

Sintesis Nanopartikel Mg-CoFe₃O₄ dari Limbah Industri Ubin Keramik sebagai Material Fotokatalis

RIZKI ADITYAWAN MAULANA^{1*}, EKO PRABOWO HADISANTOSO¹, RIZKY BERLIANA WIJAYANTI²,
FERRY ARIFIADI², DAN KRISTANTO WAHYUDI²

¹UIN Sunan Gunung Djati, Bandung

²Balai Besar Keramik, Bandung

* Adityawan177@gmail.com

Informasi Artikel	Abstrak/Abstract
<p>Kata Kunci: Fe₃O₄; fotokatalis; kobalt; limbah ubin keramik; magnesium.</p>	<p>Industri keramik menghasilkan limbah besi oksida yang dapat dimanfaatkan sebagai material fotokatalis untuk mendegradasi zat warna metilen biru (MB). Limbah besi oksida sebagian besar mengandung Fe₂O₃. Pada penelitian ini dilakukan sintesis Fe₃O₄ dari limbah industri ubin keramik dengan penambahan Na-Sitrat untuk mereduksi Fe₂O₃ menjadi Fe₃O₄ menggunakan metode <i>solid state</i>. Material Fe₃O₄ (magnetite) ditingkatkan kinerja fotokatalitiknya dengan cara menambahkan dopan Mg²⁺ dan Co²⁺ sehingga terbentuk Mg_xCo_{1-x}Fe₃O₄ (MCM) dengan fraksi x = 0,03; 0,05 dan 0,07 ditulis sebagai MCM-1, MCM-2, dan MCM-3 dengan metode <i>solid state</i>. Hasil XRD menunjukkan bahwa Fe₃O₄, MCM-1, MCM-2, MCM-3 memiliki bentuk <i>spinel cubic</i> yang memiliki kesesuaian dengan fasa Fe₃O₄ serta masih terdapat pengotor Fe₂O₃. Ukuran kristal yang didapatkan untuk Fe₃O₄, MCM-1, MCM-2, MCM-3 berturut-turut sebesar 39,61; 34,42; 41,28; 32,11 nm. Semakin kecilnya ukuran kristal maka akan semakin baik degradasi fotokatalisnya. Hasil SEM menunjukkan bahwa sampel Fe₃O₄, MCM-1, MCM-2, dan MCM-3 memiliki morfologi <i>spherical cubic</i> dan terjadi aglomerasi dengan ukuran partikel berkisar antara 126,05 – 149,50 nm. Hasil SEM menunjukkan bahwa semakin banyak Mg²⁺ yang ditambahkan semakin kecil aglomerasi yang terjadi. Hasil UV-DRS menunjukkan peningkatan penambahan dopan Mg²⁺ dapat menurunkan celah pita dari 2,02 menjadi 1,95 eV. Dengan hasil yang didapatkan, material yang berhasil di sintesis dapat digunakan sebagai material fotokatalis.</p>
<p><i>Keywords:</i> Fe₃O₄; photocatalyst; cobalt; magnesium; waste ceramic tiles.</p>	<p><i>The ceramic industry produces iron oxide waste which can be used as a photocatalyst material to degrade methylene blue (MB) dye. Iron oxide waste mostly contains Fe₂O₃. In this study, Fe₃O₄ was synthesized from ceramic tile industrial waste with the addition of Na-Citra to reduce Fe₂O₃ to Fe₃O₄ using the solid state method. Fe₃O₄ (magnetite) material improved its photocatalytic performance by adding Mg²⁺ and Co²⁺ dopants to form Mg_xCo_{1-x}Fe₃O₄ (MCM) with a fraction x = 0.03; 0.05 and 0.07 are written as MCM-1, MCM-2, and MCM-3 by the solid state method. XRD results show that Fe₃O₄, MCM-1, MCM-2, MCM-3 have spinel cubic shape which is compatible with Fe₃O₄ phase and still contains Fe₂O₃ impurities. The crystal sizes obtained for Fe₃O₄, MCM-1, MCM-2, MCM-3 were 39.61; 34.42; 41.28; 32.11 nm. The smaller the crystal size, the better the photocatalyst degradation. SEM results showed that Fe₃O₄, MCM-1, MCM-2, and MCM-3 samples had a spherical cubic morphology and agglomeration occurred with particle sizes ranging from 126.05 to 149.50 nm. The SEM results show that the more Mg²⁺ added, the smaller the agglomeration that occurs. The results of UV-DRS show that the addition of Mg²⁺ dopants can reduce the band gap from 2.02 to 1.95 eV. With the results obtained, the material that has been successfully synthesized can be used as a photocatalyst material.</i></p>

