

**DEGRADASI ZAT WARNA MALACHITE GREEN
MENGUNAKAN METODE FOTOSONOLISIS DENGAN
KATALIS ZnO/TiO_2**

SKRIPSI

*Diajukan sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar
Sarjana Sains*



Oleh:

**SEKAR PUTRI KHAIRUNNISA
NIM/TM.16036089/2016**

**PROGRAM STUDI KIMIA
JURUSAN KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI PADANG
2020**

PERSETUJUAN SKRIPSI

DEGRADASI ZAT WARNA *MALACHITE GREEN* MENGUNAKAN METODE FOTOSONOLISIS DENGAN KATALIS ZnO/TiO_2

Nama : Sekar Putri Khairunnisa

NIM/TM : 16036089/ 2016

Program Studi : Kimia

Jurusan : Kimia

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

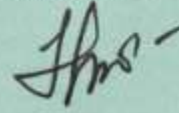
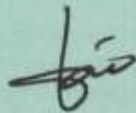
Padang, Februari 2020

Mengetahui:

Disetujui Oleh:

Ketua Jurusan Kimia

Pembimbing



Alizar, S.Pd, M.Si, Ph.D
NIP. 19700902 199801 1 002

Hary Sanjaya, S.Si, M.Si
NIP.19830428 200912 1 007

PENGESAHAN LULUS UJIAN SKRIPSI

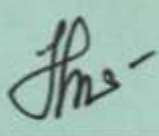
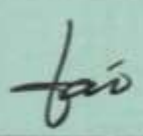
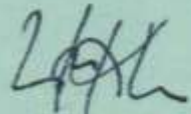
Nama : Sekar Putri Khairunnisa
NIM : 16036069
Program Studi : Kimia
Jurusan : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

DEGRADASI ZAT WARNA *MALACHITE GREEN* MENGUNAKAN METODE FOTOSONOLISIS DENGAN KATALIS ZnO/TiO_2

Dinyatakan Lulus Setelah dipertahankan di depan Tim Penguji Skripsi
Program Studi Kimia Jurusan Kimia
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Negeri Padang

Padang, 31 Januari 2020

Tim Penguji

	Nama	Tanda tangan
Ketua	: Hary Sanjaya, S.Si, M.Si	 _____
Anggota	: Alizar, S.Pd, M.Sc. Ph.D	 _____
Anggota	: Umar Kalmar Nizar, S.Si, M.Si, Ph.D	 _____

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertandatangan dibawah ini :

Nama : Sekar Putri Khairunnisa

NIM : 16036089

Tempat/Tanggal lahir : Taluk Kuantan / 22 April 1998

Program Studi : Kimia

Jurusan : Kimia

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Judul Skripsi : **Degradasi Zat Warna *Malachite green* Menggunakan Metode Fotosonolisis dengan Katalis ZnO/TiO_2**

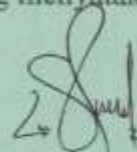
Dengan ini menyatakan bahwa :

1. Karya tulis/skripsi ini adalah hasil karya saya dan belum pernah diajukan untuk memperoleh gelar akademik (sarjana) baik di UNP maupun perguruan tinggi lainnya.
2. Karya tulis/skripsi ini murni gagasan, rumusan, dan penelitian saya sendiri tanpa bantuan pihak lain kecuali arahan tim pembimbing.
3. Pada karya tulis/skripsi ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain kecuali tertulis dengan jelas dicantumkan pada kepustakaan.
4. Karya tulis/skripsi ini sah apabila telah ditandatangani Asli oleh tim pembimbing dan tim penguji.

Pernyataan ini saya buat dengan sungguh-sungguh dan apabila dikemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran di dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima **Sanksi Akademik** berupa pencabutan gelar akademik yang telah diperoleh karena karya tulis/skripsi ini, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi

Padang, 05 Februari 2020

Yang menyatakan,



Sekar Putri Khairunnisa

NIM/TM: 16036089/2016

ABSTRAK

Sekar Putri Khairunnisa (2020): “Degradasi Zat Warna *Malachite green* Dengan Katalis ZnO/TiO₂ Menggunakan Metode Fotosonolisis”

Proses degradasi zat warna *Malachite green* dengan katalis ZnO/TiO₂ telah dilaksanakan dengan menggunakan metode Fotosonolisis. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui waktu radiasi optimum dan persen katalis ZnO/TiO₂ optimum, yang dibutuhkan untuk mendegradasi *Malachite green*. Panjang gelombang maksimum (λ_{maks}) *Malachite green* hasil pengukuran dengan Spektrofotometer UV-Vis adalah 615 nm. Waktu radiasi optimum yang didapatkan dari hasil penelitian menunjukkan waktu 60 menit, dengan hasil presentase degradasi (% D) sebesar 84,5395 %. Sedangkan untuk persen katalis optimum ZnO/TiO₂ yang digunakan untuk mendegradasi *Malachite green* dari hasil penelitian diperoleh pada katalis ZnO/TiO₂ 15 % dengan persentase degradasi (% D) sebesar 92,599 %. Hasil analisis menggunakan XRD didapatkan ukuran Kristal dari ZnO sebesar 48,50-80,70 nm, TiO₂ sebesar 48,96-83,81 nm, dan ZnO/TiO₂ sebesar 48,75-103,87 nm. Nilai *Band gap* yang diperoleh dari hasil analisis menggunakan UV-DRS untuk ZnO sebesar 3,36 eV, TiO₂ sebesar 3,22 eV, dan ZnO/TiO₂ 3,10 eV. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ZnO yang di doping dengan TiO₂, menunjukkan hasil yang lebih baik dalam mendegradasi zat warna *Malachite green* menggunakan metode Fotosonolisis, karena mengalami peningkatan aktifitas fotokatalitik.

Kata Kunci: Degradasi, *Malachite green*, *Band gap*, Katalis ZnO/TiO₂, Fotosonolisis.

ABSTRACT

Sekar Putri Khairunnisa (2020): “Degradation *Malachite green* with ZnO/TiO₂ Catalyst Using Photosonolysis Method”

The degradation process of *Malachite green* dyes with ZnO/TiO₂ catalyst has been done using the photosonolysis method. The purpose of this research is to determine the optimum radiation time and percent optimum of ZnO/TiO₂ catalyst, which is needed to degrade *Malachite green*. The maximum wavelength (λ_{maks}) of *Malachite green* measured by UV-Vis spectrophotometer is 615 nm. The optimum radiation time obtained from the research results showed 60 minutes, with the percentage of degradation (%D) of 84,5395%. As for the Optimum ZnO/TiO₂ catalyst percent used to degrade *Malachite green* from the research results obtained on 15% ZnO/TiO₂ catalyst with a percentage degradation (%D) of 92,599%. The results of analysis using XRD obtained crystal size from ZnO of 48,50-80,70 nm, TiO₂ of 48,96-83,81 nm, and ZnO/TiO₂ of 48,75-103,87 nm. *Band gap* value obtained from the analysis using DR UV-Vis for ZnO of 3,36 eV, TiO₂ of 3,22 eV, and ZnO/TiO₂ of 3,10 eV. The results showed that ZnO doped with TiO₂ showed the better results in degrading *Malachite green* dyes using the photosonolysis method, due to increased photocatalytic activity.

