

STRUKTUR KRISTAL DAN SIFAT KEMAGNETAN NANOPARTIKEL $\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$ YANG DIENKAPSULASI DENGAN POLIETILEN GLIKOL (PEG-4000)

Adrian Rahmat Nur^{*1}, La Ode Rusman²

^{1,2} Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Halu Oleo, Indonesia

e-mail*: adrian.rahmat.n@uho.ac.id

Diterima 19 November 2025

Dipublikasikan 31 Desember 2025

DOI Artikel: <https://doi.org/10.33369/jkf.8.3.137-144>

ABSTRAK

Telah berhasil disintesis nanopartikel *ferit spinel* campuran nanokristalin *cobalt zink ferit* ($\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$) dengan enkapsulasi PEG-4000 menggunakan metode kopresipitasi, dengan massa bubuk PEG-4000 divariasikan sebesar 0; 0,5; 1,0; 2,0; 2,5; dan 3,0 g. Berdasarkan hasil karakterisasi difraksi sinar-X (XRD), ditemukan puncak difraksi spinel utama (2 θ) yang terkait dengan bidang (220), (311), (400), (422), (511), dan (440) yang sesuai dengan struktur spinel kubik fase tunggal dengan kelompok ruang $\text{Fd}\bar{3}\text{m}$. Ukuran partikel $\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$ berkurang setelah dienkapsulasi dengan PEG-4000, dari 14 nm menjadi 11 nm. Analisis *Fourier Transform Infrared* (FTIR) menunjukkan getaran regangan intrinsik logam–oksigen pada rentang frekuensi 431 cm^{-1} dan 595 cm^{-1} yang berasal dari getaran logam–oksigen pada subkisi oktahedral dan tetrahedral, sedangkan sampel $\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$ yang dienkapsulasi menunjukkan getaran khas PEG, yaitu C–O, C–H, dan O–H pada masing-masing frekuensi 1064 cm^{-1} , 1481 cm^{-1} , dan 3437 cm^{-1} . Koersivitas nanopartikel $\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$ yang tidak dienkapsulasi menurun setelah dienkapsulasi dengan PEG-4000, dari 252 Oe menjadi 49 Oe, yang dikaitkan dengan penurunan ukuran partikel. Magnetisasi saturasi (M_s) nanopartikel $\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$ yang tidak dienkapsulasi juga berkurang dari 29 emu/g menjadi 13 emu/g setelah dienkapsulasi dengan PEG-4000.

Kata kunci - Nanopartikel *cobalt zink ferit* ($\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$), Kopresipitasi, Enkapsulasi, PEG-4000.

ABSTRACT

Mixed spinel cobalt zinc ferrite ($\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$) nanoparticles encapsulated with PEG-4000 were successfully synthesized using the coprecipitation method with PEG-4000 powder masses of 0, 0.5, 1.0, 2.0, 2.5, and 3.0 g. X-ray diffraction (XRD) analysis revealed the main spinel diffraction peaks at (220), (311), (400), (422), (511), and (440), confirming a single-phase cubic spinel structure with space group $\text{Fd}\bar{3}\text{m}$. The particle size of $\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$ decreased from 14 nm to 11 nm after encapsulation with PEG-4000. Fourier Transform Infrared (FTIR) spectra showed intrinsic metal–oxygen stretching vibrations at 431 cm^{-1} and 595 cm^{-1} associated with octahedral and tetrahedral sublattices, respectively, while the encapsulated samples exhibited characteristic PEG vibrations of C–O, C–H, and O–H at 1064 cm^{-1} , 1481 cm^{-1} , and 3437 cm^{-1} . The coercivity of bare $\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$ nanoparticles decreased from 252 Oe to 49 Oe after PEG-4000 encapsulation, which is attributed to the reduction in particle size. In addition, the saturation magnetization (M_s) decreased from 29 emu/g for the unencapsulated nanoparticles to 13 emu/g for the PEG-4000 encapsulated samples.

Keywords - Cobalt zinc ferrite nanoparticles ($\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$); Coprecipitation; Encapsulation; PEG-4000.