PENDAHULUAN

Di Indonesia, industri keramik banyak menghasilkan besi oksida khususnya pada pembuatan keramik lantai. Dari hasil industri

tersebut tentunya menghasilkan limbah yang jarang dimanfaatkan seperti limbah yang dihasilkan dari proses *ceramic body grinding*, *filter magnet*, *spray drying*, proses cetak *press* dan pemotongan ubin keramik [1]. Limbah yang

dihasilkan dari proses *filter magnet* dapat di manfaatkan kembali dari proses *filter magnet* karena besi oksida yang dihasilkan masih banyak.

Besi oksida merupakan oksida logam yang mempunyai struktur stoikiometri dan kristal yang berbeda yaitu wustite (FeO), hematite (α -Fe₂O₃), maghemite (γ -Fe₂O₃), dan magnetit (Fe₃O₄). Besi oksida berupa Fe₂O₃ dapat bertransformasi hanya dengan proses kalsinasi menjadi magnetite (Fe₃O₄) [2]. Senyawa magnetite (Fe₃O₄) memiliki banyak keuntungan diantaranya termasuk ke dalam superparamagnetis, medan saturasi yang tinggi, dapat memblokir suhu, stabilitas kimia, biokompatibilitas, dan biaya produksi yang rendah karena memiliki struktur *spinel* [3] [4]. Karena sifat dan strukturnya tersebut, magnetite dapat di gunakan dalam berbagai aplikasi, seperti agen kontras *magnetic resonance imaging* (MRI) [3], *magnetic fluids* [5], terapi hipertermia [3], penghantaran obat yang terkontrol dan terarah [3], pengobatan kanker [3], penyimpanan data [6], katalis [7] [8] [9], cat dan tinta magnetik [9], mikroelektronika [9], rekaman magnetik kepadatan tinggi [9], pendinginan magnetik [9], baterai [10] [11], atau sorben untuk menghilangkan polutan [8], dan sebagai material fotokatalis [12] [13] [14] [15].

Telah dilaporkan bahwa metode sintesis menjadi faktor yang mempengaruhi kristalinitas, luas permukaan, sifat kimia dan fisik, saturation magnetization (Ms), dan distribusi kation [16]. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk sintesis material tersebut yaitu metode *solid state* [17] [18] [19] [20]. Dibandingkan dengan metode lain, metode *solid state* memiliki beberapa banyak keuntungan yaitu tahapannya mudah serta akan meminimalisir kontaminan yang ikut pada proses penggerusan dan pemanasan serta termasuk ke dalam metode sintesis *green chemistry*.

Selain itu, dopan logam menjadi faktor lain yang dapat mempengaruhi aktivitas dan kinerja dari material magnetite seperti sifat optik, sifat magnetik, sifat semikonduktor, dan sifat elektronik [21]. Suatu logam dapat dijadikan dopan terhadap suatu material harus memiliki kriteria tertentu, salah satu syaratnya adalah memiliki jari-jari ion yang mirip antara dopan dan juga materialnya. Pada penelitian ini digunakan magnesium dan juga kobalt sebagai dopan. Jari-jari ion kedua logam tersebut memiliki kemiripan yaitu logam Mg²⁺ adalah 66 pm dan Co²⁺ adalah 72 pm sedangkan jari-jari ion Fe²⁺ dan Fe³⁺ adalah sebesar 55 dan 67 pm.