Keywords: Degradation, *Malachite green*, *Band gap*, ZnO/TiO₂ Catalyst, Photosonolysis

KATA PENGANTAR

Syukur Alhamdulillah penulis ucapkan atas kehadiran Allah SWT yang telah memberikan ridhoNya, kesabaran, dan ketabahan kepada penulis dalam menyelesaikan Skripsi dengan judul **“Degradasi Zat Warna *Malachite green* Dengan Katalis ZnO/TiO₂ Menggunakan Metode Fotosonolisis”**. Shalawat dan salam untuk Nabi Muhammad SAW yang telah menjadi suri tauladan pada setiap aktivitas yang dilalui.

Skripsi ini penulis ajukan guna memenuhi syarat lulusnya mata kuliah Tugas Akhir 2 di Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang. Penyelesaian Skripsi ini tidak lepas dari bantuan, arahan, dan masukan yang berarti dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Bapak Hary Sanjaya, S.Si, M.Si selaku pembimbing dan penasehat akademik yang telah memberikan bimbingan serta arahan selama proses pengerjaan hingga selesainya tugas akhir ini.
2. Bapak Umar Kalmar Nizar, Ph.D selaku Tim Pembahas yang telah bersedia menjadi pembahas pada ujian Skripsi.
3. Bapak Alizar, Ph.D selaku Tim Pembahas yang telah bersedia menjadi pembahas pada ujian Skripsi.
4. Ayah Ir. Ilham Suryantoro Adi, Ibu Peni Evalina, dan adik Fahmi Satrio Wicaksono, serta keluarga besar yang telah memberikan dukungan, semangat, dan motivasi yang tidak terbatas.
5. Teman-teman terdekat yang telah memotivasi, membantu, memberikan masukan, dan menjadi pendengar keluh kesah dalam banyak hal.

6. Teman-teman jurusan Kimia Universitas Negeri Padang Angkatan 2016.

Penulis menyadari Skripsi ini membutuhkan masukan dan saran yang membangun dari berbagai pihak untuk kelengkapan dan referensi penelitian sejenis di masa mendatang. Atas masukan dan saran yang diberikan penulis mengucapkan terimakasih.

Padang, 05 Februari 2020

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI.....	iii
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR LAMPIRAN	vii
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang.....	1
B. Identifikasi Masalah.....	3
C. Batasan Masalah	3
D. Rumusan Masalah.....	4
E. Tujuan Penelitian	4
F. Manfaat Penelitian	4
BAB II KERANGKA TEORITIS	6
A. Malachite green	6
B. Zink Oksida (ZnO)	8
C. Titanium Dioksida (TiO ₂).....	9
D. Fotokatalis.....	10
E. Fotolisis	12
F. Sonolisis.....	13
G. Fotosonolisis	15
H. Spektrofotometer UV-Vis.....	16
I. X-Ray Diffraction (XRD).....	17
J. Spektrofotometer UV-Diffuse Reflectance (UV-DRS).....	19
K. Penelitian Yang Relevan.....	21
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	22
A. Jenis Penelitian, Waktu dan Tempat.....	22
B. Objek Penelitian.....	22
C. Variabel Penelitian.....	22
D. Alat dan Bahan	23
1. Alat.....	23

2. Bahan.....	23
E. Prosedur Penelitian	23
1. Preparasi katalis ZnO/TiO ₂	23
2. Pembuatan larutan <i>Malachite green</i>	24
3. Degradasi larutan <i>Malachite green</i> secara Fotosonolisis.....	24
4. Karakterisasi Fotokatalis.....	25
F. Skema Alat.....	27
G. Skema Penelitian	28
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	29
Degradasi zat warna <i>Malachite green</i> dengan Metode Fotosonolisis.....	29
1. Penentuan Variasi Waktu Degradasi <i>Malachite green</i> dengan katalis ZnO secara Fotosonolisis.....	29
2. Pengaruh Variasi konsentrasi katalis ZnO/TiO ₂ terhadap Degradasi <i>Malachite Green</i> secara Fotosonolisis.....	32
BAB V PENUTUP.....	36
A. Kesimpulan.....	36
B. Saran	36
KEPUSTAKAAN	37
LAMPIRAN.....	45

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Struktur Kimia <i>Malachite green</i> (Chen, Lu, Chung, & Jan, 2007).....	6
2. <i>Malachite green</i> menjadi <i>Leucomalachite green</i> (Nebbia et al., 2017).....	7
3. Struktur Kristal (a) <i>anatase</i> , (b) <i>rutile</i> , (c) <i>brookite</i> (Ferinda, 2017).....	10
4. Skema Proses Fotokatalis (Arutanti & Mahfudz, 2009)	11
5. Difraktogram Katalis.....	19
6. Grafik Band gap ZnO (Ferinda, 2017).....	21
7. Grafik Band gap TiO ₂ (Ferinda, 2017)	21
8. Grafik <i>Band gap</i> ZnO/TiO ₂ 15% (Ferinda, 2017)	21
9. Skema alat penelitian	27
10. Kurva Pengaruh waktu radiasi dengan metode Fotosonolis	30
11. Kurva pengaruh penambahan variasi katalis ZnO/TiO ₂ terhadap degradasi <i>Malachite green</i> dengan metode Fotosonolisis.....	34

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Sifat Fisika ZnO (Jang, 2001)	8
2. Perbedaan struktur anatase dan rutile (Palupi, 2006).....	9

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
1. Perhitungan preparasi katalis ZnO/TiO ₂	45
2. Preparasi Katalis ZnO/ TiO ₂	47
3. Pembuatan Larutan <i>Malachite green</i>	48
4. Degradasi <i>Malachite Green</i> dengan Variasi Waktu secara Fotosonolisis	49
5. Degradasi <i>Malachite Green</i> dengan Variasi Konsentrasi Katalis ZnO/TiO ₂ dengan Metode Fotosonolisis.....	50
6. Absorbansi <i>Malachite green</i> sebelum Degradasi dengan Spektrofotometer UV-Vis	51
7. Absorbansi <i>Malachite green</i> sesudah Degradasi dengan Variasi Waktu.....	52
8. Perhitungan persen degradasi <i>Malachite green</i> dengan Variasi Waktu menggunakan Katalis ZnO secara Fotosonolisis.....	53
9. Hasil Degradasi <i>Malachite green</i> dengan Variasi Waktu menggunakan Katalis ZnO secara Fotosonolisis	55
10. Perhitungan persen degradasi <i>Malachite green</i> dengan Variasi Waktu menggunakan Katalis ZnO secara Fotosonolisis.....	56
11. Hasil Degradasi <i>Malachite green</i> dengan Variasi <i>Doping</i> TiO ₂ secara Fotosonolisis.....	58

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Industri Tekstil dan Produk tekstil menjadi salah satu komoditi utama dalam kegiatan ekspor barang di Indonesia. Terjadi kenaikan tingkat ekspor dari tahun 2016/2017 sebesar 6,8% ke tahun 2017/2018 menjadi 8,5% (Kementerian Perindustrian Republik Indonesia, 2018). Kenaikan tingkat ekspor, berbanding lurus dengan kenaikan jumlah produksi dan kenaikan volume limbah industri tekstil. Limbah industri tekstil terdiri dari berbagai jenis, salah satunya adalah limbah pewarna industri tekstil yang umumnya mengandung zat kimia dan sisa pewarna dari proses pewarnaan.

