

## PENGARUH WAKTU *AGING* PADA SINTESIS NANOKOMPOSIT ZnO:GO SEBAGAI FOTOKATALIS PADA SISTEM PENJERNIHAN AIR

CHOIRY GHINA A\*, RIZKIA MUTIARA, SRI SURYANINGSIH, AYI BAHTIAR, ANNISA APRILIA

*Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Padjadjaran,  
Jl. Raya Bandung-Sumedang Km 21, Jatinangor 45363*

**Abstrak.** Serbuk nanokomposit oksida Zink dengan oksida grafena (ZnO:GO) telah berhasil disintesis menggunakan metode sol-gel dengan proses kristalisasi pada suhu rendah (150°C). Variasi waktu *aging* diberikan untuk melihat karakteristik optik dan sifat fotokatalitik dari ZnO:GO dari setiap sampel yang dihasilkan. Pengamatan pada degradasi metilen biru (MB) digunakan untuk mengevaluasi sifat fotokatalitik ZnO:GO. Berdasarkan hasil karakterisasi spektrum difraksi sinar-X, seluruh sampel ZnO memiliki struktur kristal *hexagonal wurtzite*. Serbuk ZnO:GO dengan waktu *aging* 5 hari memiliki ukuran partikel yang paling kecil dibandingkan dengan sampel lainnya. Sedangkan sifat fotokatalitik terbaik diperlihatkan oleh serbuk ZnO:GO waktu *aging* 3 hari, yang diperlihatkan dengan nilai konstanta laju degradasi senyawa metilen biru paling tinggi (0,25/jam). Penambahan waktu *aging* ketika proses sintesis znO berlangsung, diketahui dapat mengurangi proses rekombinasi muatan yang terlihat pada menurunnya intensitas emisi radiatif pada sampel dengan waktu *aging* lebih lama.

**Kata kunci:** Fotokatalis ZnO, Nanokomposit ZnO:GO, Metode sol-gel.

**Abstract.** Nanocomposite powder from ZnO and graphene oxide (ZnO:GO) was successfully prepared by sol-gel method with low temperature (150°C) crystallization process. Different *aging* time variations were applied in order to observed the optical characteristics and photocatalytic properties of ZnO:GO. The degradation of the methylene blue (MB) concentration was observed to evaluate the photocatalytic properties. The x-ray diffraction pattern showed that all samples have hexagonal wurtzite crystal structures. The 5 days *aging* time was able to reduces the ZnO crystallite size. The ZnO:GO powder with 3 days *aging* time has a better photocatalytic properties compared to other variations, this confirmed by the degradation rate constant higher than other samples. *Aging* time up to 5 days of ZnO:GO composites can suppress the recombination process due to reducing of radiative emission (photoluminescence)

**Keywords:** ZnO Photocatalyst, ZnO Nanocomposite: GO, Sol-gel method.

### 1. Pendahuluan

Air bersih merupakan kebutuhan dasar bagi makhluk hidup di muka bumi [1]. Banyak sumber air alami telah terkontaminasi oleh polutan organik dari industri seperti cat, percetakan, pestisida, tekstil, minyak bumi, farmasi dan industri kimia lainnya [1, 2]. Dalam beberapa tahun terakhir, beberapa metode konvensional telah dilakukan untuk membantu proses pemurnian air dan menghilangkan polutan organik seperti koagulasi, flokulasi, adsorpsi, presipitasi, dan proses fenton [3]. Namun, beberapa metode tersebut membutuhkan biaya produksi dan operasional yang tinggi, proses pemisahan memakan waktu yang cukup lama, dan beberapa metode menghasilkan pencemaran lain yang berkelanjutan sehingga dibutuhkannya solusi lain untuk membantu proses pemurnian air yang lebih efisien [4]. Proses fotokatalisis dengan bantuan oksida logam seperti TiO<sub>2</sub> dan ZnO dapat dijadikan solusi karena telah dikonfirmasi mampu membantu secara efektif dan efisien dalam proses penjernihan air [5,6]. ZnO memiliki keunggulan reaktivitas permukaan yang tinggi, efisiensi fotokatalitik yang tinggi, stabilitas yang baik di bawah paparan sinar UV atau sinar matahari, dan mudah terdispersi dibandingkan TiO<sub>2</sub> [4]. Namun, ZnO memiliki keterbatasan dalam adsorpsi cahaya tampak, mengalami rekombinasi, agregasi partikel, dan fotokorosi selama reaksi fotokatalitik sehingga membatasi aktivitas fotokatalitik ZnO dalam skala besar [8]. Perekayasa morfologi [9], penambahan *doping*, dan pembentukan komposit [10] merupakan beberapa upaya

