniline Nanocomposite: An Efficient Adsorbent for Methylene Blue and Methyl Orange. *Water Science and Technology*. 77(12): 2751–2760.

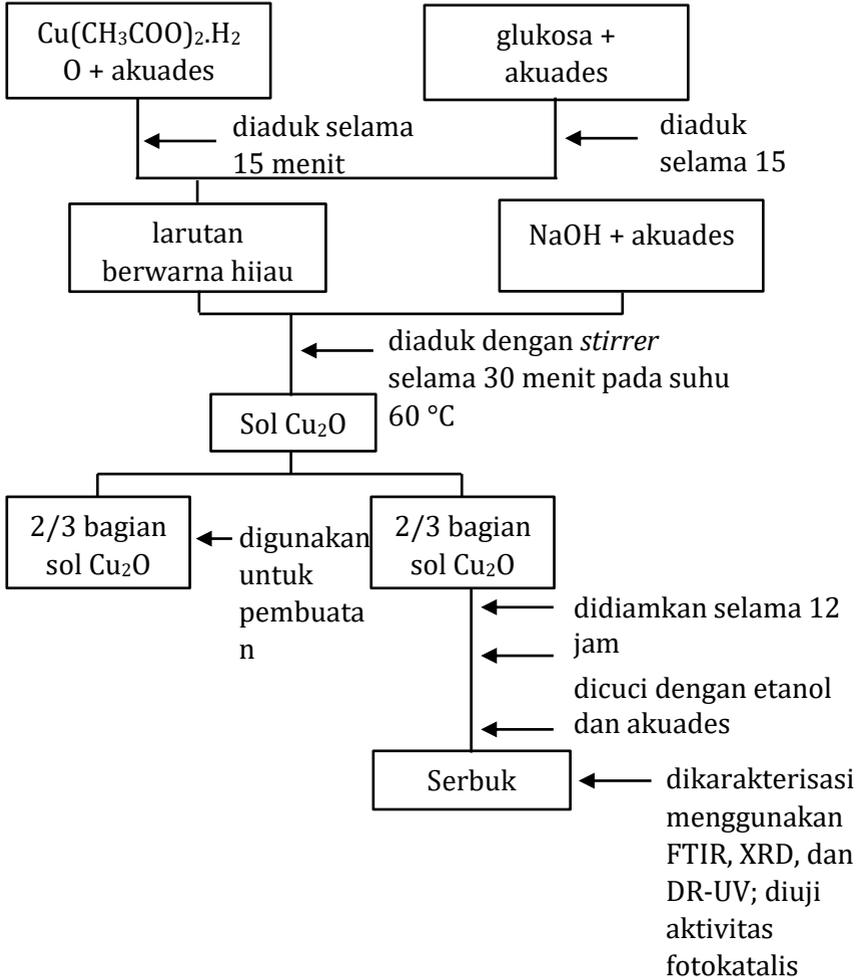
- <https://doi.org/10.2166/wst.2018.250>
- Wang, J. 2015. *Development of Graphitic Carbon Nitride Based Semiconductor Photocatalysts for Organic Pollutant Degradation*. Doctoral Thesis. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology.
- Wang, Q., Liu, Z., Zhang, S., Cui, Y., Gao, S., & Wang, Y. 2019. Hydrothermal Deposition of Cu₂O-Ag Nanoparticles Co-Sensitized TiO₂ Nanotube Arrays and Their Enhanced Photoelectrochemical Performance. *Separation and Purification Technology*. 211: 866–872. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.10.060>
- Wang, X., Chen, G., & Zhang, J. 2013. Synthesis and Characterization of Novel Cu₂O/PANI Composite Photocatalysts with Enhanced Photocatalytic Activity and Stability. *Catalysis Communications*. 31: 57–61. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2012.11.012>
- Wang, Y., Gao, J., Wang, X., Jin, L., Fang, L., Zhang, M., He, G., & Sun, Z. 2018. Facile Synthesis of Core-Shell ZnO/Cu₂O Heterojunction with Enhanced Visible Light-Driven Photocatalytic Performance. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. 88(1): 172–180. <https://doi.org/10.1007/s10971-018-4786-8>
- Wati, A. M., Mahatmanti, F. W., Jumaeri, J., & Prasetya, A. T. 2021. Adsorpsi Metilen Biru oleh Abu Layang Batu Bara yang Teraktivasi Menggunakan Proses Hidrotermal dengan Bantuan Gelombang Mikro. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*. 18(1): 58. <https://doi.org/10.20961/alchemy.18.1.50935.58-69>
- Widihati, I., Diantariani, N., & Nikmah, Y. 2011. Fotodegradasi Metilen Biru Dengan Sinar UV dan Katalis Al₂O₃. *Jurnal Kimia*. 5(1): 31–42.
- Widiyanti, N., & Primary Putri, N. 2018. Sintesis Polianilin Dengan Metode Interfasial Menggunakan Variasi Larutan Dalam Fasa Organik. *Inovasi Fisika Indonesia*. 7(02): 71–73.
- Will, G. 2006. *The Rietveld Method and The Two Stage Method*

to Determine and Refine Crystal Structures from Powder Diffraction Data. New York: Springer.