Dengan terjadinya peningkatan jumlah limbah industri tekstil, akan berdampak pula terhadap kondisi lingkungan. Terutama lingkungan perairan, sebagai akibat dari cemaran zat warna industri, salah satu pewarna yang kerap digunakan sebagai pewarna industri tekstil adalah zat warna *Malachite green*.

Pewarna *Malachite green* merupakan zat warna yang umum digunakan sebagai pewarna katun, sutera dan wol. *Malachite green* tergolong senyawa organik berstruktur kompleks yang terakumulasi didalam tubuh makhluk hidup dapat mempengaruhi sistem kekebalan tubuh dan bersifat karsinogenik, mutagenik, pemecah kromosom, dan juga merupakan racun bagi mamalia termasuk penyebab kerusakan organ serta penyebab pertumbuhan abnormal (Srivastava, Sinha, & Roy, 2004)

Dalam upaya penanganan bahaya limbah pewarna industri tekstile, terdapat metode yang efektif untuk mendegradasi zat warna yaitu metode fotosonolisis,

yang merupakan salah satu metode *Advanced Oxidation Processes* (AOPs) yang merupakan kombinasi antara metode fotolisis dan sonolisis (Rashid & Sato, 2011). Metode fotosonolisis menggunakan katalis untuk menghilangkan/mendegradasi limbah zat warna lebih cepat. Katalis yang digunakan berupa semikonduktor ZnO. ZnO dipilih sebagai katalis karena memiliki kemampuan menyerap spektrum cahaya yang baik. Peningkatan aktifitas fotokatalitik katalis dapat dilakukan dengan mengurangi nilai *band gap* energi ZnO. Pengurangan nilai *band gap* ZnO dilakukan dengan pendopingan oleh TiO₂, yang memiliki nilai *band gap* lebih kecil dari ZnO (Kasuma, 2012).

Proses degradasi zat warna *Malachite green* dengan katalis ZnO/TiO₂ menggunakan metode Fotosonolisis dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu lama waktu radiasi, dan presentase doping TiO₂ yang digunakan sebagai katalis. Degradasi *Malachite green* meningkat dengan bertambahnya waktu sampai tercapainya kontak optimum antara foton dengan katalis yang digunakan dan akan mengalami penurunan saat H₂O₂ terlalu banyak terbentuk (Youssef, Shaban, Ibrahim, & Mahmoud, 2016).

Jumlah presentase katalis ZnO/TiO₂ akan mempengaruhi proses degradasi *Malachite green*, dimana variasi doping akan menghasilkan ukuran partikel dan nilai *band gap* yang baru yang dapat meningkatkan aktivitas fotokatalis atau menurunkan aktivitas fotokatalis (Basthomi & Al, 2016).

Hal ini mendasari penulis untuk melakukan penelitian tentang “**Degradasi Zat Warna *Malachite green* Dengan Katalis ZnO/TiO₂ Menggunakan Metode Fotosonolisis**”. Penelitian ini dilakukan untuk melihat waktu radiasi dan % doping TiO₂ optimum dalam mendegradasi *Malachite green*, serta melihat

keefektifan antara katalis ZnO dengan katalis ZnO/TiO₂ ketika mendegradasi *Malachite green*. Hasil degradasi akan dikarakterisasi menggunakan spektrofotometer UV-Vis dan katalis yang digunakan dikarakterisasi dengan XRD, UV-DRS yang diharapkan dapat menjadi salah satu solusi bagi industri tekstil dalam mengurangi dampak limbah industri tekstil terhadap lingkungan.

B. Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah, dapat diidentifikasi beberapa masalah sebagai berikut:

- 1 *Malachite green* merupakan zat warna sintesis yang kegunaannya banyak dipakai dalam industri pewarnaan tekstile, tetapi memiliki masalah dampak lingkungan dalam penggunaan jangka panjang.
- 2 Upaya memaksimalkan proses degradasi *Malachite green* dengan Metode Fotosonolisis, yang menggabungkan antara metode Fotolisis dan metode Sonolisis.

C. Batasan Masalah

Dari latar belakang dan dan identifikasi masalah, maka masalah dibatasi dengan:

- 1 Pendegradasian *Malachite green* dilakukan dengan metode Fotosonolisis. Yang merupakan gabungan dari metode Fotolisis dan metode Sonolisis.
- 2 Variasi waktu radiasi pada proses degradasi *Malachite Green* yang digunakan adalah 0 menit, 15 menit, 30 menit, 45 menit, 60 menit, 75 menit, 90 menit.
- 3 Variasi presentase katalis ZnO/TiO₂ yang digunakan adalah 5%, 10%, 15%, 20%, 25%.

- 4 pH optimum yang digunakan adalah pH 7.
- 5 Malachite Green digunakan sebagai model limbah zat warna dengan konsentrasi 200 ppm sebagai larutan induk.

D. Rumusan Masalah

- 1 Bagaimana pengaruh variasi waktu radiasi yang digunakan terhadap degradasi warna *Malachite green*?
- 2 Bagaimana pengaruh variasi presentase katalis ZnO/TiO₂ terhadap degradasi *Malachite green*?
- 3 Bagaimana hasil dari Sintesis dan karakterisasi katalis ZnO, TiO₂ dan ZnO/ TiO₂ menggunakan XRD, UV-DRS

E. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah, maka tujuan dari penelitian ini adalah:

- 1 Untuk mengetahui waktu Optimum dari waktu radiasi terhadap degradasi *Malachite green*.
- 2 Untuk mengetahui presentase katalis ZnO/TiO₂ optimum pada degradasi *Malachite green*.
- 3 Sintesis dan karakterisasi katalis ZnO, TiO₂ dan ZnO/ TiO₂ menggunakan XRD, UV-DRS.

F. Manfaat Penelitian

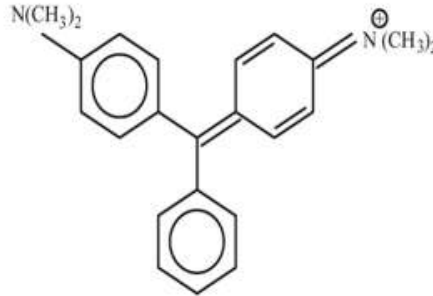
Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan edukasi dan sumbangsih bagi ilmu pengetahuan terutama dalam bidang Fotokatalis yang mengembangkan metode Fotosonolisis untuk mendegradasi zat warna *Malachite green* dengan cara yang efektif dan efisien serta dapat dijadikan sebagai referensi

untuk penelitian selanjutnya agar pendegradasian ini dapat diterapkan dalam industri skala besar.