Karena sifat dari magnetite dapat diaplikasikan sebagai material fotokatalis,

tentunya hal ini dapat mengatasi polutan organik berbahaya yang berasal dari industri tekstil dan farmasi seperti Metilen Biru (MB). Penelitian sebelumnya telah dilakukan sintesis material α -hematite (α -Fe₂O₃) dari limbah industri ubin keramik sebagai material fotokatalis dapat mendegradasi zat warna metilen biru sebesar 52,53% [22]. Penelitian lain juga menjelaskan bawah magnetite dapat menurunkan polutan *reactive red* di bawah sinar matahari sebesar 85,51%, pada penelitian sebelumnya juga telah dilakukan aplikasi Fe₃O₄ sebagai material fotokatalis terhadap metilen biru menggunakan metode presipitasi hanya dapat mendegradasi metilen biru hingga 60,17% [23]. Maka dari itu perlu dilakukan peningkatan kinerja dari magnetite dengan cara menambahkan dopan. Penambahan dopan ini dimaksudkan untuk memperbaiki dan meningkatkan kinerja dari material magnetite (Fe₃O₄) yang berasal dari limbah industri keramik. Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dilakukan sintesis Fe₃O₄ untuk memperoleh material fotokatalis dengan penambahan *double* dopan Mg dan Co diawali dengan preparasi magnetite dari limbah industri ubin keramik dengan cara mekanik menggunakan metode *solid state*.

EKSPERIMEN

Pada penelitian ini, dilakukan sintesis Mg-CoFe₃O₄ (MCM) dengan tujuan untuk mengidentifikasi aktivitas material tersebut sebagai material fotokatalis. Sumber Fe₃O₄ berasal dari limbah ubin keramik, pembentukan Mg-CoFe₃O₄ (MCM) digunakan metode *solid state* dengan menggunakan bahan CoCl₂.6H₂O dan MgCl₂.6H₂O. Selanjutnya material yang terbentuk dianalisis karakteristiknya menggunakan *X-ray Diffraction* (XRD), *Scanning Electron Microscopy* (SEM), dan *UV-Vis Diffuse Reflectance Spectroscopy* (UV-DRS)

Material

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah Limbah industri ubin keramik, MgCl₂.6H₂O Pro analis (Merck), CoCl₂.6H₂O Teknis, dan Na-Sitrat pro analis *Import* (Brataco Chemica).

Instrumentasi

Instrumentasi yang digunakan meliputi instrumentasi *X-ray Diffraction* (XRD) digunakan untuk pengujian fasa dan kristalinitas senyawa hasil sintesis, *Scanning Electron Microscopy*

(SEM) digunakan untuk mengetahui morfologi dari hasil sampel, *UV-Vis Diffuse Reflectance Spectroscopy* (UV-DRS) digunakan untuk menentukan celah pita.

Prosedur

Preparasi limbah ubin keramik

Sebanyak 500 gram limbah ubin keramik dimasukkan ke dalam pot mill, ditambahkan air sebanyak 2000 mL dan kemudian digiling selama 2 jam. Setelah itu, endapan yang terdapat pada pot mill dimasukkan ke dalam gelas kimia 1000 mL dan di dekantasi secara berulang hingga terlihat jernih. Endapan dipanaskan pada suhu 110°C selama 24 jam.

Untuk mendapatkan Fe_3O_4 maka dilakukan sintesis menggunakan metode *solid state*. Material limbah ubin keramik timbang sebanyak 1 mmol yang merupakan senyawa Fe_2O_3 kemudian ditambahkan Na-sitrat sebanyak 4 mmol. Kedua campuran tersebut digiling selama 30 menit. Hasil gilingan di kalsinasi dengan suhu 450 °C selama 4 jam.

Sintesis $\text{Mg-CoFe}_3\text{O}_4$ (MCM)

Untuk sintesis senyawa nanopartikel $\text{Mg}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_3\text{O}_4$, sejumlah $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, dan Fe_3O_4 ditimbang dengan perbandingan stoikiometri menggunakan variasi mol logam divalen (x) 0,07; 0,05 dan 0,03. Untuk $\text{Mg}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_3\text{O}_4$ ($x=0,03$) di tulis sebagai MCM-1, $\text{Mg}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_3\text{O}_4$ ($x = 0,05$) di tulis sebagai MCM-2, dan $\text{Mg}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_3\text{O}_4$ ($x = 0,07$) di tulis sebagai MCM-3. Bahan yang sudah ditimbang kemudian di giling selama 30 menit dan di kalsinasi dengan suhu 600 °C selama 2 jam.