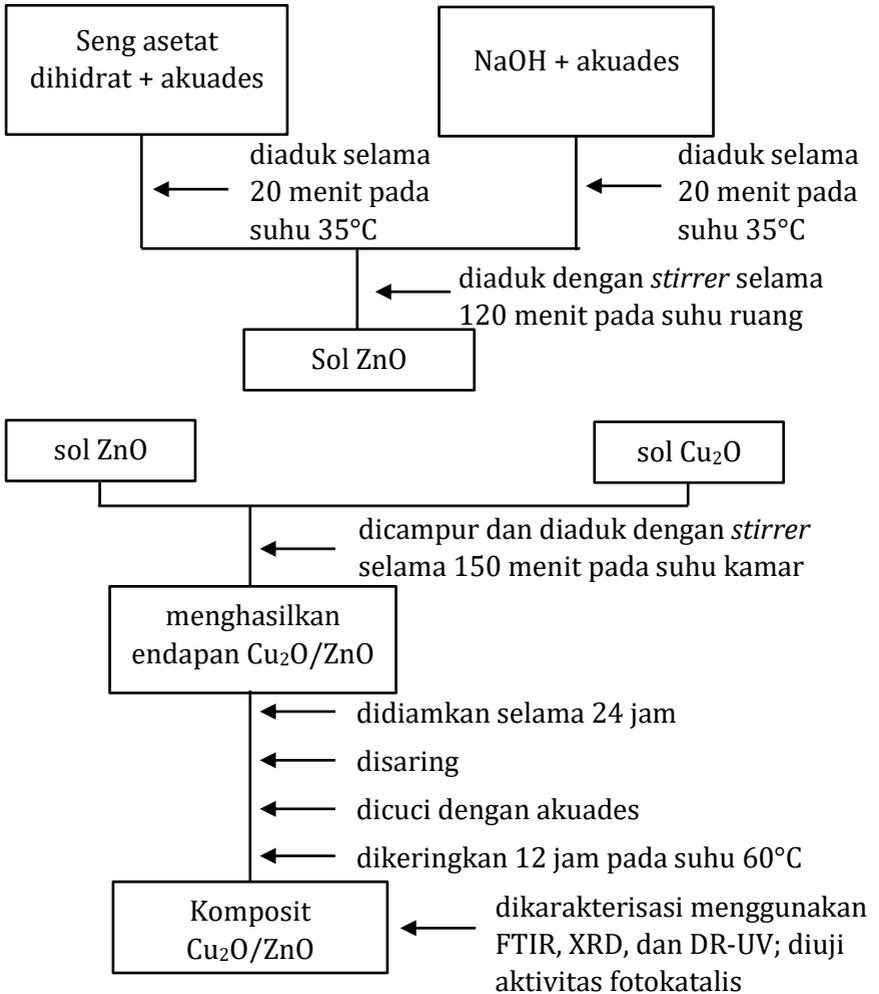
- Xu, Y., Wang, H., Yu, Y., Tian, L., Zhao, W., & Zhang, B. 2011. Cu₂O Nanocrystals: Surfactant-free Room-Temperature Morphology-Modulated Synthesis and Shape-dependent Heterogeneous Organic Catalytic Activities. *Journal of Physical Chemistry C*. 115(31): 15288–15296. <https://doi.org/10.1021/jp204982q>
- Zheng, Z., Huang, B., Wang, Z., Guo, M., Qin, X., Zhang, X., Wang, P., & Dai, Y. 2009. Crystal Faces of Cu₂O and Their Stabilities in Photocatalytic Reactions. *Journal of Physical Chemistry C*. 113(32): 14448–14453. <https://doi.org/10.1021/jp904198d>

LAMPIRAN

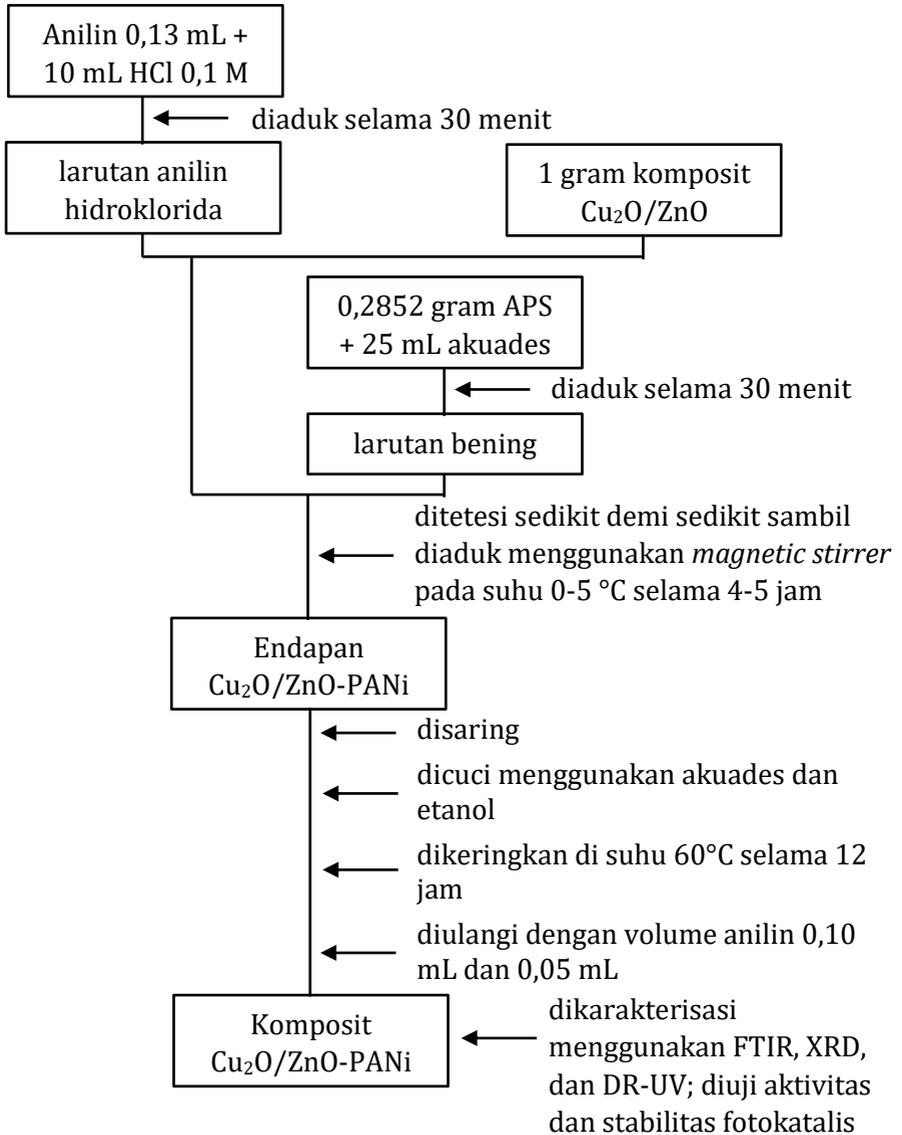
Lampiran 1 Diagram alir Sintesis Cu₂O Murni