---

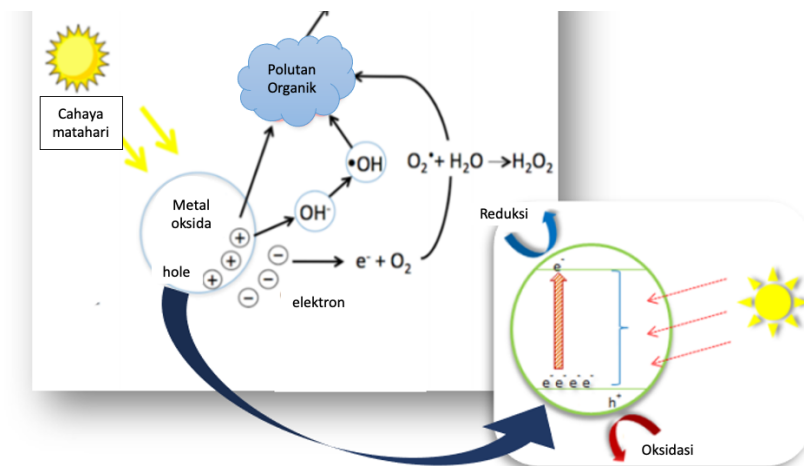
\*email : choiry15001@mail.unpad.ac.id

untuk meningkatkan aktivitas fotokatalis pada senyawa metal oksida khususnya ZnO. Penambahan senyawa berbasis karbon salah satunya adalah oksida grafena (GO) diketahui dapat meningkatkan aktivitas fotokatalis ZnO. Oksida grafena memiliki karakteristik sebagai adsorban yang dapat menyerap polutan di permukaannya. Setelah polutan menempel dipermukaan GO, selanjutnya proses pemecahan polutan dapat dilakukan oleh senyawa fotokatalis ZnO. Hal ini dapat meningkatkan efektivitas degradasi polutan oleh ZnO.

Sintesis nanopartikel ZnO sebagai fotokatalis dengan metode yang berbeda dapat menghasilkan karakteristik yang berbeda pula, beberapa metode yang dapat dilakukan diantaranya evaporasi termal, *molecular beam epitaxy* (MBE), deposisi elektrokimia, *spray pyrolysis*, dan metode sol-gel [11]. Metode sol-gel merupakan metode yang relatif sederhana, mudah, dan murah diantara metode lainnya [12]. Metode ini terdiri atas beberapa tahapan proses diantaranya hidrolisis, kondensasi, proses pengendapan/penuaan (*aging*) dan pengeringan [13]. Proses pengendapan merupakan proses yang penting dalam tahapan pada metode sol-gel, pemberian waktu pengendapan yang berbeda dapat memberikan dampak terhadap ukuran dan sifat ZnO [14]. Untuk itu pada penelitian ini dilakukan modifikasi permukaan ZnO dengan menambahkan material berbasis karbon (GO) serta pemberian beberapa variasi waktu *aging* berbeda untuk melihat sifat yang dimiliki ZnO:GO untuk aplikasi fotokatalis.

### Fotokatalis ZnO

Berbagai macam semikonduktor seperti ZnO, SnO<sub>2</sub>, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, WO<sub>3</sub>, ZnS, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, CdS, SrTiO<sub>2</sub>, WO<sub>2</sub>, α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> telah dilaporkan dapat digunakan untuk aplikasi pengolahan air limbah sebagai fotokatalis [5], namun TiO<sub>2</sub> dan ZnO merupakan bahan yang paling banyak diminati karena dapat menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi dibanding dengan yang lain [6]. Spektrum serapan UV-Vis menggambarkan bahwa nanopartikel ZnO dapat menyerap lebih banyak kuantum cahaya dibandingkan dengan TiO<sub>2</sub> [7]. ZnO memiliki lebar 3,2-3,37 eV, energi ikat eksiton 60 meV [16], memiliki sifat non-toksitas, biokompatibilitas, oksidasi kuat, fotosensitifitas tinggi, stabilitas kimiawi tinggi dan sifat fotokatalitik yang baik [6]. Sehingga ZnO telah dipandang sebagai bahan yang menjanjikan untuk berbagai aplikasi termasuk sebagai fotokatalis [16].