Karakterisasi

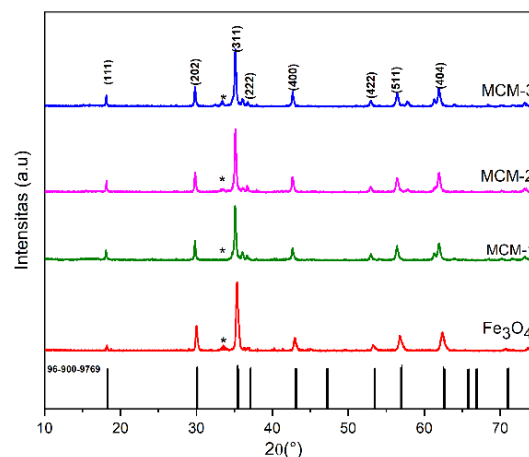
Proses karakterisasi yang dilakukan meliputi *X-ray Diffraction* (XRD) digunakan untuk pengujian fasa dan kristalinitas senyawa dari sampel Fe_3O_4 hasil preparasi dan MCM hasil sintesis, *Scanning Electron Microscopy* (SEM) digunakan untuk mengetahui morfologi dari hasil sampel MCM hasil sintesis. *UV-Vis Diffuse Reflectance Spectroscopy* (UV-DRS) digunakan untuk menentukan celah pita.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi *X-ray Diffraction* (XRD)

Karakterisasi *X-ray Diffraction* (XRD) digunakan untuk menentukan fasa kristal dari MCM hasil sintesis. Pada pengukuran ini digunakan radiasi $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=0.154$ nm) pada 2θ 10-75°. Pada **Gambar 1** menunjukkan pola puncak atau difraktogram pada puncak difraksi dengan intensitas tertentu.

Berdasarkan pada **Gambar 1** menunjukkan bahwa hasil sintesis merupakan senyawa Fe_3O_4 (magnetite). Pola difraktogram tersebut dianalisis lebih lanjut menggunakan *software Match!*. Puncak difraksi pada 2θ memiliki kesesuaian dengan *database* Fe_3O_4 (magnetite) dengan nomor kode 96-900-9769. Hal ini mengonfirmasi bahwa fasa yang terbentuk merupakan *spinel cubic* dengan *space group* Fd-3m. Pada puncak difraktogram adanya penambahan puncak (*) yang merupakan fasa dari $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Puncak difraksi pada MCM menunjukkan hasil seperti Fe_3O_4 yaitu memiliki struktur dan *space group* yang sama.



Gambar 1 Pola difraktogram Fe_3O_4 , MCM-1, MCM-2, dan MCM-3

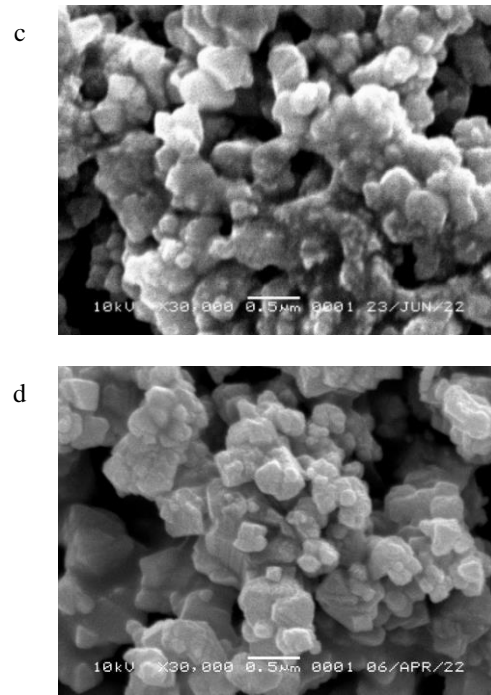
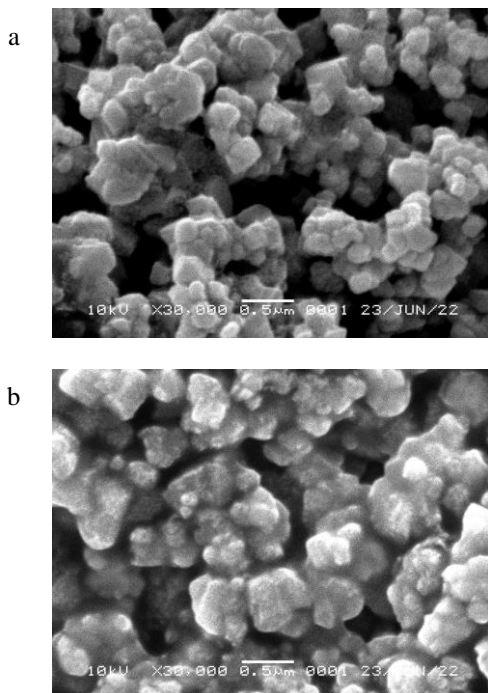
Hasil ukuran kristal dari Fe_3O_4 , MCM-1, MCM-2, dan MCM-3 dapat dilihat pada **Tabel 1**. Semakin banyak penambahan Co^{2+} maka semakin kecil ukuran kristal yang dihasilkan dan %kristalinitas juga bertambah. Peningkatan Co^{2+} mengakibatkan peningkatan luas permukaan dan hal ini terkait dengan nukleasi dan pertumbuhan partikel [24]. Banyaknya Co^{2+} juga dapat mengakibatkan bertambahnya parameter kisi. Hal ini bisa disebabkan karena jari-jari ion Co^{2+} (0.72Å) dapat menggantikan ion Mg^{2+} yang lebih kecil (0.66Å) dan Fe^{3+} (0.67 Å).