Sintesis Komposit Biner Cu₂O/ZnO



Sintesis Komposit Terner $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ -PANi



Lampiran 2 Panjang Gelombang Maksimum Metilen Biru

λ (nm)	Abs	λ (nm)	Abs	λ (nm)	Abs	λ (nm)	Abs
400	0,004	424	0,003	448	0,003	472	0,004
401	0,004	425	0,003	449	0,003	473	0,004
402	0,004	426	0,003	450	0,003	474	0,004
403	0,004	427	0,003	451	0,003	475	0,004
404	0,004	428	0,003	452	0,003	476	0,004
405	0,004	429	0,003	453	0,003	477	0,004
406	0,004	430	0,003	454	0,003	478	0,004
407	0,004	431	0,003	455	0,003	479	0,004
408	0,004	432	0,003	456	0,003	480	0,004
409	0,004	433	0,003	457	0,004	481	0,004
410	0,004	434	0,003	458	0,004	482	0,005
411	0,004	435	0,003	459	0,003	483	0,005
412	0,003	436	0,003	460	0,004	484	0,005
413	0,004	437	0,003	461	0,004	485	0,005
414	0,004	438	0,003	462	0,004	486	0,005
415	0,004	439	0,003	463	0,004	487	0,005
416	0,004	440	0,003	464	0,004	488	0,005
417	0,004	441	0,003	465	0,004	489	0,005
418	0,004	442	0,003	466	0,004	490	0,005
419	0,003	443	0,003	467	0,004	491	0,005
420	0,003	444	0,003	468	0,004	492	0,005
421	0,004	445	0,003	469	0,004	493	0,005
422	0,003	446	0,003	470	0,004	494	0,005
423	0,003	447	0,003	471	0,004	495	0,005

λ (nm)	Abs	λ (nm)	Abs	λ (nm)	Abs	λ (nm)	Abs
496	0,005	521	0,005	546	0,008	571	0,015
497	0,005	522	0,005	547	0,008	572	0,015
498	0,005	523	0,006	548	0,009	573	0,016
499	0,005	524	0,005	549	0,009	574	0,016
500	0,005	525	0,006	550	0,008	575	0,017
501	0,005	526	0,006	551	0,01	576	0,017
502	0,005	527	0,006	552	0,009	577	0,018
503	0,006	528	0,006	553	0,009	578	0,019
504	0,005	529	0,006	554	0,01	579	0,019
505	0,006	530	0,006	555	0,009	580	0,019
506	0,006	531	0,006	556	0,01	581	0,02
507	0,005	532	0,007	557	0,011	582	0,021
508	0,004	533	0,006	558	0,012	583	0,021
509	0,006	534	0,006	559	0,012	584	0,021
510	0,005	535	0,007	560	0,012	585	0,023
511	0,005	536	0,007	561	0,011	586	0,022
512	0,006	537	0,007	562	0,012	587	0,024
513	0,005	538	0,007	563	0,012	588	0,025
514	0,005	539	0,007	564	0,012	589	0,025
515	0,005	540	0,007	565	0,013	590	0,027
516	0,006	541	0,007	566	0,012	591	0,026
517	0,005	542	0,008	567	0,013	592	0,027
518	0,005	543	0,007	568	0,014	593	0,029
519	0,005	544	0,007	569	0,014	594	0,029
520	0,006	545	0,008	570	0,014	595	0,03

λ (nm)	Abs	λ (nm)	Abs	λ (nm)	Abs	λ (nm)	Abs
596	0,032	621	0,048	646	0,071	671	0,09
597	0,032	622	0,047	647	0,071	672	0,086
598	0,033	623	0,047	648	0,074	673	0,084
599	0,035	624	0,048	649	0,074	674	0,081
600	0,035	625	0,048	650	0,076	675	0,078
601	0,036	626	0,049	651	0,079	676	0,075
602	0,038	627	0,049	652	0,081	677	0,071
603	0,038	628	0,049	653	0,081	678	0,067
604	0,04	629	0,05	654	0,084	679	0,064
605	0,041	630	0,05	655	0,085	680	0,059
606	0,041	631	0,051	656	0,085	681	0,055
607	0,042	632	0,051	657	0,089	682	0,051
608	0,042	633	0,052	658	0,087	683	0,048
609	0,042	634	0,053	659	0,089	684	0,044
610	0,044	635	0,054	660	0,092	685	0,04
611	0,044	636	0,054	661	0,091	686	0,037
612	0,044	637	0,057	662	0,093	687	0,035
613	0,045	638	0,058	663	0,093	688	0,03
614	0,046	639	0,057	664	0,092	689	0,027
615	0,047	640	0,061	665	0,094	690	0,025
616	0,047	641	0,062	666	0,093	691	0,021
617	0,047	642	0,062	667	0,093	692	0,019
618	0,046	643	0,064	668	0,093	693	0,018
619	0,047	644	0,066	669	0,09	694	0,017
620	0,047	645	0,068	670	0,09	695	0,015

λ (nm)	Abs
696	0,013
697	0,012
698	0,011
699	0,009
700	0,009

Lampiran 3 Perhitungan Pembuatan Larutan Matilen Biru

- Pembuatan larutan induk MB 1000 ppm

Melarutkan 0,1 gram padatan MB ke dalam 100 mL akuades dengan labu ukur 100 mL. Perhitungannya adalah sebagai berikut:

$$1 \text{ ppm} = 1 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

$$1000 \text{ ppm} = 1000 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

$$1000 \text{ ppm} = \frac{1000 \text{ mg}}{1000 \text{ mL}}$$

$$1000 \text{ ppm} = \frac{100 \text{ mg}}{100 \text{ mL}}$$

Artinya 100 mg (atau 0,1 gram) MB dalam 100 mL akuades.