BAB II

KERANGKA TEORITIS

A. Malachite green



Gambar 1. Struktur Kimia *Malachite green* (Chen, Lu, Chung, & Jan, 2007)

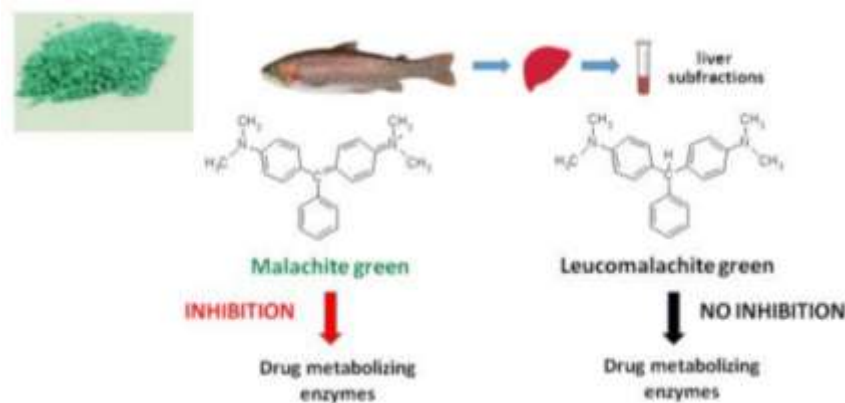
Malachite green tergolong pewarna trifenilmetan yang umum digunakan sebagai pewarna hijau untuk tekstil (Trabelsi, Atheba, Gbassi, Ksibi, & Drogui, 2012) digolongkan sebagai senyawa trifenilmetan karena memiliki 3 gugus aromatik dalam strukturnya (Adisti & Mutiara, 2014), dan penggunaannya yang kontroversial sebagai antiseptik pada kulit ikan.

Malachite green merupakan zat pewarna dasar untuk celup yang berbahan dasar garam dari warna dasar organik yang mengandung amino dan kelompok imino dan dikombinasikan dengan asam klorida. *Malachite green* menghasilkan warna yang lebih cemerlang dibandingkan pewarna sintesis lain. Bahan celup merupakan kationik yang bermuatan positif dan dapat digunakan untuk wol, sutra, dan nilon yang merupakan contoh kain anionik yang bermuatan negatif. Pewarna kimia ini utamanya digunakan sebagai pewarna sutra, kulit dan kertas (Srivastava et al., 2004).

Selain sebagai zat pewarna, *Malachite green* mempunyai kegunaan dalam bidang medis sebagai antiseptik lokal untuk membunuh parasit dan bakteri gram positif. Dan sebagai antiseptik bagi ikan yang telah dilarang penggunaannya (Kementerian Kelautan Dan Perikanan, 2013). Zat warna *Malachite green*

merupakan senyawa organik berstruktur kompleks yang terakumulasi didalam tubuh makhluk hidup dapat mempengaruhi sistem kekebalan tubuh dan bersifat karsinogenik, mutagenik, pemecah kromosom, dan juga merupakan racun bagi mamalia termasuk penyebab kerusakan organ serta penyebab pertumbuhan abnormal (Srivastava et al., 2004)

Malachite green dapat masuk ke dalam metabolisme tubuh ikan menjadi *Leucomalachite green* yang bersifat lipofilik (menyukai lemak dan pelarut organik) dan dapat terakumulasi di dalam jaringan ikan (Culp, 2004).



Gambar 2 Malachite green menjadi Leucomalachite green (Nebbia et al., 2017)

Berdasarkan Keputusan Menteri Kelautan dan Perikanan Republik Indonesia, *Malachite green* telah dilarang penggunaannya sebagai obat bagi penyakit pada kulit ikan karena tergolong sebagai obat keras yang dilarang. “Obat keras, merupakan obat ikan yang apabila penggunaannya tidak sesuai dengan ketentuan dapat menimbulkan bahaya bagi ikan, lingkungan dan manusia yang mengkonsumsi ikan tersebut”(Kementerian Kelautan Dan Perikanan, 2013).

Meskipun penggunaan *Malachite green* telah dilarang penggunaannya di beberapa negara dan dilarang oleh US Food and Drug Administration, namun penggunaannya masih banyak ditemukan di berbagai belahan dunia. Harga yang

murah, mudah didapat, dan tersedia secara bebas, serta efek yang dihasilkan efektif menjadi alasan penggunaannya terus dilakukan. Sementara itu, kadar *Malachite green* yang diperbolehkan diperairan atau nilai ambang batasnya adalah 0,01 ppm (Srivastava et al., 2004).

B. Zink Oksida (ZnO)

Seng oksida merupakan senyawa anorganik dengan rumus ZnO, berbentuk bubuk putih jika dingin, kuning jika panas, pahit dan tidak bau. ZnO larut dalam garam-garam ammonium, asam atau basa dan tidak beracun (Adi, Firdaus, & Budi, 2007). Pada struktur kristal, ZnO mempunyai sifat piezoelektrik dan termokromik. ZnO memiliki lebar celah pita energi sebesar 3.37 eV dan energi ikat eksitasi 60 meV pada suhu kamar (Khan, Khan, Zulfequar, & Shahid Khan, 2011; Shakti & Gupta, 2010). Pada katalis ZnO memiliki kemampuan menyerap spektrum cahaya lebih banyak dibandingkan dengan TiO₂ (Sakthivel et al., 2003). Oleh karena itu, ZnO merupakan bahan yang penting untuk laser UV dan perangkat optoelektronik, dan ZnO memiliki sifat listrik dan optik sehingga banyak digunakan sebagai fotokonduktor, sensor terintegrasi (Suwanboon, 2008).

Tabel 1. Sifat Fisika ZnO (Jang, 2001)

Sifat	Nilai
Struktur kristal	Wurtzite (stabil pada 300 K), Zinc blende dan Rocksalt
Energi gap	3.37 Ev
Energi ikat eksitasi	60 meV
Kerapatan	5.606 g/Cm ³
Titik lebur	1975 ⁰ C
Parameter kisi a ₀	0.32495 nm
C ₀	0.52069 nm

Co/a ₀	1.60
Konduktivitas termal	0.6, 1-12
Koefisien linear ekspansi ($^{\circ}\text{C}$)	a ₀ : 6.5×10^{-6} , c ₀ : 3.0×10^{-6}
Konstanta dielektrik relatif	8.656
Indeks bias	2.008, 2.029

C. Titanium Dioksida (TiO₂)

Titanium dioksida merupakan semikonduktor yang stabilitas termalnya tinggi dan tidak kehilangan aktivitas katalitiknya, meskipun telah digunakan berulang kali. Berdasarkan strukturnya, Titanium dioksida (TiO₂) memiliki 3 jenis struktur diantaranya, *anatase* memiliki *band gap* sebesar 3,2 eV dengan luas permukaan yang lebih besar. Sehingga sisi aktif dari *anatase* lebih luas dibanding jenis lainnya. *Rutile* memiliki *band gap* sebesar 3,0 eV, sedangkan *brookite* tidak stabil dan proses preparasinya sulit sehingga jarang digunakan dalam proses fotokatalitik (Abdullah, 2009). Perbedaan mendasar antara *anatase* dan *rutile* dapat dilihat pada Tabel 2.

