

## Peningkatan Aktivitas Fotokatalis Nanopartikel Seng Oksida Didoping Aluminium Untuk Mereduksi Merkuri

Andini Ramadhani, Muldarisnur\*

Laboratorium Fisika Material, Departemen Fisika,  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas  
Kampus Unand Limau Manis, Padang, 25163, Indonesia

Info Artikel	ABSTRAK
<p><b>Histori Artikel:</b> Diajukan: 31 Agustus 2023 Direvisi: 23 Oktober 2023 Diterima: 08 Januari 2024</p>	<p>Merkuri (Hg) merupakan salah satu limbah logam berat yang banyak ditemukan di lingkungan perairan. Upaya penanganan diperlukan untuk menurunkan kadar pencemaran merkuri ini. Pada penelitian ini digunakan fotokatalis nanopartikel ZnO didoping Al untuk mereduksi merkuri. Nanopartikel ZnO didoping dengan variasi % mol Al 0%, 3%, 5% dan 7% menggunakan metode sol-gel. Nanopartikel ZnO/Al dikarakterisasi menggunakan <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD), <i>Particle Size Analyzer</i> (PSA), dan spektrofotometer UV-Vis. Berdasarkan hasil karakterisasi menggunakan XRD dan PSA, diperoleh ukuran kristal ZnO doping Al 0%, 3%, 5%, dan 7% berturut-turut sebesar 25,15 nm, 36,28 nm, 36,29 nm, 40,85 nm, dengan ukuran partikel 27,6 nm, 36,9 nm, 42,8 nm, 67,5 nm. Hasil uji spektrofotometer UV-Vis didapatkan <i>band gap energy</i> masing-masing sampel sebesar 3,22 eV, 3,13 eV, 3,1 eV, dan 3,02 eV. Aktivitas fotokatalisis nanopartikel diuji untuk mereduksi logam merkuri dengan variasi konsentrasi merkuri 0,5 mg/L, 1 mg/L, 1,5 mg/L dan 2 mg/L. Persen reduksi paling besar untuk setiap variasi larutan merkuri ditunjukkan oleh fotokatalis ZnO/Al 7%, dimana mampu mereduksi merkuri 0,5 mg/L, 1 mg/L, 1,5 mg/L dan 2 mg/L sebesar 94,12%, 93,68%, 93,18%, 92,76%.</p>
<p><b>Kata kunci:</b> Doping Fotokatalis Merkuri Nanopartikel Reduksi</p>	<p><i>Mercury (Hg) is one of the heavy metal wastes found in the aquatic environment. Treatment efforts are needed to reduce the levels of mercury pollution. In this research, Al-doped ZnO nanoparticles were used as photocatalyst for mercury reduction. ZnO nanoparticles were doped with variation of % mol Al 0%, 3%, 5% dan 7% using sol-gel method. ZnO/Al nanoparticles were characterised using X-Ray Diffraction (XRD), Particle Size Analyzer (PSA), dan UV-Vis spectrophotometer. Based on the XRD and PSA characterisation results, the crystal sizes of 0%, 3%, 5% dan 7% Al-doped ZnO were 25.15 nm, 36.28 nm, 36.29 nm, 40.85 nm, respectively, with particle sizes were 27.6 nm, 36.9 nm, 42.8 nm dan 67.5 nm. The results of the UV-Vis spectrophotometer test showed that the band gap energy of each sample was 3.22 eV, 3.13 eV, 3.1 eV dan 3.02 eV. The photocatalytic activity of the nanoparticles was tested to reduce mercury metal with different mercury concentrations of 0.5 mg/L, 1 mg/L, 1.5 mg/L dan 2 mg/L. The highest reduction percentage for each mercury solution variation is shown by ZnO/Al 7%, which capable to reduce mercury concentrations of 0.5 mg/L, 1 mg/L, 1.5 mg/L dan 2 mg/L were 94.12%; 93.68%; 93.18%; 92.76%.</i></p>
<p><b>Penulis Korespondensi:</b> Muldarisnur Email: <a href="mailto:muldarisnur@sci.unand.ac.id">muldarisnur@sci.unand.ac.id</a></p>	<p>Copyright © 2024 Author(s). All rights reserved</p>