I. PENDAHULUAN

Penelitian terkait perkembangan teknologi yang menarik banyak peneliti adalah nanopartikel magnetik *ferrite spinel*, karena *ferrite spinel* dapat diterapkan pada berbagai aplikasi seperti *Magnetic Resonance Imaging* (MRI), Terapi Hipertermia Magnetik, dan *drug delivery* (1);(2). Khusus untuk aplikasi terapi hipertermia, nanopartikel magnetik ferit berpotensi digunakan untuk tujuan medis karena nanopartikel magnetik dapat berikatan dengan sel, stabil, biokompatibel, dan memiliki *Specific Absorption Rate* (SAR) yang tinggi meskipun dengan amplitudo dan frekuensi yang rendah

(3). Nanopartikel ferit memiliki struktur kristal unik, yaitu spinel (MFe_2O_4) dengan M menunjukkan unsur logam bervalensi $2+$, seperti Mn^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , Mg^{2+} , Co^{2+} , Fe^{2+} , dan Cu^{2+} (4). $CoZnFe_2O_4$ dan $ZnFe_2O_4$ yang merupakan spinel ferit, telah menarik perhatian para peneliti karena sifat uniknya. $CoFe_2O_4$ adalah material dengan struktur *invers spinel*, magnetisasi saturasi dan koersivitas tinggi, serta memiliki stabilitas kimia yang baik (5). Di sisi lain, $ZnFe_2O_4$ adalah material dengan struktur spinel tipikal, yang memiliki magnetisasi saturasi dan koersivitas rendah (6). Untuk aplikasi khusus seperti hipertermia yang memerlukan nanopartikel dengan karakteristik magnetisasi saturasi tinggi dan koersivitas rendah, $CoFe_2O_4$ dan $ZnFe_2O_4$ harus dikombinasi. Kombinasi kedua nanopartikel dengan konsentrasi yang sama menghasilkan $CoZnFe_2O_4$ dengan struktur *mixed spinel*. Banyak metode yang dapat digunakan untuk mensintesis nanopartikel $CoZnFe_2O_4$, seperti metode *reverse microemulsion*, metode sol-gel, dan metode kopresipitasi (1);(7);(8). Di antara beberapa metode yang ada, metode *coprecipitation* telah banyak digunakan karena fleksibilitas dalam komposisi bahan dan ukuran serta bentuk partikel dapat dikendalikan dengan menetapkan parameter sintesis secara pra-definisi, dengan biaya rendah, dan teknik yang sederhana (1);(9).

Nanopartikel $CoZnFe_2O_4$ cenderung teraglomerasi (2) akibat interaksi antara partikel magnetik dan reaktivitas permukaan nanopartikel. Oleh karena itu, untuk menghindari aglomerasi, perlu dilakukan modifikasi dengan mengenkapsulasi permukaan nanopartikel. Salah satu bahan yang paling umum digunakan untuk mengenkapsulasi nanopartikel magnetik adalah bahan organik seperti polimer. Salah satu polimer yang dapat digunakan sebagai bahan enkapsulasi untuk nanopartikel $CoZnFe_2O_4$ adalah *Polyethylene Glycol* (PEG)). PEG memiliki keunggulan dapat mengikat nanopartikel yang dienkapsulasi sehingga memiliki tingkat kelarutan yang wajar, mencegah aglomerasi nanopartikel (10). Sertkol et al. berhasil mensintesis nanopartikel $Ni_{0.6}Zn_{0.4}Fe_2O_4$ dienkapsulasi dengan PEG-400 (11). Penggunaan PEG-400 biasanya memerlukan biaya tinggi, dan rantai polimernya tidak panjang, sehingga mengurangi kekuatan ikatan dan derajat dispersi. Oleh karena itu, para peneliti tertarik menggunakan jenis PEG lain sebagai bahan enkapsulasi, yang disebut PEG-4000. PEG-4000 memiliki beberapa keunggulan, yaitu biaya rendah dan rantai polimer yang panjang, sehingga dapat menghasilkan nanopartikel magnetik $CoFe_2O_4$ yang lebih terdispersi dengan ikatan yang kuat (12).