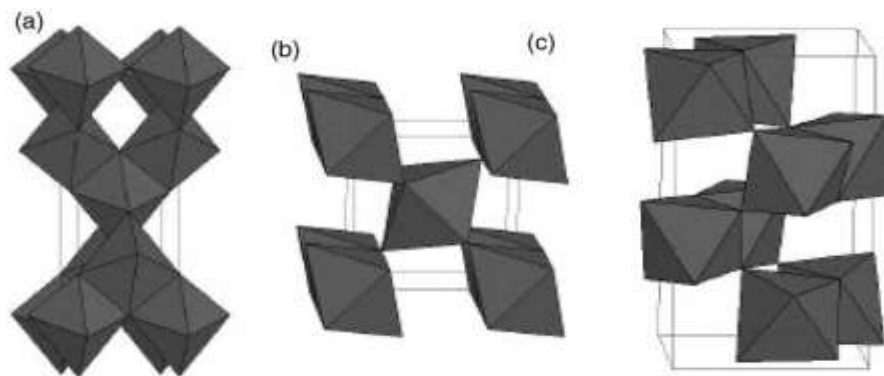
Tabel 2 Perbedaan struktur anatase dan rutile (Palupi, 2006)

Faktor Perbedaan	Kristal	
	Anatase	Rutile
Energi gap (E _g), eV	3,2	3,1
Massa jenis (ρ), gr/cm ³	3,830	4,240
Jarak Ti-Ti, Å	3,97 dan 3,04	3,57 dan 2,96
Jarak Ti- O, Å	1,937 dan 1,966	1,946 dan 1,983
Parameter Kisi, Å	<i>a</i> = 3,782 <i>c</i> = 9,502	<i>a</i> = 4,587 <i>c</i> = 2,953

Struktur TiO₂ *anatase* memiliki aktifitas fotokatalitik yang lebih baik dibanding *rutile* dan *brookite*, serta dapat melakukan pemecahan air menjadi

oksigen dan air pada proses hidrolisis. Proses fotokatalis membutuhkan dua pasangan elektron dan lubang (hole) yang didapatkan dari penyerapan sinar ultraviolet (uv). Elektron tereksitasi pada pita konduksi dan hole yang berada pada pita valensi bergabung kembali untuk mengubah energi menjadi panas dan terperangkap di permukaan menjadi lebih stabil (Banerjee, Gopal, Muraleedharan, Tyagi, & Raj, 2006).

Struktur *anatase*, *rutile*, dan *brookite* digambarkan dalam bentuk rantai oktahedral, seperti pada Gambar 3.

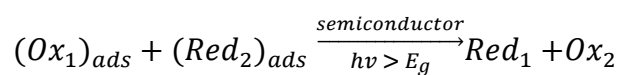


Gambar 3 Struktur Kristal (a) *anatase*, (b) *rutile*, (c) *brookite* (Ferinda, 2017).

D. Fotokatalis

Proses Fotokatalis merupakan penggabungan antara foto (cahaya) dan katalisis. Fototokatalis merupakan kombinasi reaksi fotokomia yang membutuhkan bantuan cahaya dan katalis yang mempercepat terjadinya reaksi kimia (Yahdiana, 2011).

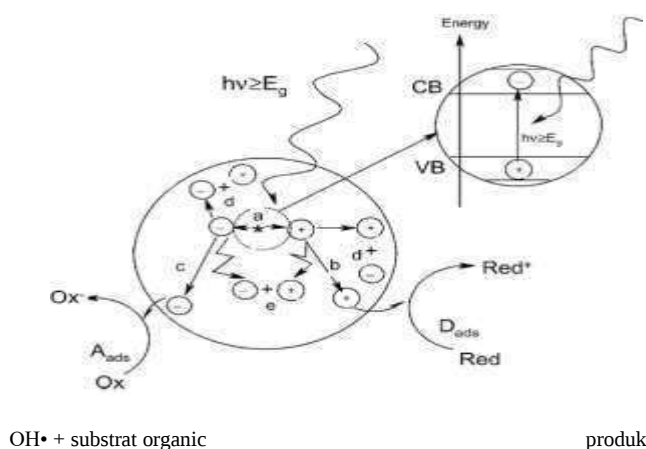
Secara umum reaksi fotokatalis yaitu :



Metoda AOPs (Advanced Oxidation Processes) merupakan metoda yang menggunakan katalis untuk menghasilkan radikal hidroksil yang memiliki

efektivitas tinggi dalam proses oksidasi senyawa organik. Salah satu contoh metoda ini adalah Fotokatalis yang menghasilkan produk berupa pengolahan limbah yang tidak berbahaya bagi lingkungan yakni CO_2 dan H_2O . Sumber cahaya pada proses fotokatalis ini berupa sinar matahari dan lampu ultraviolet (Uv). Katalis yang digunakan umumnya adalah bahan semikonduktor karena mampu menyerap foton (Linsebigler, Lu, & Yates, 1995).

Saat suatu semikonduktor dilewati cahaya (foton) sebesar $h\nu$, maka (e) pada pita valensi akan mengabsorpsi energi cahaya (foton) dan pindah ke tingkat energi yang lebih tinggi yakni pita konduksi. Hal ini menyebabkan pita valensi memiliki lubang positif. Sebagian besar elektron dan hole berkombinasi kembali dalam semikonduktor dengan mengemisi kalor, sedangkan sebagian lagi bertahan pada permukaan semikonduktor (Chatterjee & Dasgupta, 2005).



Gambar 4. Skema Proses Fotokatalis (Arutanti & Mahfudz, 2009)

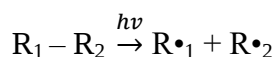
Gambar 4 menunjukkan absorpsi cahaya yang menginisiasi proses eksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi. Semikonduktor mendonorkan elektron ke spesi penerima elektron pada jalur C. spesi harus memiliki potensial yang lebih positif dibandingkan tingkat energi potensial pita konduksi semikonduktor. Pada jalur D, lubang (*hole*) bergerak menuju permukaan dan mengoksidasi spesies

donor elektron. Spesi pendonor harus memiliki potensial yang lebih negatif dibandingkan tingkat energi potensial pita valensi semikonduktor. Melalui jalur B dan jalur A terjadi rekombinasi elektron-hole didalam dan dipermukaan partikel semikonduktor yang disertai pelepasan panas. Proses modifikasi semikonduktor dapat menurunkan laju rekombinansi elektron-hole (Linsebigler et al., 1995).

E. Fotolisis

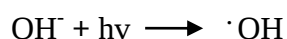
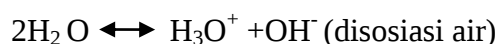
Fotolisis merupakan proses degradasi suatu senyawa dengan menggunakan bantuan cahaya. Apabila suatu senyawa dikenai cahaya, senyawa tersebut akan menyerap energi foton sehingga menyebabkan terjadinya reaksi kimia. Pada fotolisis terjadi transformasi kimia (fotokimia) yang berlangsung dengan bantuan radiasi sinar UV atau proses pemutusan ikatan dari suatu senyawa organik dengan bantuan energi foton sinar UV yang sesuai (Bismo, 2006).

Reaksi fotolisis langsung (*direct photolysis*) yang terlibat dapat dituliskan secara skematis sebagai berikut:



Reaksi-reaksi fotolisis umumnya menghasilkan produk berupa ion atau radikal yang dapat digunakan lebih jauh untuk reaksi-reaksi degradasi (penyisihan) polutan atau pencemar dalam media yang dimaksudkan, yaitu fasa cair ataupun fasa gas.

Berikut adalah reaksi fotolisis (Joseph, 2015) :



Dalam peristiwa fotolisis ini, jika absorpsi energi foton oleh suatu molekul atau spesi (radikal) digunakan untuk mendegradasi atau mendisosiasi molekul tersebut, maka energi foton yang diadsorpsi harus lebih besar daripada energi ikatan yang akan diputuskan. Hal ini berarti bahwa panjang gelombang dari energi foton yang paling sesuai untuk reaksi-reaksi fotolisis, adalah sinar yang digunakan sebagai sinar UV antara 10 - 380 nm (Bismo, 2006).