## I. PENDAHULUAN

Meningkatnya kegiatan industri, pertambangan, dan pertanian mengakibatkan timbulnya permasalahan lingkungan, salah satunya disebabkan oleh pelepasan berbagai limbah logam berat, misalnya logam merkuri (Hg), timbal (Pb), dan kadmium (Cd). Logam berat bersifat toksik dan karsinogenik sehingga membahayakan kesehatan manusia dan ekosistem. Logam berat masuk ke dalam sistem perairan oleh sumber alami dan antropogenik (Sajidah, 2019). Salah satu logam berat yang banyak ditemukan di lingkungan adalah merkuri (Hg). Sekitar 5.500-8.900 ton merkuri saat ini dilepaskan ke lingkungan (United Nations Environment Programme, 2018). Keberadaan limbah buangan merkuri pada perairan di Indonesia berkisar antara 0,001-1,0910 mg/L (Maduan & Marzuki, 2022, Suteja dkk., 2019, Yulis, 2018). Nilai ini melebihi kadar merkuri maksimum menurut Peraturan Pemerintah No. 82 Tahun 2001 yaitu 0,001 mg/L. Manusia jika terpapar merkuri pada konsentrasi yang tinggi mengakibatkan kerusakan otak dan ginjal secara permanen (Yulis, 2018).

Berbagai upaya untuk menangani limbah merkuri sudah banyak dilakukan, misalnya dengan mengendapkan merkuri dengan kapur, resin penukar ion, filtrasi membran osmosis balik dan fotokatalis (Raszky, 2021). Namun, metode ini memiliki kelemahan seperti terbentuknya endapan material yang tidak diinginkan, membutuhkan waktu yang sangat lama, dan larutan ionik yang seringkali korosif (Himawan dkk., 2022). Metode yang lebih efektif untuk menurunkan kadar merkuri adalah dengan fotokatalis (Famia & Muldarisnur, 2019). Fotokatalis merupakan substansi yang dapat mempercepat reaksi kimia dengan memanfaatkan foton sebagai energi pemicunya (Ardhiati & Muldarisnur, 2019, Raszky, 2021). Katalis dapat mempercepat laju reaksi untuk mencapai keadaan kesetimbangan jika ditambahkan dalam suatu sistem reaksi kimia karena memiliki kemampuan dalam mengabsorpsi foton. Melalui proses absorpsi foton akan mengaktifkan proses katalisis sehingga substansi radikal hidroksil cepat terbentuk dan mendegradasi polutan organik menjadi produk yang lebih ramah lingkungan. Salah satu nanopartikel yang dianggap paling baik sebagai fotokatalis adalah seng oksida (ZnO) karena tinggi fotosensitivitas, harga relatif rendah, dan aman bagi lingkungan (Aldilla & Muldarisnur, 2019). Namun, fotokatalis ZnO memiliki *band gap energy* ( $E_g$ ) sebesar 3,37 eV sehingga hanya bisa diaplikasikan di bawah sinar UV ( $\lambda < 400$  nm) (Sutanto & Wibowo, 2015). Oleh karena itu, diperlukan pendoping agar *band gap energy* ( $E_g$ ) ZnO menjadi turun dan panjang gelombang bergeser dari daerah UV menjadi daerah cahaya tampak.

Aktivitas fotokatalis ZnO ditingkatkan dengan menambahkan berbagai atom dopan, seperti perak (Ag) untuk mendegradasi polutan *Methylene Blue* (Damayanti & Nusantara, 2018), lanthanum (La) untuk mendegradasi *Methyl Orange* (Nguyen dkk., 2019), dan aluminium (Al) untuk mereduksi logam timbal (Pb), zat warna *Eosin Red*, dan *Methyl Orange* (Jawed & Pandey, 2019, Mahdavi & Talesh, 2017, Jia dkk., 2018). Pada penelitian yang dilakukan oleh Mahdavi dan Talesh (2017), ZnO didoping dengan variasi Al 0%, 3%, 5%, dan 7%, dimana pada variasi terendah hingga tertinggi memiliki ukuran partikel 20-50 nm. ZnO didoping Al dilakukan menggunakan metode sintesis sol-gel. Metode sol-gel merupakan metode sintesis menggunakan teknik basah karena melibatkan larutan. Doping Al mengakibatkan *band gap energy* ZnO turun dari 3,22 eV menjadi 2,93 eV, sehingga memperluas rentang absorpsi foton hingga cahaya tampak. ZnO/Al yang telah disintesis digunakan untuk mendegradasi zat warna *Methyl Orange*, didapatkan bahwa dengan doping Al 5% mampu mendegradasi *Methyl Orange* paling tinggi yaitu sebesar 65% setelah 180 menit (Mahdavi & Talesh, 2017).