- Pembuatan larutan MB 100 ppm dari larutan induk MB 1000 ppm

$$V_1 \times M_1 = V_2 \times M_2$$

$$V_1 \times 1000 \text{ ppm} = 100 \text{ mL} \times 100 \text{ ppm}$$

$$V_1 = \frac{100 \text{ mL} \times 100 \text{ ppm}}{1000 \text{ ppm}}$$

$$V_1 = 10 \text{ mL}$$

- Pembuatan larutan MB 2 ppm dari larutan MB 100 ppm

$$V_1 \times M_1 = V_2 \times M_2$$

$$V_1 \times 100 \text{ ppm} = 50 \text{ mL} \times 2 \text{ ppm}$$

$$V_1 = \frac{50 \text{ mL} \times 2 \text{ ppm}}{100 \text{ ppm}}$$

$$V_1 = 1 \text{ mL}$$

- **Pembuatan larutan MB 4 ppm dari larutan MB 100 ppm**

$$V_1 \times M_1 = V_2 \times M_2$$

$$V_1 \times 100 \text{ ppm} = 50 \text{ mL} \times 4 \text{ ppm}$$

$$V_1 = \frac{50 \text{ mL} \times 4 \text{ ppm}}{100 \text{ ppm}}$$

$$V_1 = 2 \text{ mL}$$

- **Pembuatan larutan MB 6 ppm dari larutan MB 100 ppm**

$$V_1 \times M_1 = V_2 \times M_2$$

$$V_1 \times 100 \text{ ppm} = 50 \text{ mL} \times 6 \text{ ppm}$$

$$V_1 = \frac{50 \text{ mL} \times 6 \text{ ppm}}{100 \text{ ppm}}$$

$$V_1 = 3 \text{ mL}$$

- **Pembuatan larutan MB 8 ppm dari larutan MB 100 ppm**

$$V_1 \times M_1 = V_2 \times M_2$$

$$V_1 \times 100 \text{ ppm} = 50 \text{ mL} \times 8 \text{ ppm}$$

$$V_1 = \frac{50 \text{ mL} \times 8 \text{ ppm}}{100 \text{ ppm}}$$

$$V_1 = 4 \text{ mL}$$

- **Pembuatan larutan MB 10 ppm dari larutan MB 100 ppm**

$$V_1 \times M_1 = V_2 \times M_2$$

$$V_1 \times 100 \text{ ppm} = 50 \text{ mL} \times 10 \text{ ppm}$$

$$V_1 = \frac{50 \text{ mL} \times 10 \text{ ppm}}{100 \text{ ppm}}$$

$$V_1 = 5 \text{ mL}$$

- **Pembuatan larutan MB 10 ppm dari larutan MB 100 ppm ke dalam 100 mL akuades**

$$V_1 \times M_1 = V_2 \times M_2$$

$$V_1 \times 100 \text{ ppm} = 100 \text{ mL} \times 10 \text{ ppm}$$

$$V_1 = \frac{100 \text{ mL} \times 10 \text{ ppm}}{100 \text{ ppm}}$$

$$V_1 = 10 \text{ mL}$$

Lampiran 4 Data Absorbansi Larutan Standar MB pada Panjang Gelombang 665 nm

Konsentrasi (ppm)	Absorbansi (A)
0	0
2	0,107
4	0,212
6	0,309
8	0,402
10	0,522

Lampiran 5 Perhitungan Persen Degradasi Zat warna Metilen Biru

Data absorbansi dari uji fotokadegradasi MB adalah sebagai berikut:

Fotokatalis	Absorbansi	
	Percobaan Ke-1	Percobaan Ke-2
Cu ₂ O	0,1053	0,1020
Cu ₂ O/ZnO	0,0983	0,0917
Cu ₂ O/ZnO-PANi(0,03)	0,0733	0,0770
Cu ₂ O/ZnO-PANi(0,05)	0,0627	0,0673
Cu ₂ O/ZnO-PANi(0,10)	0,0517	0,0550

Data absorbansi dari uji stabilitas dengan fotokatalis Cu₂O/ZnO-PANi(0,10) adalah sebagai berikut:

Siklus	Absorbansi	
	Percobaan Ke-1	Percobaan Ke-2
Ke-1	0,0517	0,0550
Ke-2	0,0663	0,0637
Ke-3	0,0803	0,0850

Perhitungan persen degradasi yaitu menggunakan rumus :

$$\text{Fotodegradasi (\%)} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% \quad , \quad \text{dengan persamaan}$$

regresi linear $y = 0,0513x + 0,0021$.

a. Fotokatalis Cu₂O percobaan ke-1

$$C_t = \frac{0,1053 - 0,0021}{0,0513} \quad \% D = \frac{10 - 2,01234}{10} \times 100 \%$$

$$= 2,01234 \quad = 79,88 \%$$

b. Fotokatalis Cu₂O percobaan ke-2

$$C_t = \frac{0,1020 - 0,0021}{0,0513} \quad \% D = \frac{10 - 1,9473}{10} \times 100 \%$$

$$= 1,9473 \quad = 80,53 \%$$

c. Fotokatalis Cu₂O/ZnO percobaan ke-1

$$C_t = \frac{0,0983 - 0,0021}{0,0513} \quad \% D = \frac{10 - 1,8759}{10} \times 100 \%$$

$$= 1,8759 \quad = 81,24 \%$$

d. Fotokatalis Cu₂O/ZnO percobaan ke-2

$$C_t = \frac{0,0917 - 0,0021}{0,0513} \quad \% D = \frac{10 - 1,7459}{10} \times 100 \%$$

$$= 1,7459 \quad = 82,54 \%$$

e. Fotokatalis Cu₂O/ZnO-PANi(0,03) percobaan ke-1

$$C_t = \frac{0,0733 - 0,0021}{0,0513} \quad \% D = \frac{10 - 1,3887}{10} \times 100 \%$$

$$= 1,3887 \quad = 86,11 \%$$

f. Fotokatalis Cu₂O/ZnO-PANi(0,03) percobaan ke-2

$$C_t = \frac{0,0770 - 0,0021}{0,0513} \quad \% D = \frac{10 - 1,4600}{10} \times 100 \%$$

$$= 1,4600 \quad = 85,40 \%$$

g. Fotokatalis Cu₂O/ZnO-PANi(0,05) percobaan ke-1

$$C_t = \frac{0,0627 - 0,0021}{0,0513} \quad \% D = \frac{10 - 1,1806}{10} \times 100 \%$$