F. Sonolisis

Sonolisis merupakan salah satu metoda yang digunakan untuk mendegradasi zat warna organik dalam media air dengan menggunakan gelombang ultrasonik (Peller, Wiest, & Kamat, 2002). Metode sonolisis menggunakan iradiasi ultrasonik yang beroperasi pada frekuensi 20-500 kHz (Destailats, Alderson, & Hoffmann, 2001). Degradasi polutan organik dengan gelombang ultrasonik biasanya membutuhkan energi yang besar dan waktu reaksi yang lama.

Sonolisis mampu merubah polutan organik menjadi karbon dioksida dan air atau mengubah polutan tersebut menjadi senyawa yang kurang berbahaya dibandingkan polutan awal. Metode sonolisis merupakan suatu metode ultrasonik yang digunakan untuk mendegradasi zat organik dalam media air menggunakan getaran ultrasonik. Gelombang ultrasonik dalam air limbah memiliki kemampuan untuk mendegradasi senyawa yang sukar terurai karena dalam prosesnya akan menghasilkan radikal OH dan efek kavitasi (Stock, Peller, Vinodgopal, & Kamat, 2000).

Sonolysis melibatkan penggunaan gelombang ultrasound untuk menghasilkan *oxidizing* radikal ($\bullet\text{OH}$) yang dihasilkan melalui fenomena kavitasi. Reaksi antara radikal OH dan molekul polutan dapat terjadi di

dalam gelembung (*pyrolysis*) atau antarmuka gelembung-cair atau di *bulk* tergantung pada sifat dari polutan (Elvinawati, 2009; Madhavan, Sathish Kumar, Anandan, Grieser, & Ashokkumar, 2010).

Efek kavitasi terjadi karena energi akustik yang diberikan adalah energi mekanik yang tidak diserap oleh molekul. Proses kavitasi tersebut yaitu mulai dari pembentukan pertumbuhan dan mengembang mengempisnya gelembung pada larutan. Pada kondisi tertentu temperature dan tekanan menjadi sangat tinggi pada permukaan gelembung sehingga mampu memecah molekul air menjadi radikal ($\bullet\text{H}$) dan radikal ($\bullet\text{OH}$).

Kavitasi ultrasonik terdiri dari tiga tahap utama yaitu:

1. Nukleasi atau pembentukan gelembung

Tahap pertama dari proses kavitasi ultrasonik ini yaitu nukleasi yaitu tahapan dimana inti kavitasi akan dihasilkan dari partikel gelembung mikro yang terperangkap dalam celah celah mikro dari partikel yang tersuspensi dalam air.

2. Pertumbuhan gelembung

Tahap kedua gelembung-gelembung mikro akan tumbuh membesar akibat adanya intensitas gelombang ultrasonik yang tinggi. Dengan ultrasonikasi pada intensitas tinggi, gelembung mikro akan tumbuh dengan sangat cepat. Sedangkan pada intensitas rendah laju pertumbuhan dari gelembung lebih lambat. Hal ini dikarenakan gelembung akan melewati beberapa siklus akustik terlebih dahulu sebelum akhirnya membesar.

3. Pecahnya gelembung (*implosive collapse*)

Tahap ketiga dari kavitasi terjadi apabila intensitas dari gelombang ultrasonik melebihi batas ambang dari kavitasi ultrasonik (20 kHz untuk liquid).

Pada tahap ini gelembung mikro akan terus tumbuh hingga mencapai saat dimana gelembung mikro tidak dapat lagi mengabsorpsi energi yang dihasilkan oleh gelombang suara secara efisien dan akhirnya pecah. Tahap inilah yang disebut *catastrophic collapse* (Mahvi, 2009).

Proses sonolisis menghasilkan spesies-spesies reaktif seperti $\bullet\text{OH}$, $\bullet\text{H}$ dan $\text{HO}_2\bullet$ dalam larutan berair teroksigenasi. Efek dari sonolisis pada larutan air adalah memecah air menjadi $\bullet\text{OH}$ dan $\bullet\text{H}$ yang dapat merusak senyawa organik dalam larutan. Rusaknya senyawa organik tersebut akan menghasilkan senyawa-senyawa organik intermediet dan jika sonolisis terus berlangsung maka pada akhirnya akan terjadi mineralisasi tersebut menjadi CO_2 , H_2O , HNO_3 dan sebagainya (Safni, Sari, Maizatisna, & Zulfarman, 2007).

Molekul zat terlarut yang berdifusi kedalam gelembung mampu untuk mendegradasi senyawa berbahaya karena bersifat sangat reaktif. Radikal OH adalah radikal bebas utama yang berperan dalam reaksi degradasi akan tetapi radikal OH yang dihasilkan tersebut juga dapat bergabung satu sama lain membentuk H_2O_2 dalam air. Terbentuknya senyawa H_2O_2 ini akan mengurangi efisiensi sonolisis. Untuk meningkatkan efisiensi degradasi sonolisis ditambahkan katalis yang dapat meningkatkan produksi radikal OH sehingga mempercepat proses degradasi senyawa organik (Peller, Wiest, & Kamat, 2001).

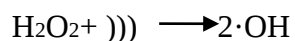
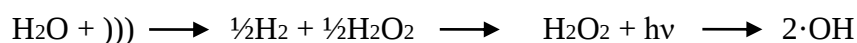
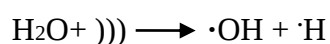
G. Fotosonolisis

Photosonolysis (atau *sonophotolysis*) adalah reaksi yang disebabkan oleh penggunaan gabungan dari sinar ultraviolet Iradiasi (UV) dan *ultrasonication* (AS) dengan atau tanpa kehadiran katalis (Rashid & Sato, 2011). Dibandingkan dengan fotolisis dan sonolisis, *photosonolysis* adalah teknologi pengolahan air

yang sedang berkembang dan banyak diteliti, terutama dalam penghapusan senyawa organik.

Metode fotosonolisis ini mengkombinasikan fotolisis dan sonolisis. Pada sonolisis dihasilkan gelombang mekanik dengan mempengaruhi efek kavitasi pada air dan pada fotolisis terjadi interaksi antara molekul air dan radiasi sinar matahari (UV) (Bhermana, Safni, & Syukri, 2015)

Persamaan reaksi dari proses fotosonolisis (Joseph, 2015) :



dimana, sonikasi menunjukkan proses sonikasi.

H. Spektrofotometer UV-Vis

Analisis dengan Spektrofotometri UV-Vis didasarkan pada interaksi antara radiasi elektromagnetik dengan molekul atau zat yang dianalisis. Spektrofotometri UV-Vis adalah suatu teknik analisis spektroskopi yang memakai sumber radiasi elektromagnetik ultraviolet (190-380 nm) dan sinar tampak (380-780 nm) dengan memakai instrument Spektrofotometer UV-Vis.