Berdasarkan pemaparan tersebut, maka dilakukan penelitian untuk meningkatkan aktivitas fotokatalis ZnO dalam mereduksi merkuri menggunakan doping Al. Al dipilih sebagai atom doping karena dapat menghambat rekombinasi pasangan elektron-hole pada fotokatalis ZnO (Iwantono dkk., 2016). Al menjebak fotogenerasi elektron dan memungkinkan elektron dan hole membentuk radikal hidroksil yang menghasilkan reaksi reduksi. Pendopingan dilakukan dengan variasi % mol Al 0%, 3%, 5%, 7% dan disintesis menggunakan metode sol-gel. ZnO/Al digunakan untuk mereduksi merkuri dengan variasi konsentrasi larutan merkuri sebesar 0,5 mg/L, 1 mg/L, 1,5 mg/L dan 2 mg/L.

## II. METODE

### 2.1 Sintesis Nanopartikel ZnO/Al

Nanopartikel ZnO didoping dengan variasi konsentrasi Al 0%, 3%, 5% dan 7% disintesis dengan metode sol-gel. ZnO 0,15 M dipreparasi dengan menambahkan *Zinc Acetate* ke methanol, dilabeli sebagai Larutan A. Ion  $Al^{3+}$  dipreparasi dengan menambahkan aluminium nitrat ke akuades (variasi Al 0%, 3%, 5%, 7%). Kemudian, larutan aluminium nitrat ditambahkan ke Larutan A dan diaduk selama 90 menit. Selanjutnya ditambahkan 1,5 M NaOH hingga pH larutan 10 dan diaduk selama 60 menit. Kemudian, sol disentrifugasi, lalu dicuci dua kali menggunakan campuran ethanol dan akuades 60-40. Endapan yang terbentuk dikeringkan pada suhu 60 °C dan dikalsinasi pada suhu 400 °C selama 2 jam.

### 2.2 Pembuatan Larutan Merkuri (Hg)

Larutan kerja Hg disiapkan dengan variasi konsentrasi 0,5 mg/L, 1 mg/L, 1,5 mg/L dan 2 mg/L, dilarutkan dengan akuades. Larutan limbah Hg sebanyak 50 ml ditambahkan ke dalam masing-masing 4 buah gelas ukur. Pengukuran nilai absorbansi dilakukan untuk masing-masing sampel larutan Hg, untuk diketahui nilai absorbansi awal sebelum ditambahkan fotokatalis.

### 2.3 Karakterisasi Sampel

Sampel ZnO/Al hasil sintesis, selanjutnya diuji menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD). XRD digunakan untuk menentukan fasa, struktur, dan ukuran kristal. Ukuran kristal ditentukan menggunakan persamaan Scherrer (Persamaan 1).

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

dengan  $D$  adalah ukuran kristal,  $k$  adalah konstanta material berhubungan dengan bentuk kristal yang nilainya kurang dari 1 (nilai yang umum dipakai adalah 0,9),  $\lambda$  adalah panjang gelombang sinar-X,  $\beta$  adalah lebar puncak saat intensitas setengah maksimum (FWHM) dalam radian, dan  $\theta$  adalah sudut difraksi (Abdullah & Khairurrijal, 2009). Sedangkan ukuran partikel dikarakterisasi menggunakan *Particle Size analyzer* (PSA). Pengujian selanjutnya menggunakan spektrometer UV-Vis untuk mengetahui *band gap energy* sampel yang dihasilkan. *Band gap energy* dari setiap sampel dihitung menggunakan metode Tauc Plot.