Tabel 1 Perbandingan ukuran kristal

Sampel	Ukuran kristal (nm)	Kristalinitas (%)	Parameter kisi (Å)
α -Fe ₂ O ₃ [22]	24,27	31,28	-
Fe ₃ O ₄	39,61	44,92	8,41
MCM-1	34,42	52,23	8,46
MCM-2	41,28	46,68	8,46
MCM-3	32,11	57,23	8,47

Ukuran kristal dan kristalinitas dapat mempengaruhi sifat fotokatalis. Semakin kecil ukuran kristal maka semakin besar juga luas permukaan yang dihasilkan, sehingga akan semakin baik aktivitas fotokatalisnya. Selain itu, defek kristal juga mempengaruhi aktivitas fotokatalitik. Semakin tinggi tingkat defek kristal maka migrasi elektron untuk memproduksi radikal hidroksil semakin mudah.

Karakterisasi Scanning Electron Microscopy (SEM)



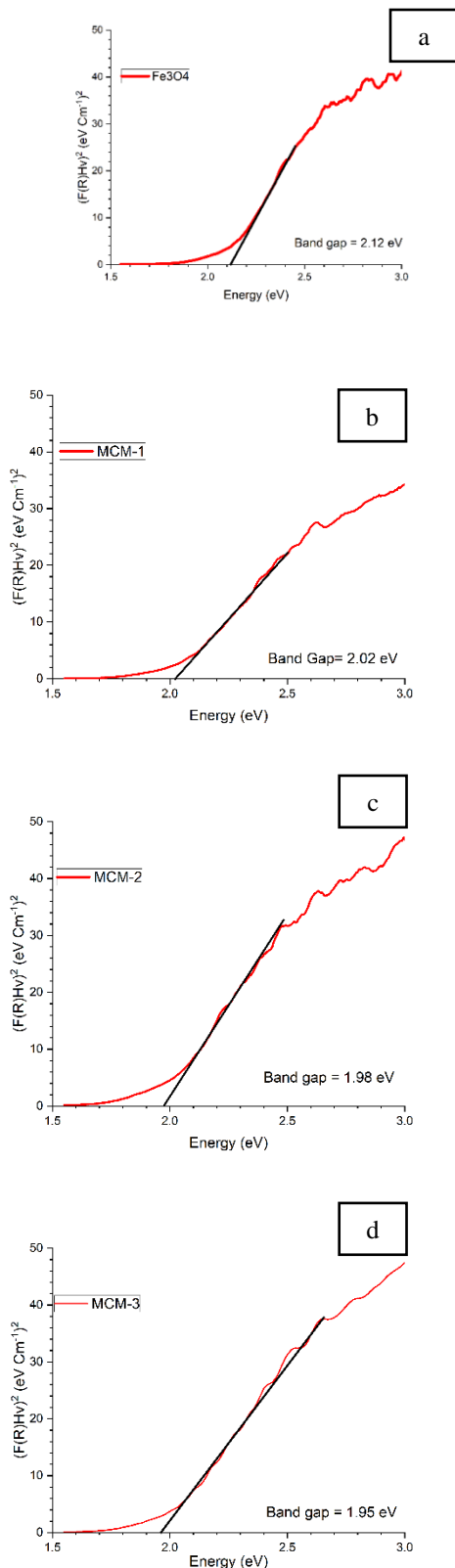
Gambar 2 Hasil Foto SEM sampel Fe₃O₄(a), MCM-1 (b), MCM-2 (c), dan MCM-3 (d)