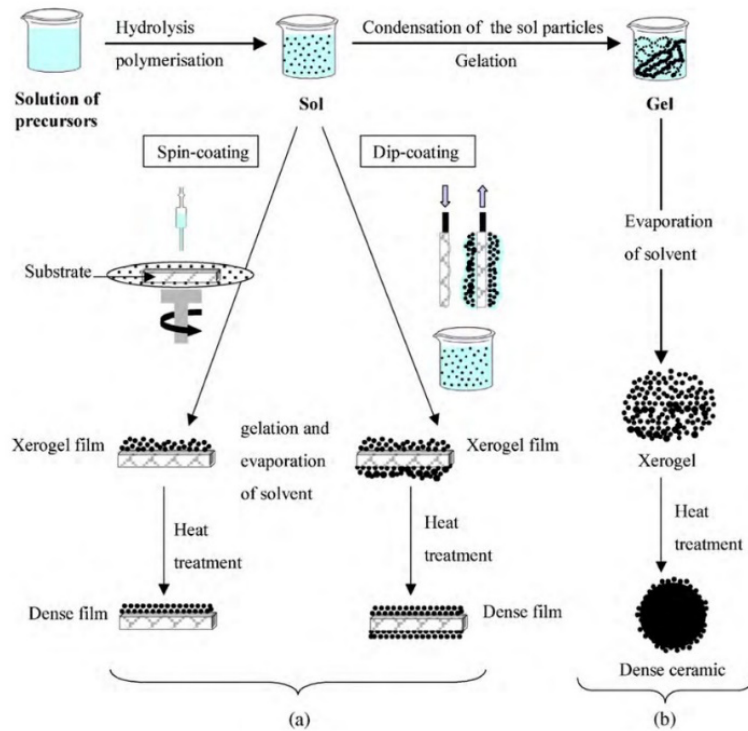


Gambar 1. Proses Fotokatalisis (skematik diadaptasi dari [17]).

Proses fotokatalisis secara umum dapat dilihat dari Gambar 1. Prinsip yang mendasari proses ini adalah pembentukan pasangan elektron-hole ketika proses penyinaran [8]. Elektron dan *hole* ini secara kimiawi berperan dalam reaksi redoks dan menghasilkan radikal bebas dan radikal hidroksil transien (OH), dimana radikal hidroksil merupakan unsur paling aktif dari oksidasi fotokatalitik molekul organik. Radikal hidroksil ini kemudian memutus ikatan karbon pada molekul polutan dan selanjutnya mengubahnya menjadi air dan CO<sub>2</sub> [8].

**Metode Sol-Gel**

Sintesis nanopartikel ZnO sebagai fotokatalis dapat dilakukan dengan berbagai metode, namun proses sol-gel relatif lebih sederhana, biaya produksi rendah, dan dapat menghasilkan partikel berukuran nano pada suhu rendah [11, 13]. Metode sol-gel terbagi menjadi enam tahapan, yakni proses hidrolisis dan kondensasi (*sol* terbentuk), kondensasi lanjutan (*gel* terbentuk), *ageing process* (endapan terbentuk), *drying process* (xerogel terbentuk), dan proses pembentukan xerogel menjadi fasa yang diinginkan [13]. Secara umum proses tersebut dijelaskan pada Gambar 2.



**Gambar 2.** Sintesis menggunakan metode sol-gel (a) Film dari sol koloid, (b) Bubuk dari sol koloid diubah menjadi gel [13].

Pemberian waktu pengendapan (*aging*) dan pemanasan merupakan dua proses penting yang dapat mempengaruhi kualitas nanopartikel ZnO yang dihasilkan. Pemberian waktu pengendapan yang berbeda akan berpengaruh terhadap sifat dan karakteristiknya sebagai material fotokatalis [15]. Menurut Ji Tao Li, selama proses *aging* sol akan terus bereaksi secara kimiawi dan partikel sol akan mengalami aglomerasi dan menjadi lebih besar [15].

## 2. Eksperimen

Senyawa precursor, pelarut dan ligand menggunakan Seng asetat dihidrat ( $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$ ), metanol, natrium hidroksida (NaOH) dan Metilen biru yang diproduksi oleh Merck. Senyawa oksida grafena (GO) yang digunakan merupakan produksi dari Graphena. Seluruh bahan kimia digunakan tanpa pemurnian dan proses lebih lanjut.

Sintesis ZnO:GO dilakukan dengan metode sol-gel.  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  sebagai prekursor sebanyak 1 gram dilarutkan ke dalam 42 ml pelarut metanol dengan *magnetic stirrer* selama 30 menit pada temperatur  $65^\circ C$  atau hingga temperatur dalam larutan lebih dari  $50^\circ C$ . Di sisi lain, sebanyak 0,28 gram NaOH dilarutkan ke dalam 23 ml pelarut metanol dengan *ultrasonic bath* selama 15 menit pada temperatur  $27^\circ C$  sampai larutan transparan homogen terbentuk. Selanjutnya larutan NaOH tersebut ditambahkan ke dalam larutan prekursor selama  $\pm 150$  menit hingga warnanya berubah dari putih keruh menjadi transparan kemudian putih susu. Larutan berwarna putih susu ini dimasukkan ke dalam botol duran dan disimpan dalam suhu ruang (*aging* proses) dengan waktu pengendapan 2 hari, 3 hari dan 5 hari. Selanjutnya, gel yang terbentuk dicuci dengan n-hexane dan Metanol dengan perbandingan perbandingan 1:1 serta disentrifugasi dengan kecepatan 3000-5000 rpm. Pencucian dilakukan sebanyak 3kali. Gel yang terbentuk kemudian dicampur dengan 0,5 ml GO dan diaduk sampai homogen. Larutan gel tersebut kemudian dipanaskan dalam kondisi vacum selama 8 jam pada temperatur  $150^\circ C$  hingga menjadi Xerogel. Xerogel yang didapat kemudian dihancurkan perlahan hingga menjadi serbuk komposit ZnO:GO.