### 2.4 Uji Aktivitas Fotokatalis

Setiap variasi larutan limbah Hg diambil sebanyak 50 ml ditambahkan ke dalam masing-masing 4 buah gelas ukur. Sebanyak 0,05 gram serbuk nanopartikel ZnO/Al 0%, 3%, 5% dan 7% ditambahkan ke dalam masing-masing larutan limbah Hg. Larutan merkuri yang telah ditambahkan nanopartikel diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 30 menit dalam kondisi tanpa terkena cahaya (gelap). Larutan kemudian disinari lampu UV disertai dengan pengadukan konstan selama 120 menit. Masing-masing sampel diambil dengan menggunakan pipet tetes sebanyak 5 ml setiap interval 30 menit lalu dimasukkan ke dalam kuvet spektrofotometer UV-Vis untuk dilakukan pengukuran absorbansi.

Data yang diperoleh berupa absorbansi terhadap panjang gelombang. Selanjutnya, data absorbansi digunakan untuk menentukan % reduksi merkuri oleh fotokatalis menggunakan Persamaan 2.

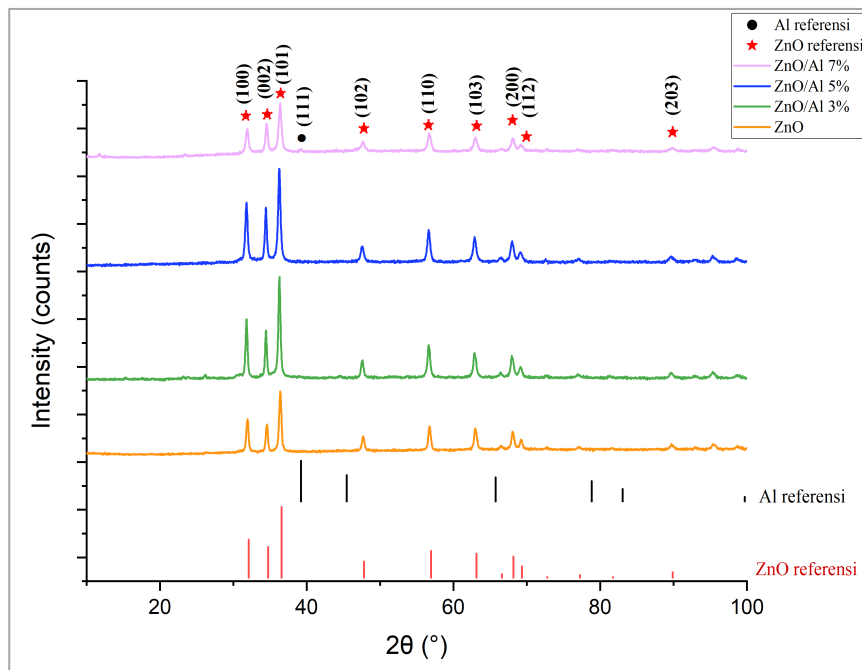
$$\% \text{reduksi} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100\% \quad (2)$$

dengan  $C_0$  adalah konsentrasi awal,  $C_t$  adalah konsentrasi akhir,  $A_0$  adalah absorbansi awal,  $A_t$  adalah absorbansi akhir (Mahdavi & Talesh, 2017, Sutanto & Wibowo, 2015).

### III. HASIL DAN DISKUSI

#### 3.1 Analisis X-Ray Diffraction (XRD)

Penentuan fasa, struktur, dan ukuran kristal ZnO doping Al 0%, 3%, 5%, dan 7% dilakukan menggunakan XRD. Difraktogram XRD ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Pola difraksi sinar-X ZnO doping Al 0%, 3%, 5%, dan 7%

ZnO tanpa doping dan ZnO dengan doping Al 3%, 5%, dan 7% masing-masing memiliki puncak tertinggi pada sudut  $2\theta = 36,444^\circ$ ,  $36,2745^\circ$ ,  $35,2764^\circ$ ,  $36,4^\circ$ . Puncak difraksi ini mengindikasikan terbentuknya ZnO dengan struktur yang terbentuk *wurtzite* dan sistem kristal heksagonal sesuai dengan ICDD 01-079-0205. Gambar 1 menunjukkan bahwa grafik memiliki pola yang sama, artinya doping Al pada lapisan ZnO tidak mengubah struktur dari ZnO (Mahdavi & Talesh, 2017). Difraktogram ZnO/Al 7% menampilkan adanya puncak aluminium pada  $2\theta = 39,182^\circ$  sesuai dengan ICDD dengan kode 00-004-0787. Difraktogram sampel ZnO doping Al 3% dan 5% tidak teramati adanya puncak Al, namun terdapat pergeseran  $2\theta$  ke sudut yang lebih kecil di setiap puncak ZnO yang menunjukkan bahwa proses pendopingan telah terjadi. Semakin besar ukuran sel satuan mengakibatkan nilai  $\theta$  menjadi semakin kecil. Pada hasil didapatkan bahwa ukuran sel satuan semakin besar ketika didoping, mengakibatkan ukuran kristal juga semakin besar. Ukuran kristal setiap sampel dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Ukuran kristal hasil XRD ZnO doping Al 0%, 3%, 5%, dan 7%