Berdasarkan Hasil analisis menggunakan SEM menunjukkan hasil morfologi dari setiap sampel yaitu berbentuk kotak namun cenderung sedikit bulat (*spherical cubic*) seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Dari gambar tersebut menunjukkan adanya aglomerasi. Aglomerasi ini dapat disebabkan karena interaksi dipol magnetik dan gaya *van der waals* antara Fe, Co, dan Mg [25]. Dengan demikian, sampel memiliki reaktivitas tinggi yang muncul karena adanya interaksi pertukaran antar partikel [26]. Aglomerasi ini berkurang seiring dengan bertambahnya Mg²⁺ dan memperkecil ukuran partikel seperti ditunjukkan pada Tabel 2. Ukuran partikel yang semakin kecil dapat mempengaruhi aktivitas fotokatalisnya. Karena akan semakin kecil ukuran partikelnya maka akan semakin baik aktivitas fotokatalisnya.

Tabel 2 Perbandingan ukuran partikel dari setiap sampel

Sampel	Ukuran partikel (nm)
α -Fe ₂ O ₃ [22]	189,089 ± 0,066
Fe ₃ O ₄	126,06 ± 0,032
MCM-1	149,50 ± 0,060
MCM-2	135,38 ± 0,082
MCM-3	126,05 ± 0,082

Karakterisasi UV-Vis Diffuse Reflectance Spectroscopy (UV-DRS)



Gambar 3 Grafik Hasil UV-DRS metode Kubelka-Munk Fe₃O₄ (a), MCM-1 (b), MCM-2 (c), MCM-3 (d)

Karakterisasi UV-Vis Diffuse Reflectance Spectroscopy (UV-DRS) digunakan untuk menentukan celah pita. Hasil yang didapatkan pada karakterisasi ini berupa Reflektansi dan panjang gelombang. Dalam penentuan celah pita dari masing-masing sampel digunakan metode Kubelka-Munk melalui persamaan (1) sebagai berikut:

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

Dimana, α = koefisien Absorpsi

R = reflektansi

F(R) = Fungsi Kubelka-Munk

Metode Kubelka-Munk digambarkan melalui hubungan antara $(F(R)hv)^2$ dan energi foton (hv) untuk sampel yang di sintesis. Bagian linear dari kurva di ekstrapolasi dan nilai diperkirakan nilai optik dari celah pita yang dihasilkan seperti ditunjukkan pada **Gambar 3**.

Dari **Gambar 3** didapatkan bahwa penambahan Mg²⁺ dapat menurunkan nilai energi celah pita. Penurunan energi celah pita ini juga berhubungan dengan terjadinya aglomerasi dengan material hasil sintesis. Aglomerasi ini akan mempengaruhi pergeseran serapan dan menyebabkan timbul celah pita baru antara pita valensi dan pita konduksi maka energi yang dibutuhkan untuk terjadinya eksitasi elektron semakin kecil. Sehingga daya adsorpsi cahaya dari sampel akan menjadi lebih besar. Dalam aplikasi fotokatalis, peningkatan daya adsorpsi berpotensi menjadikan proses fotokatalis menjadi lebih baik. Ketika konsentrasi doping Co²⁺ bertambah maka nilai celah pita ikut bertambah besar hal ini terjadi karena pengurangan ukuran Mg_xCo_{1-x}Fe₃O₄ (efek pengurangan kuantum) [27].

SIMPULAN

Material Magnetite dapat disintesis dari limbah industri ubin keramik hal ini dikonfirmasi dengan karakterisasi XRD yang memiliki kesesuaian dengan database dan terbentuk puncak berupa pengotor. Ukuran kristal dari Fe₃O₄, MCM-1, MCM-2, MCM-3 berturut-turut sebesar 39,61; 32,11; 41,28; 34,42 nm dengan %kristalinitas 44,92%;57,23%; 46,68%; 52,23%. Hasil karakterisasi SEM menunjukkan bahwa Fe₃O₄, MCM-1, MCM-2, dan MCM-3 berbentuk *spherical cubic* dengan ukuran partikel berturut-turut sebesar 126,06; 149,50; 135,38; 126,05 nm. Hasil dari karakterisasi UV-DRS menunjukkan bahwa peningkatan Mg²⁺ dapat memperkecil nilai celah pita. Nilai dari Fe₃O₄, MCM-1, MCM-2, MCM-3 yaitu sebesar 2,12 eV; 2,02 eV 1,98 eV; 1,95 eV. Dengan demikian, material yang

didapatkan dapat diaplikasikan sebagai material fotokatalis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kepada Balai Besar Keramik, Pusat Survei Geologi, dan Laboratorium Kimia Universitas Indonesia yang telah membantu penelitian ini.