### *Karakterisasi*

Sifat optik diamati dengan spektroskopi tampak spektroskopi fotoluminesensi (PL) dengan panjang gelombang eksitasi  $\lambda_{ex} = 325$  nm. Struktur serbuk kristal ZnO:GO dianalisis dengan alat difraksi sinar-X (Bruker) dengan sumber radiasi Cu-K Å.

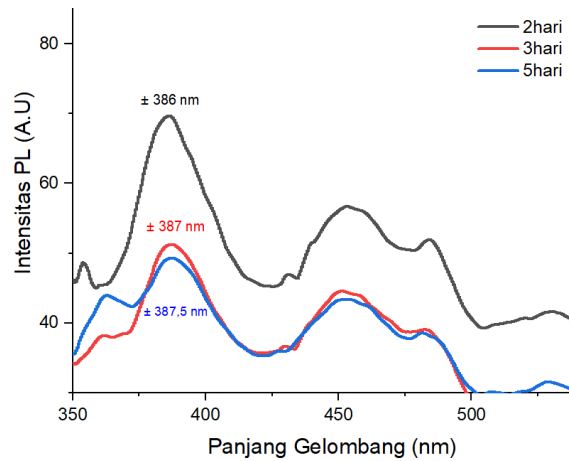
### *Uji Fotokatalitik*

Proses pengujian sifat fotokatalitik dilakukan dengan menggunakan larutan uji metil biru dan penyinaran menggunakan lampu UV. Proses pengujian diawali dengan mendispersikan 1 gr/L katalis di dalam larutan 20 mmol MB dan dipisahkan ke dalam 5 buah botol masing-masing 10 ml dengan 3 variasi waktu *aging* berbeda. Selanjutnya larutan MB-ZnO:GO yang telah dimasukkan ke dalam botol diberikan penyinaran di atas sampel menggunakan lampu UV dengan intensitas rendah 11 watt, penyinaran dilakukan selama 9-13 jam dimana setiap 1 jam 1 botol pada masing variasi waktu *aging* diambil untuk dilakukan pengujian. Perubahan warna larutan campuran MB-ZnO:GO sebagai fungsi waktu dipantau dengan menggunakan spektroskopi UV-Vis.

## 3. Hasil

Serbuk nanokomposit yang didapat pada eksperimen kemudian dilakukan beberapa uji karakterisasi untuk mengamati sifat optik, struktur kristal dan sifat fotokatalisisnya. Pengukuran fotoluminesensi dilakukan untuk melihat sifat optik dari kristal ZnO nanopartikel hasil sintesis. Spektrum fotoluminesensi (PL) nanokomposit ZnO:GO ditunjukkan pada Gambar 4. Pengujian dilakukan pada suhu kamar dengan daerah panjang gelombang 300 nm - 650 nm menggunakan panjang gelombang eksitasi 325 nm. Didapat puncak emisi pada daerah panjang gelombang UV untuk variasi waktu *aging* 2 hari, 3 hari, dan 5 hari masing-masing pada panjang gelombang 386 nm; 387 nm; dan 387,5 nm yang menunjukkan energi gap sebesar 3,209 eV, 3,201 eV dan 3,197 eV. Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin lama waktu *aging* yang diberikan maka terdapat pergeseran celah pita ke arah cahaya tampak. Hal serupa juga dikonfirmasi oleh penelitian yang dilakukan oleh DT.Speaks, dimana untuk sampel dengan konsentrasi doping rendah (0,2 dan 0,4 M) waktu pengendapan hingga

72 jam menunjukkan penurunan celah pita. Hal ini menunjukkan bahwa untuk sampel dengan konsentrasi rendah, penuaan harus diperpanjang untuk jangka waktu hingga 72 jam, untuk mendapatkan sampel yang baik [14]. Selain itu, puncak dalam rentang UV berhubungan dengan situs cacat asli pada kristal ZnO, seperti Zn interstisial ( $Zn_i$ ), kekosongan oksigen ( $O_v$ ) dan lain-lain [19].  $Zn_i$  dan  $O_v$  adalah cacat alami yang terdapat pada bahan ZnO, yang pembentukannya dipengaruhi oleh beberapa sebab, seperti cara pembuatan dan keberadaan atom dopan.