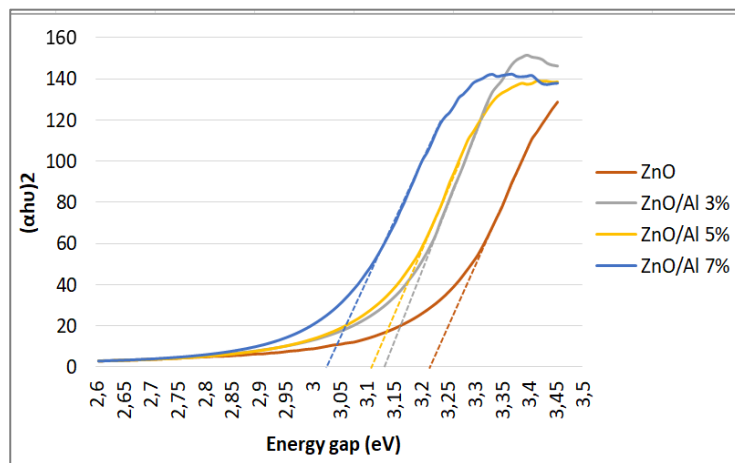
Sampel	$2\theta$ (°)	FWHM (°)	D (nm)
ZnO	36,444	0,3326	25,15
ZnO/Al 3%	36,2745	0,2303	36,28
ZnO/Al 5%	36,2764	0,2303	36,29
ZnO/Al 7%	36,4	0,2047	40,85

#### 3.2 Analisis Particle Size Analyzer (PSA)

Karakterisasi menggunakan PSA dengan teknik *Dynamic Light Scattering* (DLS) digunakan untuk menganalisis ukuran partikel. Data ukuran partikel yang diperoleh berupa data distribusi ukuran terhadap intensitas. Perbedaan intensitas dianalisis untuk mendapatkan kecepatan gerak Brown dan ukuran partikel. Hasil ukuran rata-rata partikel ZnO, ZnO/Al 3%, ZnO/Al 5%, dan ZnO/Al 7% adalah 27,6 nm, 36,9 nm, 42,8 nm, dan 67,5 nm. Setiap sampel berorde nano dengan ukuran dibawah 100 nm. Material fotokatalis berukuran nano memiliki nilai perbandingan antara luas permukaan dan volume yang lebih besar jika dibandingkan dengan partikel sejenis dalam ukuran besar, sehingga reaktivitasnya juga meningkat.

### 3.3 Analisis Band Gap Energy

Band gap energy dari sampel yang telah disintesis ditentukan menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Data hasil spektrofotometer UV-Vis berupa absorbansi dan panjang gelombang. Grafik absorbansi setiap sampel ditampilkan pada Gambar 2, dimana band gap energy ditunjukkan oleh perpotongan garis lurus dengan sumbu x.