II. METODE PENELITIAN

Sintesis Nanopartikel $CoZnFe_2O_4$

Sampel nanopartikel $CoZnFe_2O_4$ disintesis menggunakan metode kopresipitasi. Sebagai prekursor, 2,703 g $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ dan 0,594 g $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ dilarutkan dalam 25 ml aquades. Terpisah, 0,719 g $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ juga dilarutkan dalam 25 ml aquades (semua bahan kimia dibeli dari Merck, Jerman). Kedua larutan kemudian dicampur dan ditambahkan dengan 3,37 mL HCl. Prekursor kemudian ditambahkan secara tetes demi tetes ke larutan 6M NaOH (Merck, Jerman). Reaksi dijaga pada pengadukan konstan pada $90^\circ C$ selama satu jam. Nanopartikel ferit yang mengendap dicuci dengan aquades enam kali. Kemudian, sampel dikeringkan dalam oven pada suhu $90^\circ C$ selama 5 jam.

Enkapsulasi nanopartikel $CoZnFe_2O_4$ menggunakan PEG-4000

Sintesis nanopartikel $CoZnFe_2O_4$ menggunakan sintesis *in-situ*. Dalam hal ini, nanopartikel dihasilkan dalam matriks polimer. Nanopartikel $CoZnFe_2O_4$ dicampur dengan massa PEG-4000 yang berbeda. Variasi massa yaitu (0,5; 1,0; 2,0; 2,5, dan 3) g yang masing-masing diberi label P1, P2, P3, P4, P5 dan P6. Proses presipitasi kemudian dilakukan menggunakan medan magnet eksternal (magnet permanen). Presipitat yang dihasilkan dicuci dengan aquades lima kali. Kemudian, sampel dikeringkan pada suhu ruangan lalu dikeringkan dalam oven pada suhu $50^\circ C$ selama 50 menit untuk memastikan sampel benar-benar kering.

Karakterisasi

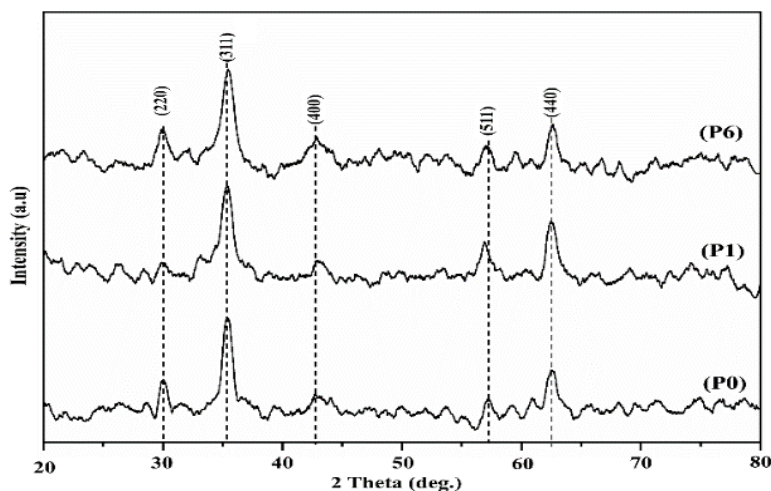
Fase kristalin nanopartikel dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Diffractometer* Shimadzu XD dengan sumber radiasi monokromatik Cu-K α ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$). Spektrum vibrasi nanopartikel dikaji

menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) Prestige Shimadzu-21 pada rentang bilangan gelombang 4000-400 cm⁻¹. Morfologi dan pola difraksi area terpilih dilakukan menggunakan *Transmission Electron Microscope* (TEM) Jeol Jem-1400. Pengukuran sifat magnetik nanopartikel dilakukan menggunakan *Vibrating Sample Magnetometer* (VSM) Riken Denshi Co Ltd.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Karakterisasi Difraksi Sinar-X

Analisis XRD adalah metode unik untuk menentukan kristalinitas suatu senyawa. Gambar 1 menunjukkan spektrum XRD nanopartikel CoZnFe₂O₄ sebelum dan setelah dienkapsulasi dengan PEG-4000. Puncak-puncak difraksi pada bidang (220), (311), (400), (422), (511), dan (440) dari nanopartikel CoZnFe₂O₄ menunjukkan struktur spinel kubik dan sesuai dengan data JCPDS (File No. 22-1086 untuk CoFe₂O₄).