REFERENSI

- [1] F. E. Garcia-muina., R. Gonzalez-Sanchez., A. M. Ferrari. dan D. S. Blundo, "The Paradigms of Industry 4.0 and Circular Economy as Enabling Drivers for the Competitiveness of Businesses and Territories: the case of an Italian Ceramic Tiles Manufacturing Company," *Social Sciences*, vol. 7, pp. 1-31, 2018.
- [2] V. P. Ponomar, O. B. Brik, Y. I. Cherevko dan V. V. Ovsienko, "Kinetics of hematite to magnetite transformation by gaseous reduction at low concentration of carbon monoxide," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 148, pp. 399-402, 2019.
- [3] A. Cotar., A. Grumezescu., K. C. Huang., G. Voicu., M. Chifiriuc. dan R. Radulescu, "Magnetite nanoparticles influence the efficacy of antibiotics against biofilm embedded *Staphylococcus aureus* cells," *Biointerface Research in Applied Chemistry*, vol. 3, pp. 559-565, 2013.
- [4] V. S. Cabeza, "High and Efficient Production of Nanomaterials by Microfluidic Reactor Approaches," dalam *Advances in Microfluidics-New Applications in Biology, Energy, and Materials Sciences*, InTech Rijeka, 2016.
- [5] T. Gu., Y. Zhang., S. A. Khan. dan T. A. Hatton, "Continuous Flow Synthesis of Superparamagnetic Nanoparticles in Reverse Miniemulsions," *Colloid and interface Science Communication*, vol. 28, pp. 1-4, 2019.
- [6] A. A. Velasquez. dan J. P. Urquijo, "Synthesis and characterization of magnetite-maghemite nanoparticles in presence of polyethylene glycol obtained by mechanical milling," *Materials Science and Engineering*, vol. 263, p. 114873, 2021.
- [7] V. Amendola., P. Riello. dan M. M., "Nanoparticles of Iron Carbide, Iron Oxide, Iron@Iron Oxide, and Metal Iron Synthesized by Laser Ablation in Organic Solvents," *Journal Physical Chemistry*, vol. 115, no. 12, pp. 5140-5146, 2011.
- [8] L. Novoselova, "Nanoscale magnetite: New synthesis approach, structure and properties.," *Applied Surface Science*, vol. 539, p. 148725, 2021.
- [9] D. d. Queiroz., E. d. Camargo. dan M. U. Martines., "Synthesis and characterization of magnetic nanoparticles of cobalt ferrite coated with silica," *Biointerface Research in Applied Chemistry*, vol. 10, pp. 4908-4913, 2019.
- [10] S. D. A. Zaidi., C. Wang., B. Gyorgy., C. Sun., H. Yuan., L. Tian. dan J. Chen, "Iron and silicon oxide doped/PAN-based carbon nanofibers as free-standing anode material for Li-ion batteries," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 569, pp. 164-176, 2020.
- [11] J. Li., Y. Li., X. Chen., K. Kierzek., X. Shi., P. K. Chu., T. Tang. dan E. Mijowska, "Selective Synthesis of Magnetite Nanospheres with Controllable Morphologies on CNTs and Application to Lithium-Ion Batteries," *Phys. Status Solidi A*, vol. 216, no. 11, p. 1800924, 2019.
- [12] A. Hameed, "Photocatalytic activity of Fe₃O₄ under solar radiation," *Mesopotamia Environmental Journal*, vol. 2, no. 4, pp. 41-53, 2016.
- [13] M. Sundararajan., L. J. Kennedy., P. Nithya., J. J. Vijaya. dan M. Bououdina, "Visible light driven photocatalytic degradation of rhodamine B using Mg doped cobalt ferrite spinel nanoparticles synthesized by microwave combustion method," *Journal of Physical and Chemistry of Solids*, vol. 108, pp. 61-75, 2017.
- [14] P. Dhiman., T. Mehta., A. Kumar., G. Sharma., M. Naushad., M. Naushad. dan G. T. Mola, "Mg_{0.5}Ni_xZn_{0.5-x}Fe₂O₄ spinel as a sustainable magnetic nanophotocatalyst with dopant driven band shifting and reduced recombination for visible and solar degradation of Reactive Blue-19," *Advanced Powder Technology*, vol. 31, no. 12, pp. 4585-4597, 2020.
- [15] B. K. e. al, "Phytosynthesis and photocatalytic activity of magnetite (Fe₃O₄)