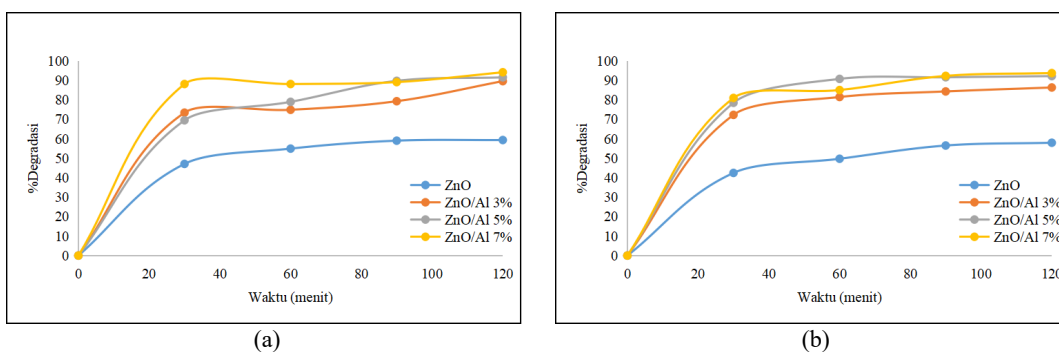


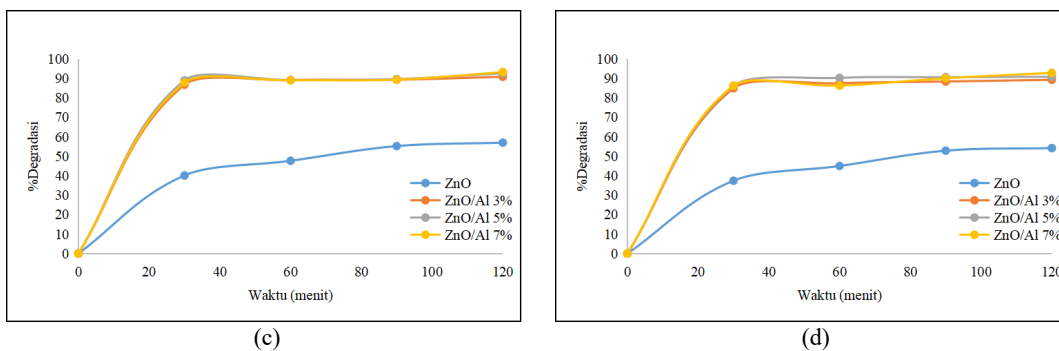
Gambar 2 Band gap energy sampel ZnO doping Al 0%, 3%, 5%, dan 7%

ZnO doping Al 0%, 3%, 5%, dan 7% memiliki band gap energy sebesar 3,22 eV, 3,13 eV, 3,1 eV, dan 3,02 eV. Nilai band gap energy sampel berkurang seiring dengan bertambahnya konsentrasi dopan Al. Band gap energy yang semakin kecil, memungkinkan fotokatalis untuk menyerap foton dalam wilayah cahaya tampak, sehingga dapat meningkatkan aktivitas fotokatalis. Pendopingan menyebabkan terbentuknya energi baru sehingga dapat memperkecil jarak celah pita valensi dan pita konduksi pada suatu semikonduktor. Semakin kecil jarak celah pita, maka energi yang dibutuhkan untuk terjadinya proses eksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi akan semakin kecil pada rentang panjang gelombang yang lebih besar.

### 3.4 Analisis Aktivitas Fotokatalis

Aktivitas fotokatalis ZnO/Al diuji untuk mereduksi limbah merkuri. Persen reduksi untuk setiap larutan merkuri oleh fotokatalis ZnO/Al ditampilkan pada Gambar 3.





**Gambar 3** Nilai persen reduksi oleh fotokatalis pada larutan merkuri: (a) 0,5 mg/L (b) 1 mg/L (c) 1,5 mg/L (d) 2 mg/L

Berdasarkan Gambar 3, terlihat bahwa semakin besar konsentrasi Al yang didoping, maka nilai persen reduksi juga semakin besar. Persen reduksi paling tinggi untuk setiap larutan merkuri 0,5 mg/L, 1 mg/L, 1,5 mg/L dan 2 mg/L adalah 94,12 %, 93,68 %, 93,18 % dan 92,76 %. Persen reduksi yang tinggi ini ditunjukkan oleh fotokatalis ZnO/Al 7%. Hasil ini menunjukkan bahwa terdapat peningkatan aktivitas fotokatalis ZnO doping Al dibandingkan dengan ZnO tanpa doping. Berdasarkan hasil karakterisasi didapatkan bahwa setiap sampel berorde nano dengan ukuran dibawah 100 nm. Material fotokatalis berukuran nano memiliki nilai perbandingan antara luas permukaan dan volume yang lebih besar, sehingga dapat meningkatkan aktivitas fotokatalis. Ukuran partikel memiliki keterkaitan dengan *band gap energy*, semakin besar ukuran partikel mengakibatkan *band gap energy* semakin sempit. Hasil uji spektrometer UV-Vis menunjukkan sampel memiliki *band gap energy* yang semakin kecil, memungkinkan fotokatalis untuk menyerap foton dalam wilayah cahaya tampak, sehingga dapat meningkatkan aktivitas fotokatalis (Mahdavi & Talesh, 2017).