$$= 1,1806 \quad = 88,19 \%$$

h. Fotokatalis Cu₂O/ZnO-PANi(0,05) percobaan ke-2

$$C_t = \frac{0,0673 - 0,0021}{0,0513} \quad \% D = \frac{10 - 1,2716}{10} \times 100 \%$$

$$= 1,2716 \quad = 87,28 \%$$

i. Fotokatalis Cu₂O/ZnO-PANi(0,10) percobaan ke-1

$$C_t = \frac{0,0517 - 0,0021}{0,0513} \quad \% D = \frac{10 - 0,9662}{10} \times 100 \%$$

$$= 0,9662 \quad = 90,34\%$$

j. Fotokatalis Cu₂O/ZnO-PANi(0,10) percobaan ke-2

$$C_t = \frac{0,0550 - 0,0021}{0,0513} \quad \% D = \frac{10 - 1,0312}{10} \times 100 \%$$

$$= 1,0312 \quad = 89,69\%$$

k. Uji Stabilitas siklus ke-1, percobaan ke-1

$$C_t = \frac{0,0517 - 0,0021}{0,0513} \quad \% D = \frac{10 - 0,9662}{10} \times 100 \%$$

$$= 0,9662 \quad = 90,34 \%$$

l. Uji stabilitas siklus ke-1, percobaan ke-2

$$C_t = \frac{0,0550 - 0,0021}{0,0513} \quad \% D = \frac{10 - 1,0312}{10} \times 100 \%$$

$$= 1,0312 \quad = 89,69 \%$$

m. Uji Stabilitas siklus ke-2, percobaan ke-1

$$C_t = \frac{0,0663 - 0,0021}{0,0513} \quad \% D = \frac{10 - 1,2521}{10} \times 100 \%$$

$$= 1,2521 \quad = 87,48 \%$$

n. Uji stabilitas siklus ke-2, percobaan ke-2

$$C_t = \frac{0,0637 - 0,0021}{0,0513} \quad \% D = \frac{10 - 1,200}{10} \times 100 \%$$

$$= 1,200 \quad = 87,99 \%$$

o. Uji Stabilitas siklus ke-3, percobaan ke-1

$$C_t = \frac{0,0803 - 0,0021}{0,0513} \quad \% D = \frac{10 - 1,5250}{10} \times 100 \%$$

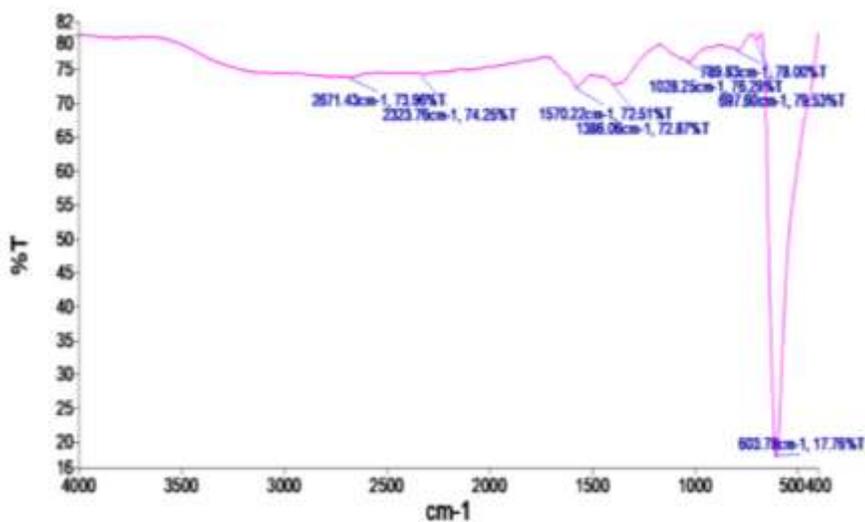
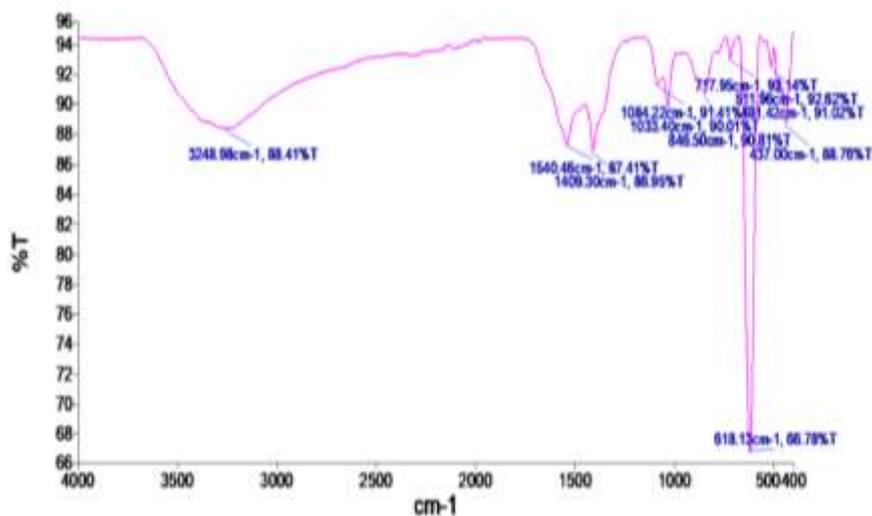
$$= 1,5250 \quad = 84,75 \%$$