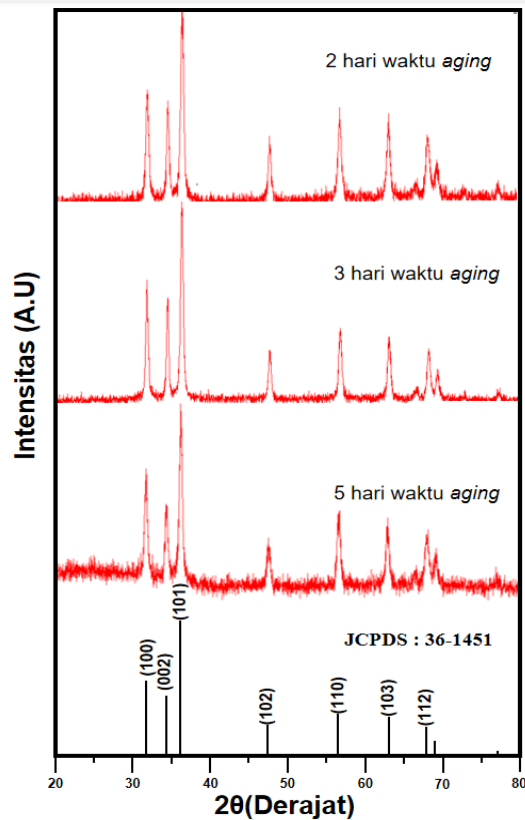
Gambar 3. Spektrum Fotokatalisis ZnO:GO dengan variasi waktu aging 2 hari, 3 hari dan 5 hari.

Pengukuran spektrum difraksi sinar-X (XRD) dilakukan untuk mengetahui struktur kristal dengan melihat indeks miller dari setiap puncak difraksi. Spektrum XRD komposit ZnO:GO ditunjukkan pada Gambar 5. Hasil yang didapat dari pengukuran nanokomposit ZnO:GO dibandingkan dengan pola difraksi standar (*Powder Diffraction File*) JCPDS No. 36-1451, didapat bahwa ketiga sampel memiliki puncak refleksi pada bidang hkl berturut-turut (100), (002), (101), (102), (110), dan (103) kecenderungan tersebut menunjukkan bahwa nanokomposit ZnO:GO memiliki struktur *Hexagonal Wurtzite*. Selanjutnya terlihat dari gambar serta nilai FWHM (*full width half maximum*) yang merepresentasikan ketajaman puncak pada setiap sampel tidak memiliki perbedaan signifikan. Nilai FWHM tersebut selanjutnya dapat digunakan untuk menghitung ukuran kristalin menggunakan persamaan Debye-Scherrer.

Hasil perhitungan ditunjukkan pada Tabel 1, dimana ukuran kristalin nanokomposit ZnO:GO pada orientasi kristal (100) untuk waktu pengendapan 2 hari, 3 hari dan 5 hari berturut-turut sebesar 36 nm, 57 nm, dan 40 nm. Pengurangan ukuran partikel tersebut pada dasarnya dapat meningkatkan luas permukaan spesifik. Namun demikian, keberadaan cacat/defect tertentu dapat menyebabkan pergeseran energi level fermi yang dapat memberikan kontribusi dalam peristiwa emisi radiasi (rekombinasi) pasangan lubang elektron.

Tabel 1. Indeks bias sampel PDMS hasil sintesis

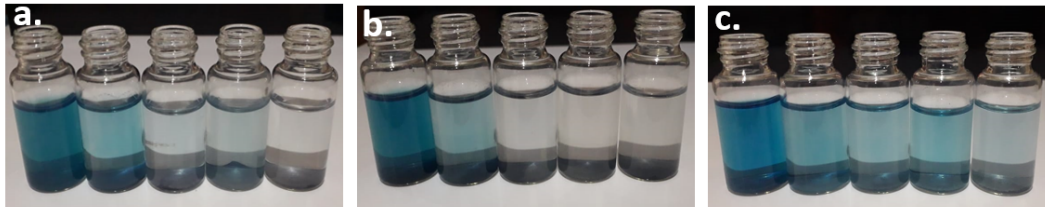
Jenis Sampel	Orientasi Kristal	Posisi Puncak ( $2\theta$ )	FWHM ( $^\circ$ )	B (Rad)	Ukuran Kristalin (nm)	Parameter Kisi ( $\text{Å}$ )
2 Hari Waktu Aging	(100)	31,7247	0,4488	0,003927	36,713267	3,24575012
	(101)	36,0898	0,408	0,00357	40,858973	4,95775328
3 Hari Waktu Aging	(100)	31,712	0,2856	0,002499	57,69045	3,24701642
	(101)	36,2501	0,3672	0,003213	45,419718	4,93553236
5 Hari Waktu Aging	(100)	31,6197	0,408	0,00357	40,374041	3,25625053
	(101)	36,1229	0,4488	0,003927	37,148038	4,93127715



Gambar 4. Spektrum XRD ZnO:GO dengan variasi waktu aging 2 hari, 3 hari dan 5 hari.