Fotokatalis ZnO/Al mereduksi merkuri secara signifikan dalam 30 menit pertama. Proses melibatkan doping Al ini jauh lebih cepat dibandingkan dengan ZnO tanpa doping. Pada menit selanjutnya relatif hanya sedikit bahkan tidak ada peningkatan aktivitas fotokatalis. Jika aktivitas fotokatalis diukur dalam waktu yang lebih lama dapat diasumsikan akan cenderung menghasilkan grafik yang konstan. Hal ini disebabkan oleh fotokatalis yang sudah jenuh dalam mengabsorpsi merkuri. Proses fotokatalisis terjadi ketika nanopartikel menyerap foton dengan panjang gelombang yang sesuai, mengakibatkan tereksitasinya elektron ke pita konduksi. Namun elektron pada pita konduksi ini tidak stabil, sehingga mudah untuk berekombinasi kembali dengan *hole* pada pita valensi. Doping Al mencegah terjadinya rekombinasi pasangan elektron-*hole* ini. Ion  $Al^{3+}$  bereaksi dengan elektron dan *hole* menghasilkan ion  $Al^{2+}$  dan  $Al^{4+}$ . Kedua ion ini kurang stabil jika dibandingkan dengan  $Al^{3+}$ . Untuk mencapai kestabilan, ion-ion ini bereaksi dengan oksigen dan ion hidroksida pada permukaan katalis. Selanjutnya, akan menghasilkan radikal superoksida dan hidroksil. Ion-ion radikal inilah yang berperan dalam mereduksi merkuri, dan mengubah ion  $Hg^{2+}$  yang berbahaya dan beracun menjadi  $Hg^0$  yang relatif aman bagi lingkungan.

#### IV. KESIMPULAN

Sintesis nanopartikel ZnO/Al (variasi Al 0%, 3%, 5%, 7%) dengan metode sol-gel telah berhasil dilakukan. Pendopingan Al mengakibatkan pergeseran puncak difraksi XRD dan dapat meningkatkan ukuran kristal ZnO. Doping Al pada ZnO menurunkan *band gap energy* dari 3,22 eV menjadi 3,02 eV. Doping Al meningkatkan kemampuan penyerapan cahaya ZnO di rentang wilayah cahaya tampak. ZnO didoping Al 7% memiliki aktivitas fotokatalis paling baik, dimana mampu mereduksi setiap larutan merkuri 0,5 mg/L, 1 mg/L, 1,5 mg/L, dan 2 mg/L adalah 94,12 %, 93,68 %, 93,18 %, 92,76 %.

#### DAFTAR PUSTAKA

Abdullah, M. & Khairurrijal, K. (2009). Review: Karakterisasi Nanomaterial. *Jurnal Nano Saintek*, 2 (1), 1-9.