- nanoparticles using the Andean blackberry leaf,” *Materials Chemistry and Physics*, vol. 179, pp. 310-315, 2016.
- [16] M. Houshiar., F. Zebhi., Z. J. Razi., A. Alidoust. dan Z. Askari, “Synthesis of cobalt ferrite (CoFe₂O₄) nanoparticles using combustion, coprecipitation, and precipitation methods: a comparison study of size, structural, and magnetic properties,” *Journal Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 371, pp. 43-48, 2014.
- [17] M. I. Godinho, “Effect of the partial replacement of Fe by Ni and/or Mn on the electrocatalytic activity for oxygen evolution of the CoFe₂O₄ spinel oxide electrode,” *Electrochimica acta*, vol. 47, no. 27, p. 4307, 2002.
- [18] C. Kambale, A. Shaikh, S. Kambale dan D. Kolekar, “Effect of Cobalt Substitution on Structural, Magnetic and Electric Properties of Nickel Ferrite,” *Journal Alloys and electric properties of nikcel ferrite*, vol. 478, no. 1-2, pp. 599-603, 2009.
- [19] Kambale, Shaikh, Bhosale, Kolekar dan Rajpure, “Dielectric properties and complex impedance spectroscopy studies of mixed Ni–Co ferrites,” *Smart Materials and structure*, vol. 18, no. 8, p. 085014, 2009.
- [20] A. Kumar, M. A. Dar., P. Sharma. dan D. Varshney, “Structural And Raman Scattering Study Of Ni-doped CoFe₂O₄,” dalam *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics, 2014.
- [21] F. Sharifianjazi, “Magnetic CoFe₂O₄ nanoparticles doped with metal ions: a review,” *Ceramics International*, vol. 46, no. 11, pp. 18391-18412, 2020.
- [22] A. Ayuningtyas, “SINTESIS NANOPARTIKEL α -Fe₂O₃ DARI LIMBAH INDUSTRI UBIN KERAMIK UNTUK PENANGANAN METLIEN BIRU SECARA FOTOKATALISIS,” *Skripsi*, p. 29, 2020.
- [23] S. Fatimah, “Sintesis Fe₃O₄ Dari Limbah Baterai Dengan Metode Kopresipitasi untuk penanganan Metilen Biru Secara fotokatalis,” *Skripsi*, pp. 46-48, 2020.
- [24] A. Godlyn Abraham, A. Manikandan, E. Manikandan, S. Vadivel, S. K. Jaganathan, A. Bayka dan S. Renganathan, “Enhanced magneto-optical and photo-catalytic properties of transition metal cobalt (Co²⁺ ions) doped spinel MgFe₂O₄ ferrite nanocomposites,” *Journal magnetic and magnetism materials*, vol. 452, pp. 380-388, 2018.
- [25] D. H. Chen dan X. R. He, “Synthesis of nickel ferrite nanoparticles by sol-gel method,” *Mater. Res. Bull.*, vol. 36, pp. 1369-1377, 2001.
- [26] J. Sharma, S. N, J. Parashar, V. K. Saxena, D. Bhatnagar dan K. B. Sharma, “Dielectric properties of nanocrystalline Co-Mg ferrites,” *Journal alloy Compounds*, vol. 649, pp. 362-367, 2015.
- [27] D. Gao, Z. Shi, Y. Xu, J. Zhang, G. Yang, J. Zhang, X. Wang dan D. Xue, “Synthesis, magnetic anisotropy and optical properties of preferred oriented zinc ferrite nanowire arrays,” *Nanoscale Res. Lett.*, vol. 5, pp. 1289-1294, 2010.