p. Uji stabilitas siklus ke-3, percobaan ke-2

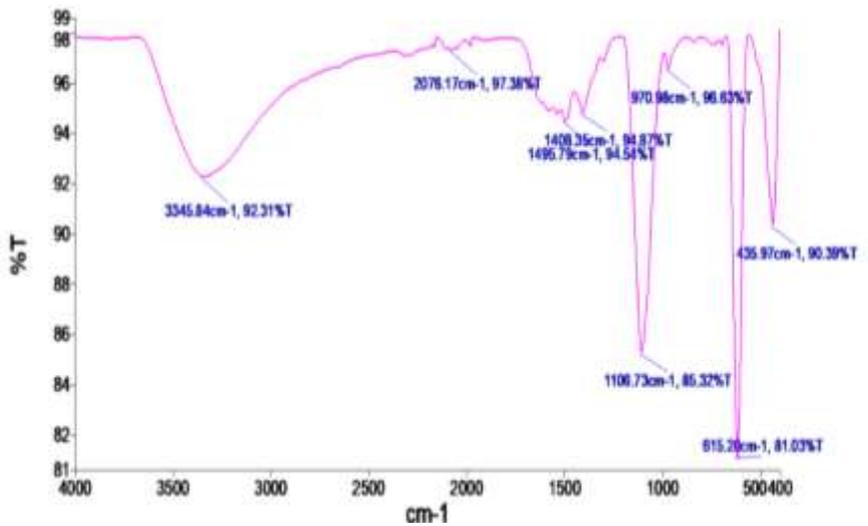
$$C_t = \frac{0,0850 - 0,0021}{0,0513} \quad \% D = \frac{10 - 1,6160}{10} \times 100 \%$$

$$= 1,6160 \quad = 83,84 \%$$

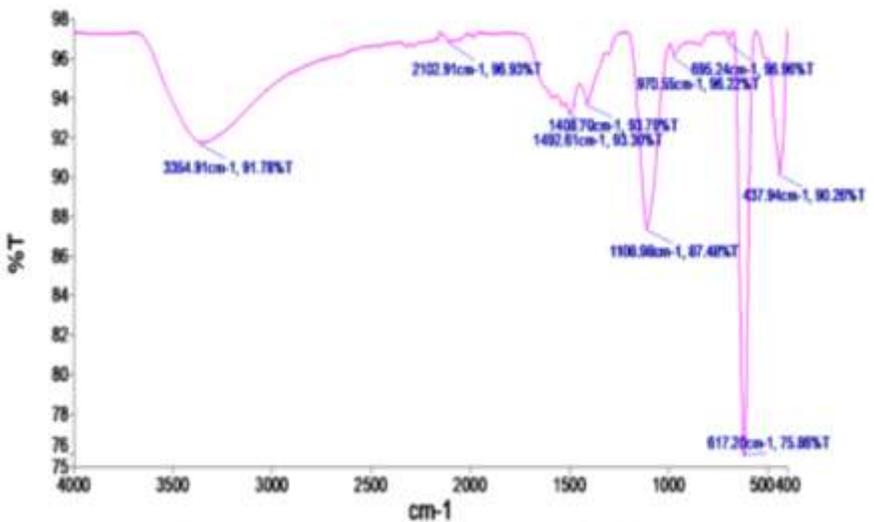
Lampiran 6 Spektrum FTIR

Spektrum FTIR Cu₂OSpektrum FTIR Cu₂O/ZnO

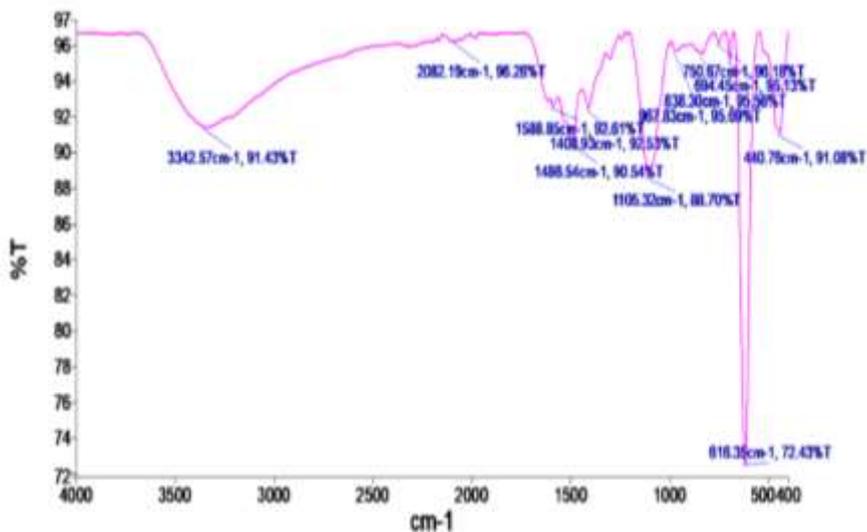
Spektrum FTIR Cu₂O/ZnO-PANi(0,03)



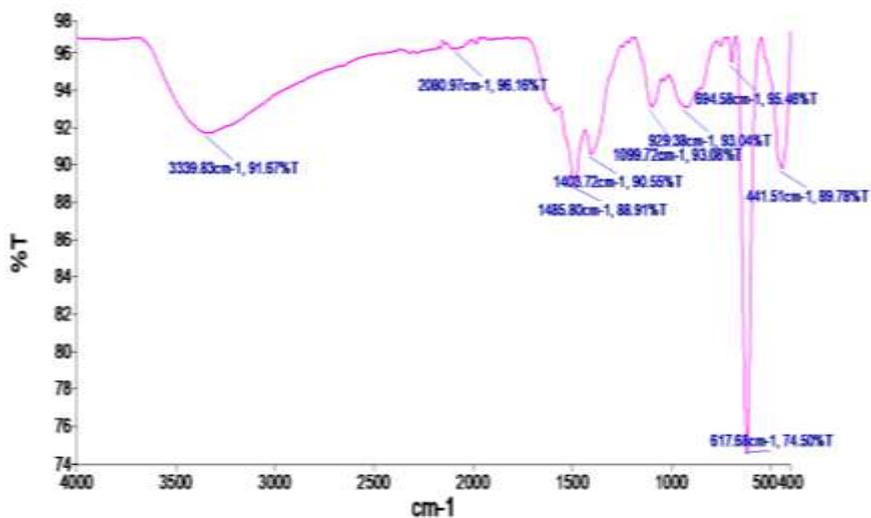
Spektrum FTIR Cu₂O/ZnO-PANi(0,05)