- Aldilla, M. S. & Muldarisnur, M. (2019). Pengaruh Konsentrasi Hexamethylene-Tetramine (HMTA) Terhadap Morfologi dan Kristalinitas Nanorod ZnO yang Disintesis Menggunakan Metode Hidrotermal. *Jurnal Fisika Unand*, 8 (4). <https://doi.org/10.25077/jfu.8.4.315-320.2019>
- Ardhiati, F. & Muldarisnur, M. (2019). Pengaruh Konsentrasi Larutan Prekursor Terhadap Morfologi dan Ukuran Kristal Nanopartikel Seng Oksida. *Jurnal Fisika Unand*, 8 (2), 133-138. <https://doi.org/10.25077/jfu.8.2.133-138.2019>
- Damayanti, N. I. & Nusantara, A. G. (2018). Pengaruh Recycle Terhadap Fotokatalitik Performance dari Nanopartikel Ag/ZnO yang Disintesa dengan Metode Pirolisa Flame. *Skripsi Jurusan Teknik Kimia. Institut Teknologi Sepuluh Nopember*.
- Famia, A. M. & Muldarisnur, M. (2019). Pengaruh Temperatur Sintesis Hidrotermal Terhadap Diameter Nanopartikel Seng Oksida. *Jurnal Fisika Unand*, 8 (2), 127-132. <https://doi.org/10.25077/jfu.8.2.127-132.2019>
- Himawan, N. A., Darmokoesoemo, H., Adiarto, T., Prasetya, A. B. & Ali, B. T. I. (2022). Pemanfaatan Nanokitosan Sebagai Adsorben Merkuri (Hg) pada Limbah Pengolahan Bijih Emas. *Eksergi*, 19 (2), 82-90. <https://doi.org/10.31315/e.v19i2.6862>
- Iwantono, I., Anggelina, F., Nurrahmawati, P., Naumar, F. Y. & Umar, A. A. (2016). Optimalisasi Efisiensi Dye Sensitized Solar Cells Dengan Penambahan Doping Logam Aluminium pada Material Aktif Nanorod ZnO Menggunakan Metode Hidrotermal. *Jurnal Material dan Energi Indonesia*, 6 (1), 36-43. <https://doi.org/10.24198/jmei.v6i01.11146>
- Jawed, A. & Pandey, L. M. (2019). Application of bimetallic Al-doped ZnO nano-assembly for heavy metal removal and decontamination of wastewater. *Journal of Water Science & Technology*, 80 (11), 2067-2078. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.393>
- Jia, W., Shang, Y., Gong, L. & Chen, X. (2018). Synthesis of Al-ZnO nanocomposite and its potential application in photocatalysis and electrochemistry. *Inorganic Chemistry Communications*, 88 51-55. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2017.12.013>
- Maduan, K. R. & Marzuki, I. (2022). Penelusuran dan Distribusi Polutan Logam Berat Merkuri dan Kadmium pada Kawasan Wisata Bahari Kota Makassar. *Jurnal Serambi Engineering*, 7 (3), 3293-3302. <https://doi.org/10.32672/jse.v7i3.4239>
- Mahdavi, R. & Talesh, S. S. A. (2017). Sol-gel synthesis, structural and enhanced photocatalytic performance of Al doped ZnO nanoparticles. *Advanced Powder Technology*, 28 (5), 1418-1425. <https://dx.doi.org/10.1016/j.apt.2017.03.014>
- Nguyen, L. T. T., Nguyen, L. T. H., Duong, A. T. T., Nguyen, B. D., Hai, N. Q., Chu, V. H., Nguyen, T. D. & Bach, L. G. (2019). Preparation, characterization and photocatalytic activity of La-doped zinc oxide nanoparticles. *Materials*, 12 (8), 1-11. <https://doi.org/10.3390/ma12081195>
- Raszky, R. G. (2021). Sintesis Nanopartikel Nickel Ferrite (NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) dan Aplikasinya untuk Penyisihan Merkuri (Hg). *Skripsi Jurusan Teknik Lingkungan. UIN Ar-Raniry*.
- Sajidah, S. (2019). Analisis Kandungan Merkuri (Hg) pada Air dan Sedimen Sungai Geumpang, Pidie, Aceh. *Skripsi Jurusan Teknik Lingkungan. UIN Ar-Raniry*.
- Sutanto, H. & Wibowo, S. (2015). *Semikonduktor Fotokatalis Seng Oksida dan Titania (Sintesis, Deposisi dan Aplikasi)* Semarang, Telescope
- Suteja, Y., Purwiyanto, A. I. S. & Agustriani, F. (2019). Merkuri (Hg) di Permukaan Perairan Muara Sungai Banyuasin, Sumatera Selatan, Indonesia. 5 (2), 177-184. <https://doi.org/10.24843/jmas.2019.v05.i02.p03>
- United Nations Environment Programme (2018). *Global Mercury Assesment*, United Nations Environment Programme.
- Yulis, P. a. R. (2018). Analisis Kadar Logam Merkuri (Hg) dan (pH) Air Sungai Kuantan Terdampak Penambangan Emas Tanpa Izin (PETI). *Orbital: Jurnal Pendidikan Kimia*, 2 (1), 28-36. <http://doi.org/10.19109/ojpk.v2i1.2167>