Gambar 1. Spektrum XRD nanopartikel CZF + PEG-4000: (P0) CZF, (P1) CZF + 0,5 g PEG; dan (P6) CZF + 3,0 g PEG.

Tabel 1 menunjukkan beberapa parameter fisik yang diperoleh dari analisis XRD untuk nanopartikel CoZnFe₂O₄ yang dienkapsulasi dengan PEG-4000.

Tabel 1. Parameter Fisik Analisis XRD Nanopartikel CoZnFe₂O₄ + PEG-4000

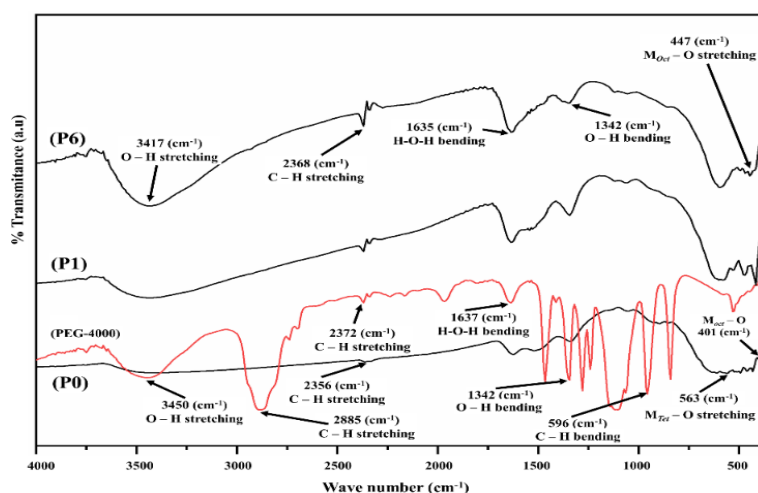
Sampel	d (Å)	a (Å)	t (nm)	densitas (g/cm ³)
P0	2,53	8,40	14,4	5,32
P1	2,54	8,41	13,1	5,31
P6	2,53	8,40	10,9	5,33

Parameter kisi (a), jarak antarbidang (d), dan densitas nanopartikel CoZnFe₂O₄ sebelum dan setelah dienkapsulasi dengan PEG-4000 cenderung tetap konstan (Tabel 1). Nilai konstan pada parameter-parameter tersebut disebabkan karena kehadiran PEG-4000 tidak memiliki efek signifikan terhadap struktur kristal ferit.

Ukuran kristalit ditentukan menggunakan metode Scherrer. Hasil menunjukkan bahwa ukuran kristalit nanopartikel CoZnFe₂O₄ yang tidak dienkapsulasi adalah 14,4 nm dan cenderung berkurang setelah dienkapsulasi dengan PEG-4000. Perdana at all. menunjukkan bahwa panjang rantai PEG dapat menjebak banyak partikel dalam rantai PEG, menghambat pertumbuhan kristal, dan akhirnya mengurangi ukuran kristalit (13). Selain itu, Arulmozhi dan Mythili (2013) menunjukkan bahwa PEG adalah polimer rantai panjang dengan ikatan O-H di ujungnya (14). PEG bertindak sebagai agen penutup dalam sintesis nanopartikel, yang berfungsi sebagai pelindung pada partikel yang sedang tumbuh, menghambat pertumbuhan partikel hingga batas tertentu.

Hasil Karakterisasi Inframerah Transformasi Fourier

Analisis ikatan sampel dilakukan berdasarkan spektrum yang disediakan oleh FTIR seperti pada Gambar 2.