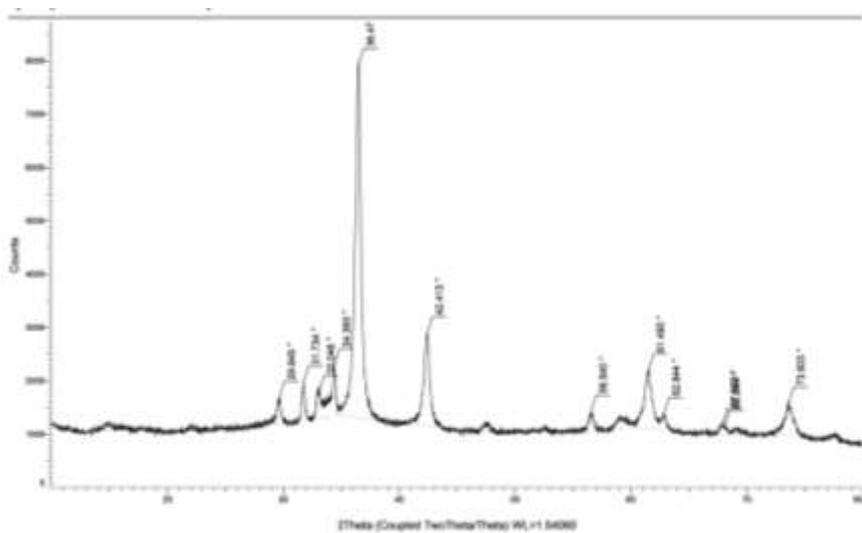
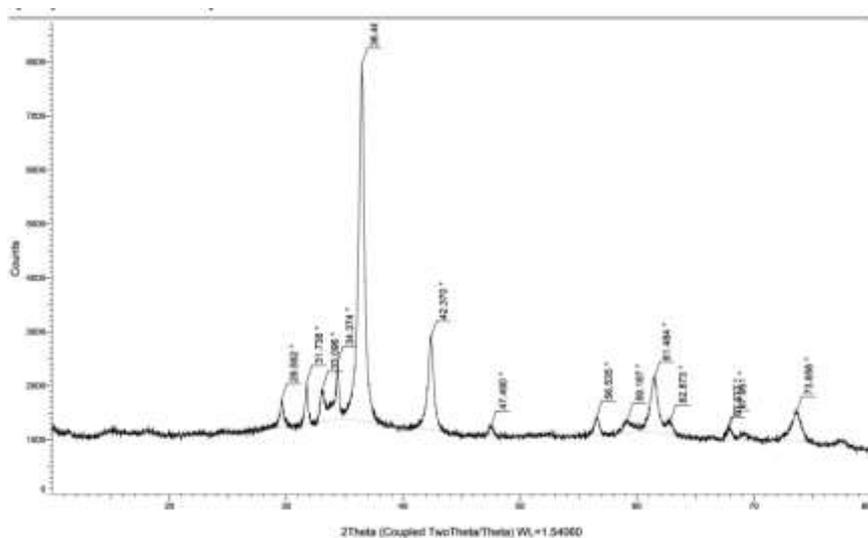


Spektrum FTIR $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANi}(0,10)$



Spektrum FTIR $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO-PANi}(0,10)$ Setelah Uji Stabilitas



Pola XRD Cu₂O/ZnO-PANi(0,10)**Pola XRD Cu₂O/ZnO-PANi Setelah Uji Stabilitas**

Lampiran 8 Perhitungan Ukuran Kristal

Ukuran Kristal Rata-rata Cu₂O

Puncak pada 2θ	= 36,50448
FWHM	= 0,43672
β (rad)	= 0,007622202
θ (°)	= 0,318561684

$$D = \frac{k\lambda}{\beta_{hkl}\cos\theta}$$

$$D = \frac{0,9 \times 0,15406}{0,007622202 \times \cos(36,50448)}$$

$$D = 19,15453065 \text{ nm}$$

Puncak pada 2θ	= 42,38781
FWHM	= 0,65362
β (rad)	= 0,011407821
θ (°)	= 0,369903424

$$D = \frac{k\lambda}{\beta_{hkl}\cos\theta}$$

$$D = \frac{0,9 \times 0,15406}{0,011407821 \times \cos(0,369903424)}$$

$$D = 13,0360199 \text{ nm}$$

Puncak pada 2θ	= 61,50512
FWHM	= 0,96759
β (rad)	= 0,016887631
θ (°)	= 0,536733425

$$D = \frac{k\lambda}{\beta_{hkl}\cos\theta}$$

$$D = \frac{0,9 \times 0,15406}{0,016887631 \times \cos(0,536733425)}$$

$$D = 9,553810433 \text{ nm}$$

Ukuran rata-rata kristal Cu₂O = 13,91 nm

Ukuran Kristal Rata-rata Cu₂O/ZnO

Puncak pada 2θ	= 34,8855
FWHM	= 5,0071
β (rad)	= 0,087390381
θ (°)	= 0,304433418

$$D = \frac{k\lambda}{\beta_{hkl}\cos\theta}$$

$$D = \frac{0,9 \times 0,15406}{0,087390381 \times \cos(0,304433418)}$$

$$D = 1,66307825 \text{ nm}$$

Puncak pada 2θ	= 36,42935
FWHM	= 0,59568
β (rad)	= 0,010396577
θ (°)	= 0,317906051

$$D = \frac{k\lambda}{\beta_{hkl}\cos\theta}$$

$$D = \frac{0,9 \times 0,15406}{0,010396577 \times \cos(0,317906051)}$$

$$D = 14,0400216 \text{ nm}$$

Puncak pada 2θ	= 42,38315
FWHM	= 0,57125
β (rad)	= 0,009970193
θ (°)	= 0,369862757

$$D = \frac{k\lambda}{\beta_{hkl}\cos\theta}$$

$$D = \frac{0,9 \times 0,15406}{0,009970193 \times \cos(0,369862757)}$$

$$D = 14,9154818 \text{ nm}$$

Ukuran rata-rata kristal Cu₂O/ZnO = 10,20 nm

Ukuran Kristal Rata-rata Cu₂O/ZnO-PANi(0,10)