Spektrofotometer terdiri dari spektrometer dan fotometer. Spektrometer menghasilkan sinar dari spektrum dengan panjang gelombang tertentu dan fotometer adalah alat pengukur intensitas cahaya yang ditransmisikan atau yang diabsorpsi. Spektrofotometer tersusun atas sumber spektrum yang kontinyu, monokromator, sel pengabsorpsi untuk larutan sampel atau blanko dan suatu alat untuk mengukur perbedaan absorpsi antara sampel dan blanko ataupun pembanding (Khopkar, 2003).

Pengukuran dengan Spektrofotometri UV-Vis melibatkan energi elektronik yang cukup besar pada molekul yang dianalisis, sehingga spektrofotometri UV-Vis lebih banyak digunakan untuk analisis kuantitatif dibandingkan kualitatif. Metoda ini sangat sensitif dan dengan demikian sangat cocok untuk tujuan analisis. Spektrofotometri UV-Vis sangat kuantitatif dan jumlah sinar yang diserap oleh sampel dikemukakan dalam hukum *Lambert-Beer*.

Hukum *Lambert* menyatakan bahwa proporsi berkas cahaya yang diserap oleh suatu bahan/medium tidak bergantung pada intensitas berkas cahaya yang datang. Hukum ini hanya berlaku jika tidak terjadi reaksi kimia ataupun proses fisis yang dapat dipengaruhi oleh berkas cahaya datang tersebut.

$$A = \epsilon b c$$

Keterangan:

A = Absorbansi

ϵ = Absorptivitas molar (dalam $\text{L mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$)

c = Konsentrasi molar (mol L^{-1})

b = Panjang/ketebalan dari bahan/medium yang dilintasi oleh cahaya (cm)

(Day & Underwood, 1972).

I. X-Ray Diffraction (XRD)

Difraksi sinar-X merupakan salah satu cara karakterisasi material yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi struktur dari material mikropori, mesopori dan makropori. Alat yang digunakan disebut X-Ray Diffractometer (XRD). Melalui analisis XRD dapat diketahui dimensi kisi (d = jarak antar kisi) dalam struktur mineral, sehingga dapat ditentukan apakah suatu material mempunyai kerapatan yang tinggi atau tidak.

Prinsip kerja difraksi sinar-X adalah sinar-X dihasilkan dari tabung sinar-X yang terjadi akibat adanya tumbukan elektron-elektron yang bergerak sangat cepat dan mengenai logam sasaran, elektron ini membawa energi foton yang cukup untuk mengionisasi sebagian elektron di kulit K (1s), sehingga elektron yang berada pada orbital kulit luar akan berpindah dan mengisi orbital 1s dengan memancarkan sejumlah energi berupa sinar-X. Radiasi yang dihasilkan orbital K ke orbital lain disebut sinar-X deret K, dimana K₁ adalah eksitasi elektron ke kulit L. K₂ adalah eksitasi elektron ke kulit M. Demikian juga untuk K₃ dan seterusnya (Ewing & Jordan, 1955).

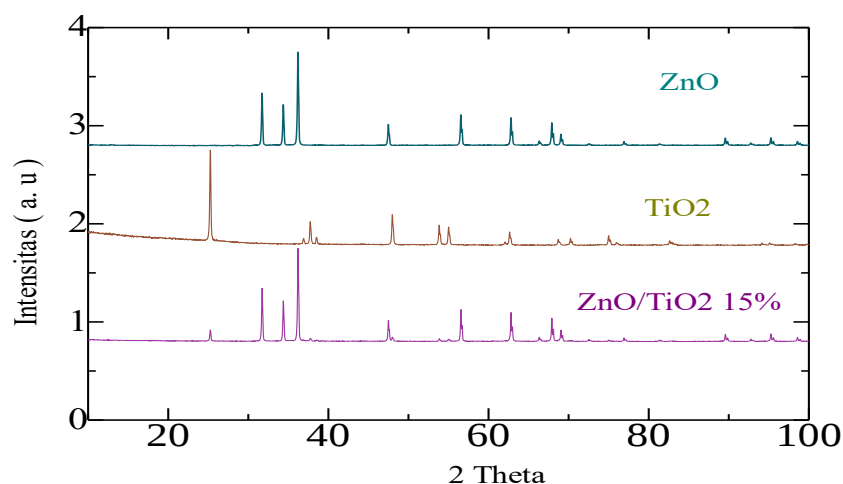
Sampel berupa serbuk padatan kristalin yang memiliki sejumlah besar kristal kecil dengan diameter butiran kristalnya sekitar 10^{-7} – 10^{-4} m ditempatkan pada suatu plat kaca dalam difraktometer. Pola difraksi yang dihasilkan berupa deretan puncak-puncak difraksi dengan intensitas relatif yang bervariasi sepanjang nilai 2θ tertentu. Besarnya intensitas relatif puncak dari deretan puncak tersebut bergantung pada jumlah atom atau ion yang ada, dan distribusinya di dalam sel satuan material tersebut.

Pola difraksi setiap padatan kristalin khas, yang bergantung pada kisi kristal, unit parameter, dan panjang gelombang sinar-X yang digunakan. Dengan demikian, sangat kecil kemungkinan dihasilkan pola difraksi yang sama untuk suatu padatan kristalin yang berbeda. Komponen utama XRD yaitu terdiri dari tabung katoda (tempat terbentuknya sinar-X), sampel holder dan detektor. Pada XRD ini menggunakan sumber Co dengan komponen lain berupa cooler yang digunakan untuk mendinginkan, karena ketika proses pembentukan sinar-X dikeluarkan energi yang tinggi dan menghasilkan panas. XRD memberikan data-

data difraksi dan kuantisasi intensitas difraksi pada sudut-sudut dari suatu bahan. Data yang diperoleh dari XRD berupa intensitas difraksi sinar-X yang terdifraksi dan sudut- sudut 2θ . Tiap pola yang muncul pada pola XRD mewakili satu bidang kristal yang memiliki orientasi tertentu (Widyawati, 2012).

Suatu kristal yang dikenai oleh sinar-X tersebut berupa material (sampel), sehingga intensitas sinar yang ditransmisikan akan lebih rendah dari intensitas sinar datang. Berkas sinar-X yang dihamburkan ada yang saling menghilangkan (interferensi destruktif) dan ada juga yang saling menguatkan (interferensi konstruktif) (Dorset, 1998).

Penelitian terdahulu oleh (Ferinda, 2017) menunjukkan hasil karakterisasi dari ZnO, TiO₂, dan ZnO/ TiO₂.



Gambar 5 Difraktogram Katalis

J. Spektrofotometer UV-Diffuse Reflectance (UV-DRS)

Spektrofotometri UV-DRS merupakan metoda yang digunakan untuk mengetahui besarnya nilai band gap hasil sintesis (Dolat et al., 2014). Prinsip spektrofotometer UV-DR berdasarkan teori Kubelka-Munk. Berdasarkan teori Kubelka – Munk, jika suatu lapisan material dengan ketebalan x , diradiasikan

dengan sejumlah energi foton, maka material tersebut akan menyerap atau menghamburkan foton.