Aktivitas fotokatalitik sampel diamati dengan memantau proses degradasi larutan pewarna metilen biru (MB). Gambar 6 merupakan penampakan larutan yang mengandung senyawa metilen biru (MB) dengan penambahan senyawa ZnO:GO pada penyinaran lampu UV dengan waktu penyinaran 9-13 jam. Berdasarkan pengujian tersebut diketahui bahwa senyawa MB dapat terdegradasi melalui

proses fotokatalitik yang diperlihatkan dengan perubahan warna larutan. Pengurangan senyawa MB terlarut diamati menggunakan spektrometer UV-Vis. Gambar 7 menunjukkan hasil pengukuran spektrometer UV-Vis untuk setiap larutan. Efisiensi 100% degradasi MB pada penyinaran selama 13 jam, didapatkan untuk penggunaan sampel ZnO:GO 3 hari pengendapan. Sedangkan efisiensi degradasi MB sebesar 95% dan 70% untuk sampel ZnO:GO waktu pengendapan 2 dan 5 hari. Hal tersebut menunjukkan bahwa karakteristik fotokatalisis terbaik diperoleh dengan menggunakan ZnO:GO pengendapan 3 hari. Efisiensi fotokatalitik tersebut kemungkinan berkaitan dengan sifat/karakteristik optik yang dihasilkan. Berdasarkan hasil pengukuran spektrum fotoluminesensi, pada sampel dengan waktu pengendapan lebih lama (3 dan 5 hari) terjadi penurunan intensitas emisi. Hal ini berkaitan dengan meningkatnya jumlah pembawa muatan yang dapat bereaksi dengan oksigen dan hidrosil terlarut sehingga menghasilkan hidrosil radikal. Selain itu, waktu aging selama 3 hari tersebut dapat menghasilkan penurunan level energi untuk tingkat cacat disekitar pita konduksi (Zn interstisi).

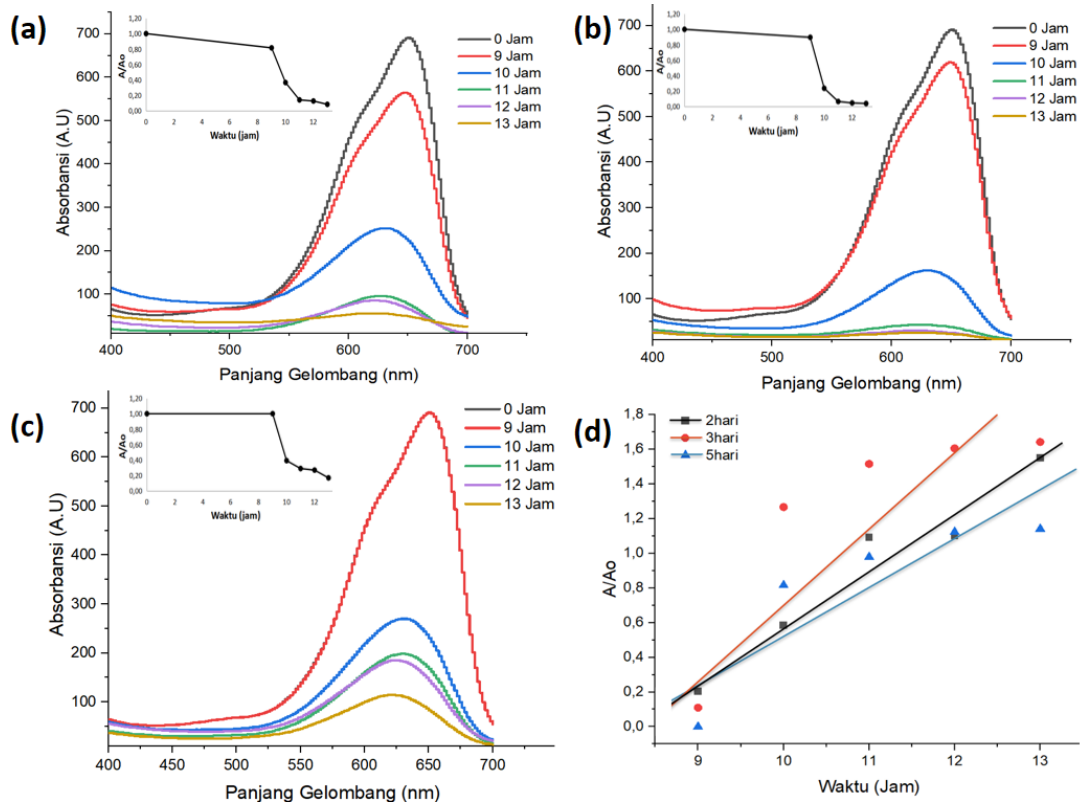


**Gambar 5.** Hasil Uji Fotokatalisis dengan waktu penyinaran 9 jam, 10 jam, 11 jam, 12 jam, dan 13 jam (a) 2 hari waktu aging (b) 3 hari waktu aging (c) 5 hari waktu aging.