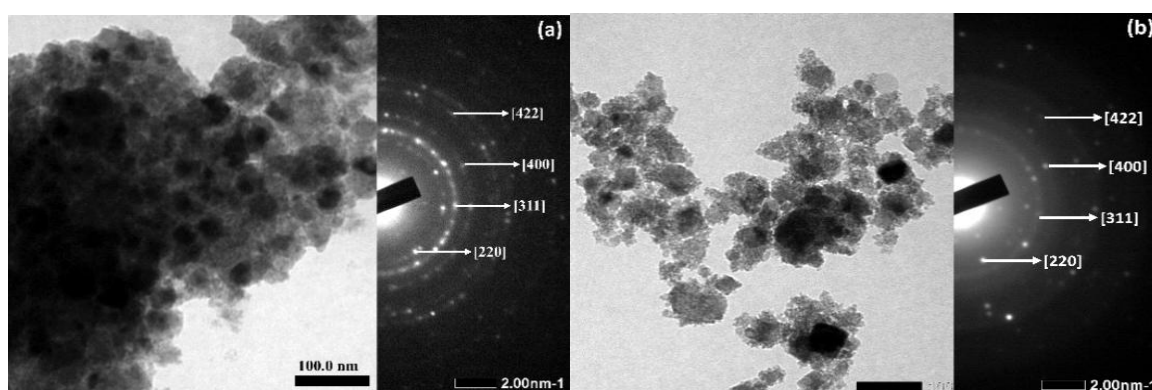


Gambar 2. Spektrum FTIR nanopartikel CZF + PEG-4000: (P0) CZF, PEG-4000, (P1) CZF + 0,5 g PEG; dan (P6) CZF + 3,0 g PEG.

Gambar 2 menunjukkan spektrum FTIR nanopartikel $\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$ sebelum dienkapsulasi dengan PEG-4000, dengan pita serapan kelompok fungsional $M_{Oct} - O$ dan $M_{tet} - O$ masing-masing pada bilangan gelombang 401 cm^{-1} dan 563 cm^{-1} (15). Setelah enkapsulasi dengan PEG-4000, terjadi pergeseran bilangan gelombang vibrasi ikatan M-O ke bilangan gelombang yang lebih tinggi. Pergeseran ini terkait dengan penyerapan molekul PEG oleh nanopartikel, sehingga menyebabkan peningkatan frekuensi getaran kelompok M-O (16). Serapan pada bilangan gelombang 1342 cm^{-1} dan 3410 cm^{-1} pada sampel $\text{CoZnFe}_2\text{O}_4/\text{PEG}$ dikaitkan dengan getaran O-H bending dan O-H stretching dari nanopartikel. Untuk perbandingan, PEG-4000 murni menunjukkan pita O-H bending pada 1342 cm^{-1} dan O-H stretching pada 3450 cm^{-1} . Selain itu, nanopartikel $\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$ dan PEG memiliki puncak penyerapan masing-masing pada bilangan gelombang 1049 cm^{-1} dan 1064 cm^{-1} yang diidentifikasi sebagai kelompok fungsional peregangan C-O.

Hasil Karakterisasi Transmission Electron Microscope (TEM)

Morfologi dan difraksi cincin nanopartikel $\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$ sebelum dan setelah dienkapsulasi oleh PEG-4000 ditampilkan pada Gambar 3.