Persamaan reflektansi yang telah terukur adalah sebagai berikut (Wiley, 1998):

$$R' = \frac{R'(\text{sampel})}{R'(\text{standar})}$$

Nilai ini dapat digunakan untuk mengetahui persamaan Kubelka-Munk:

$$F R' = \frac{(1 - R')^2}{2 R'}$$

Hubungan absorbansi (A) dengan reflektansi dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$\text{Log } \frac{1}{R'} = A$$

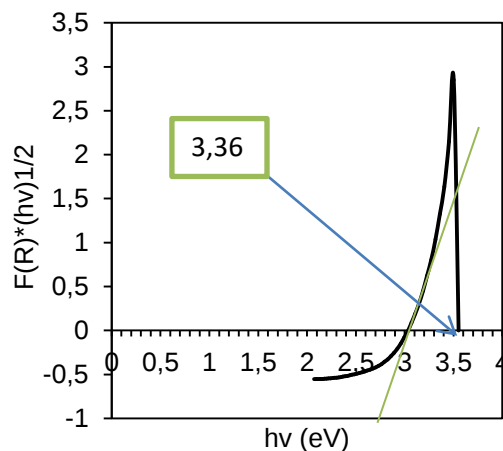
Metode Kubelka-Munk dapat digunakan untuk mencari energi celah pita (E_g), dimana:

$$E_g = hv = \frac{hc}{\lambda}$$

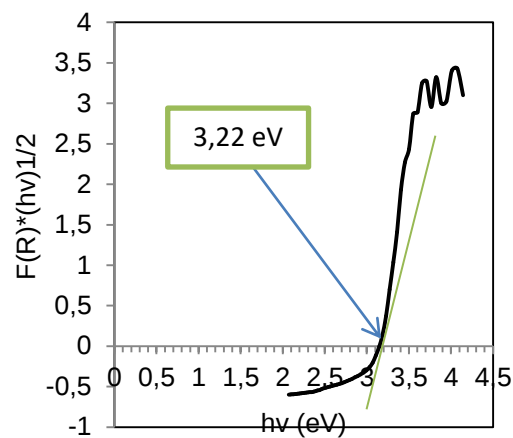
Energi celah pita diperoleh dari grafik hubungan antara hv (eV) vs $(F(R')hv)^{1/2}$. E_g adalah energi celah pita (eV), h adalah konstanta planck ($6,626 \times 10^{-34}$ Js), c adalah kecepatan cahaya (3×10^8 m/s) dan λ adalah panjang gelombang (nm). Energi celah pita semikonduktor adalah besarnya hv pada saat $(F(R') \infty)hv)^{1/2} = 0$, yang diperoleh dari persamaan regresi linier kurva tersebut (Fitriani, Merissa, Iskandar, & Mukti, 2014).

Berdasarkan penelitian terdahulu yang dilaksanakan oleh Sucitia (2017) (Ferinda, 2017), yang mengkarakterisasi katalis dengan DR Uv-Vis.

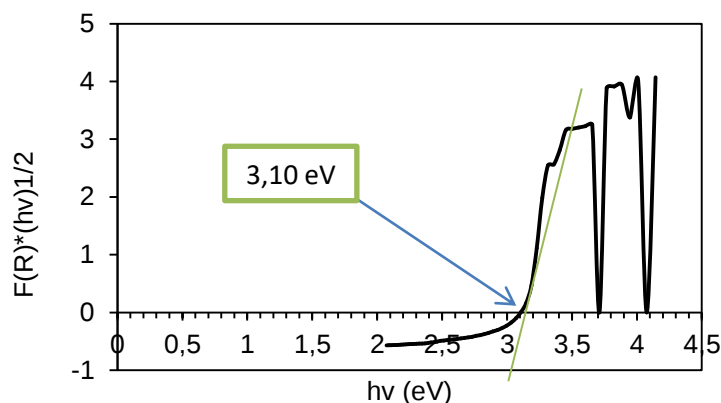
Menunjukkan nilai *band gap* untuk katalis ZnO, TiO₂, dan ZnO/TiO₂ 15% seperti pada gambar dibawah:



Gambar 6. Grafik Band gap ZnO (Ferinda, 2017)



Gambar 7. Grafik Band gap TiO₂(Ferinda, 2017)



Gambar 8. Grafik Band gap ZnO/TiO₂ 15% (Ferinda, 2017)

K. Penelitian Yang Relevan

Penelitian ini merujuk berdasarkan penelitian yang telah dilaksanakan sebelumnya oleh:

Sucitia ferinda, mengenai degradasi Rhodamine B dengan metoda Fotosonolisis. Penelitian ini menggunakan ZnO/TiO₂ sebagai katalis dan waktu optimum yang didapatkan pada waktu 120 menit dengan presentase katalis sebesar 99,42% (Ferinda, 2017).

BAB V

PENUTUP

A. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilaksanakan, diperoleh kesimpulan:

1. Panjang gelombang maksimum (λ_{maks}) dari *Malachite green* diperoleh pada panjang gelombang 615 nm.
2. Proses degradasi 80 mL *Malachite green* 10 ppm dengan variasi waktu menggunakan metoda fotosonolisis didapatkan hasil waktu degradasi optimum pada menit ke-60, dengan %D sebesar 84,5395 %.
3. Konsentrasi % katalis optimum pada proses degradasi 80 mL *Malachite green* 10 ppm selama 60 menit adalah ZnO/TiO₂ 15% dengan %D sebesar 92,599 %.

B. Saran

1. Mempelajari aplikasi dari pendegradasian zat warna secara fotosonolisis dengan menggunakan doping katalis yang berbeda
2. Dapat dilakukan penelitian lanjutan mengenai pengaruh waktu penyimpanan sampel sebelum dan sesudah karakterisasi.

KEPUSTAKAAN

- Abdullah, M. (2009). Penjernihan Air Dari Pencemar Organik dengan Proses Fotokatalis pada Permukaan Titanium Dioksida (TiO₂). *Jurnal Nanosains Dan Nanoteknologi*, (ISSN 1979-0880), 53–55.
- Adi, M., Firdaus, K. S., & Budi, W. . (2007). Efek Magneto Optis pada lapisan tipis (ZnO). *Berkala Fisika, Vol 10. No*, hal 31-34.
- Adisti, Y., & Mutiara, E. (2014). Kinetika Degradasi Fotokatalitik Malachite Green Dengan Katalis Semikonduktor TiO₂ Dan O₂/Uv. *Jurnal Seni Dan Sains, Vol.2, No.*, 1–6.
- Arutanti, O., & Mahfudz, M. A. K. H. (2009). Penjernihan Air Dari Pencemar Organik dengan Proses Fotokatalis pada Permukaan Titanium Dioksida (TiO₂). *Jurnal Nanosains & Nanoteknologi*.
- 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*.
- Basthomi, & Al, I. A. (2016). *Sintesis, Karakterisasi dan Uji Aktivitas Fotokatalis Titanium Dioksida (TiO₂) Anatas Terdoping Vanadium (III) Menggunakan Metode Sonikasi*. Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
- Bhermana, B. G., Safni, & Syukri. (2015). Degradasi Zat Warna Metanil Yellow Secara Fotolisis Dan Penyinaran Matahari Dengan Penambahan Katalis Tio₂ -Anatase Dan Sno₂. *Journal of Islamic Science and Technology*.
- Bhernama, B. G., Syukri, & Safni. (2014). Degradasi Malachite green Oxalate Secara Fotolisis dan Ozonolisis dengan Penambahan ZnO-SnO₂. *Jurnal Riset Kimia*, 7(2), 125. <https://doi.org/10.25077/jrk.v7i2.169>