Konstanta laju reaksi ( $k \cdot \text{min}^{-1}$ ) untuk setiap sampel ditunjukkan pada Gambar 7 (d). Nilai konstanta kinetik diperoleh dari plot  $-\ln(C / C_0)$  terhadap waktu ( $C$  dan  $C_0$  masing-masing adalah konsentrasi aktual dan awal) [20]. Rumus proses pseudo orde pertama dipelajari oleh Langmuir dan Hishelwood sesuai dengan persamaan berikut:

$$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = -kt \quad (1)$$

dengan  $k$  adalah konstanta laju degradasi dan  $t$  adalah waktu irradiasi [7]. Dari perhitungan, didapat konstanta laju reaksi untuk waktu aging 2 hari, 3 hari dan 5 hari masing-masing sebesar  $0,18 \text{ jam}^{-1}$ ,  $0,25 \text{ jam}^{-1}$ , dan  $0,12 \text{ jam}^{-1}$ . Aktivitas fotokatalitik tertinggi didapat pada ZnO:GO dengan waktu aging 3 hari, yang ditandai dengan konstanta laju reaksi terbesar dibandingkan dengan variasi sampel lainnya. Hal tersebut menunjukkan bahwa fotokatalis ZnO:GO dengan waktu aging 3 hari dapat mendegradasi senyawa organik lebih mudah dan lebih cepat dibandingkan dengan sampel lainnya.



**Gambar 7.** Fotodegradasi metil biru di bawah irradiasi UV untuk variasi (a) waktu *aging* 3 hari (b) waktu *aging* 5 hari (c) waktu *aging* 3 hari dan (d) Konstanta laju reaksi pseudo-orde pertama (k) versus waktu irradiasi untuk semua sampel.

#### 4. Kesimpulan

Sintesis serbuk nanokomposit ZnO:GO dilakukan menggunakan metode sol-gel dengan 3 variasi waktu pengendapan (*aging*) yaitu selama 2 hari, 3 hari dan 5 hari. Pembentukan kristal ZnO dilakukan melalui proses kristalisasi suhu rendah. Semua variasi sampel komposit ZnO:GO menghasilkan ukuran bulir kristal dalam skala nano, dimana semakin lama waktu *aging* yang diberikan maka ukuran kristalannya akan semakin membesar. Serbuk ZnO:GO telah diuji sebagai fotokatalis (1 g/L) untuk mendegradasi 20 mmol metilen biru (MB) di bawah irradiasi sinar UV. Dimana ZnO:GO dengan variasi waktu *aging* 3 hari memiliki kemampuan yang paling baik untuk mengurai MB sebagai model polutan organik. Selain itu penambahan Oksida grafena sebagai material adsorban dapat turut menyebabkan pergeseran celah pita kearah cahaya tampak, hal ini berdasarkan pada pengukuran spektrum UV-Vis dan didapatkan nilai pita energi pada ZnO:GO dengan waktu *aging* 2 hari, 3 hari, dan 5 hari berturut-turut adalah sebesar 3,21 eV, 3,20 eV dan 3,19 eV.

#### Daftar Pustaka

- [1] Baruah, Sunandan & Pal, Samir K & Dutta, Joydeep Dutta. *Nanostructured Zinc Oxide for Water Treatment, Nanoscience & Nanotechnology*. Jurnal Nanoscience & Nanotechnology, Vol.2 (2012) pp : 90-102.