Puncak pada 2θ	= 36,4521
FWHM	= 0,56562
β (rad)	= 0,009871931
θ (°)	= 0,318104582

$$D = \frac{k\lambda}{\beta_{hkl}\cos\theta}$$

$$D = \frac{0,9 \times 0,15406}{0,009871931 \times \cos(0,318104582)}$$

$$D = 14,78714799 \text{ nm}$$

Puncak pada 2θ	= 42,37075
FWHM	= 0,66069
β (rad)	= 0,011531216
θ (°)	= 0,369754547

$$D = \frac{k\lambda}{\beta_{hkl}\cos\theta}$$

$$D = \frac{0,9 \times 0,15406}{0,011531216 \times \cos(0,369754547)}$$

$$D = 12,89577801 \text{ nm}$$

Puncak pada 2θ	= 34,72169
FWHM	= 7,20924
β (rad)	= 0,125824975
θ (°)	= 0,303003906

$$D = \frac{k\lambda}{\beta_{hkl}\cos\theta}$$

$$D = \frac{0,9 \times 0,15406}{0,125824975 \times \cos(0,303003906)}$$

$$D = 1,154555695 \text{ nm}$$

Ukuran rata-rata kristal Cu₂O/ZnO-PANi(0,10) = 9,61 nm

Lampiran 9 Perhitungan % Kristalinitas

Perhitungan % Kristalinitas menggunakan persamaan:

$$\% \text{ Kristalinitas} = \frac{A_{\text{cr}}}{A_{\text{cr}} + A_{\text{am}}} \times 100\%$$

% Kristalinitas Cu₂O

$$\% \text{ Kristalinitas} = \frac{422,18425}{571,7387} \times 100\% = 73,84 \%$$

% Kristalinitas Cu₂O/ZnO

$$\% \text{ Kristalinitas} = \frac{279,14755}{503,2166} \times 100\% = 55,47 \%$$

% Kristalinitas Cu₂O/ZnO-PANi(0,10)

$$\% \text{ Kristalinitas} = \frac{242,05411}{485,6975} \times 100\% = 49,83 \%$$

% Kristalinitas Cu₂O/ZnO-PANi(0,10) Setelah Uji Stabilitas

$$\% \text{ Kristalinitas} = \frac{258,00257}{529,8669} \times 100\% = 48,69 \%$$

Lampiran 10 Penentuan Energi Celah Pita Fotokatalis

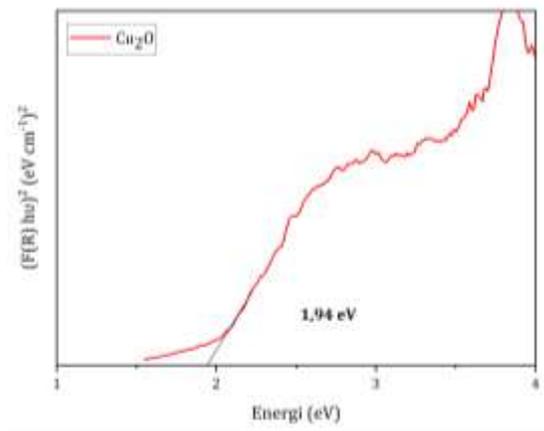
Energi Celah Pita Cu_2O

$$Y = mx + c$$

$$Y = 43,41307x - 84,23867$$

$$x = \frac{84,23867}{43,41307}$$

$$x = 1,940$$



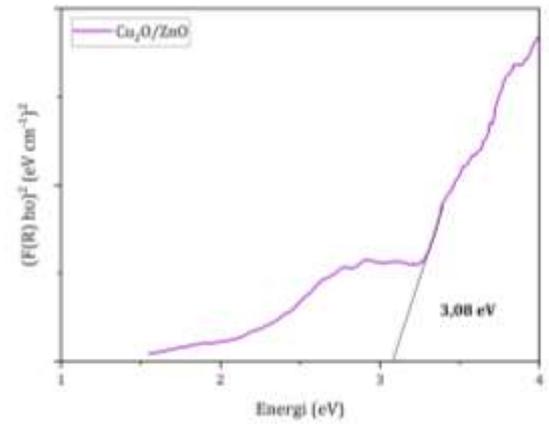
Energi Celah Pita $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$

$$Y = mx + c$$

$$Y = 55,47372x - 170,73532$$

$$x = \frac{170,73532}{55,47372}$$

$$x = 3,077 \approx 3,08$$



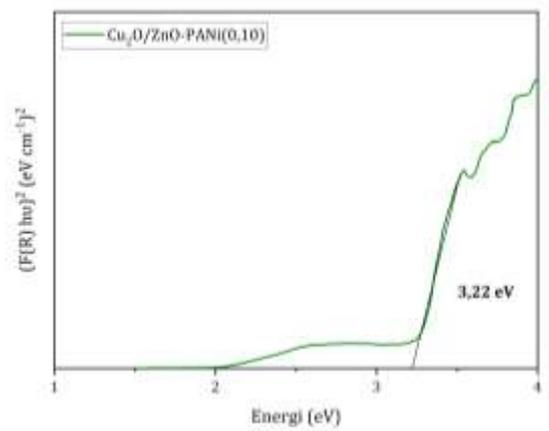
Energi Celah Pita $\text{Cu}_2\text{O/ZnO-PANi}(0,10)$

$$Y = mx + c$$

$$Y = 55,23004x - 177,7331$$

$$x = \frac{177,7331}{55,23004}$$

$$x = 3,218 \approx 3,22$$



RIWAYAT HIDUP

A. Identitas Diri

1. Nama Lengkap : Clarisa Dwi Arvianti
2. Tempat & Tgl. Lahir : Bogor, 4 Desember 2000
3. Alamat Rumah : Kp. Lebak Pasar RT 08 RW 03,
Ds. Pasir Tanjung, Kec.
Tanjungsari, Kab. Bogor, Prov.
Jawa Barat
4. HP : 081292943915
5. E-mail : clarisa.avi@gmail.com

B. Riwayat Pendidikan

1. SD Negeri Tanjungsari 01
2. MTs Negeri Cariu
3. SMA Negeri 1 Jonggol