- [2] S. Hong Shen Chan, T. Yeong Wu, J. Ching Juan, C. Yang Teh, *Recent Developments of Metal Oxide Semiconductors as Photocatalysts in Advanced Oxidation Processes (AOPs) for Treatment of Dye Waste-water*, 86 (2011) 1130-1158.
- [3] S. Asghar Khayatian, A. Kompany, N. Shahtahmassebi, dan A. Khorsand Zak, *Enhanced Photocatalytic Performance of Al-Doped ZnO NPs-Reduced Graphene Oxide Nanocomposite for Removing of Methyl Orange Dye from Water Under Visible-Light Irradiation*, Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials, 6 (2018) 940.
- [4] P. Raizada, P. Shandilya, P. Singh, P. Thakur, *Solar Light-facilitated Oxytetracycline Removal from The Aqueous Phase Utilizing a H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/ZnWO<sub>4</sub>/ CaO Catalytic System*, J. Taibah Univ. Sci. 11 (2017) 689–699.
- [5] B. Priya, P. Shandilya, P. Raizada, P. Thakur, N. Singh, P. Singh, *Photocatalytic Mineralization and Degradation Kinetics of Ampicillin and Oxytetracycline Antibiotics Using Graphene Sand Composite and Chitosan Supported BiOCl*, Journal Chemistry, 423 (2016) 400–413.
- [6] Adeel Riaz, Amna Ashraf, Hymna Taimoor, Sofia Javed, Muhammad Aftab Akram, Mohammad Islam, Mohammad Mujahid, Iftikhar Ahmad dan Khalid Saeed, *Photocatalytic and Photostability Behavior of Ag and Al-Doped ZnO Films in Methylene Blue and Rhodamine B Under UV-C Irradiation*, MDPI Coatings, 9 (2019) 202.
- [7] Chatchai Rodwihok, Duangmanee Wongratanaphisan, Yen Linh Thi Ngo, Mahima Khandelwal, Seung Hyun Hur, dan Jin Suk Chung, *Effect of GO Additive in ZnO/rGO Nanocomposites with Enhanced Photosensitivity and Photocatalytic Activity*, Journal of Nanomaterials, 9 (2019) 1441.
- [8] Lan Li, Lijuan Han, Yuqi Han, Zhiwang Yang, Bitao Su dan Ziqiang Lei. (2018). *Preparation and Enhanced Photocatalytic Properties of 3D Nanoarchitectural ZnO Hollow Spheres with Porous Shells*. Nanomaterials 8 (687) 1-11.
- [9] Deepalekshmi Ponnammam, John-John Cabibihan, Mariappan Rajan, S. Sundar Pethaiah, Kalim Deshmukh, Jyoti Prasad Gogoi, S.K. Khadheer Pasha, M. Basheer Ahmed, Jagadish Krishnegowda, B.N. Chandrashekar, Anji Reddy Polu dan Chun Cheng. *Synthesis, Optimization, and Applications of ZnO/polymer Nanocomposites*. Materials Science & Engineering 98 (2019) 1210-1240.
- [10] Iskandar. Riza, Saepuloh. Enang, Safriani. Lusi, dan Bachtiar. Ayi, *Optical and Structural Properties of Zinc Oxide Nanorod Synthesized by Sol-Gel Method*, AIP Conference Proceedings 1554 (2013) pp.143.
- [11] Ridhuan. Nur Syafinaz, Fong. YP, Lockman. Zainovia, Razak. KA, *Formation of ZnO Nanorods via Seeded Growth Hydrothermal Reaction in Applied Mechanics and Materials*, Applied Mechanics and Materials, Volume 83 (2011) pp.116-122.
- [12] Vladimir Kondratiev, *Processing and Characterization of Transparent Electrode Materials*, Thesis di Sun Yat-Sen University, P.R. China, 2017.
- [13] D. T. Speaks, *Effect of Concentration, Aging, and Annealing on Sol Gel ZnO and Al-Doped ZnO Thin Films*, International Journal of Mechanical and Materials Engineering :2 (2020) 15
- [14] Jitao Li, Dingyu Yang, and Xinghua Zhu, *Effects of Aging Time and Annealing Temperature on Structural and Optical Properties of Sol-Gel ZnO Thin Films*, AIP Advances 7 (2017) 065213.
- [15] T. Erinosh, D. Collins, A. Wilkinson, R. Todd, dan F. Dunne, *Assessment of X-ray Diffraction and Crystal Plasticity Lattice Strain Evolutions Under Biaxial Loading*, International Journal of Plasticity, Vol. 83, Pp. 1-18, 2016.
- [16] Ajala, Fateen & Hamrouni, Abdessalem & Houas, Ammar & Lachheb, Hinda & Megna, Bartolomeo & Palmisano, Leonardo. *The Influence of Al Doping on The Photocatalytic Activity of Nanostructured ZnO: The Role of Adsorbed Water*. Applied Surface Science, 445 (2018) pp: 376-382.
- [17] Adityal, Haryadi & Kartika, Dwi & Vaulina, Eva & Lestari, Puji. *Sintesis ZnO-TiO<sub>2</sub>/ZnO dan Aplikasinya sebagai Fotokatalis untuk Mendegradasi Zat Warna Limbah Cair Industri Tekstil*. Prosiding Seminar Nasional Kimia, (2012) 222-227.

- [18] Y.G. Habba, M.C. Gnambodoe, Y.L. Wang, *Enhanced Photocatalytic Activity of Iron-Doped ZnO Nanowires for Water Purification*, Appl. Sci. 7 (2017) 1185 (10 pages).
- [19] A.D. Mauro, M.E. Fragala, V. Privitera, G. Impellizzeri, *ZnO for Application in Photocatalysis: From Thin Films to Nanostructures*, Mater. Sci. Semicond. Process 69 (2017) 44–51.