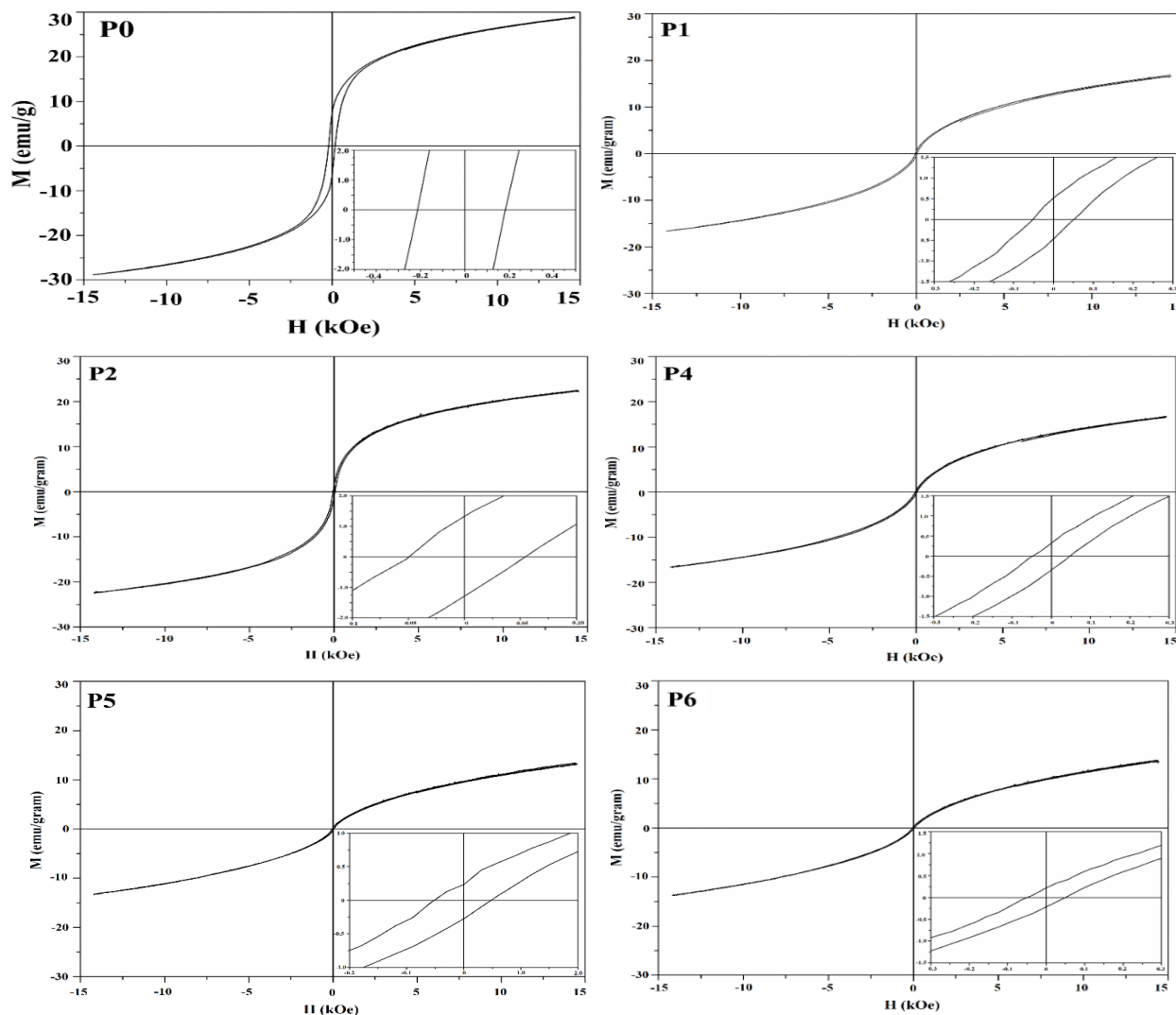
Gambar 3. Gambar TEM dan SAED (a) CZF, (b) nanopartikel CZF + PEG-4000.

Butiran nanopartikel menggumpal dan sebagian beragregasi (Gambar 3) akibat interaksi kuat antara nanopartikel dengan reaktivitas tinggi butiran nanopartikel yang disebabkan oleh interaksi magnetostatik dan pertukaran momen dipol (interaksi pertukaran) antara nanopartikel (17).

Setelah dienkapsulasi dengan PEG-4000, aglomerasi tampaknya berkurang karena interaksi antara partikel menjadi lemah. Morfologi nanopartikel CoZnFe₂O₄ yang dienkapsulasi berbentuk spiral (hampir bulat) dengan distribusi ukuran butir sekitar 23,5 nm. Setelah dienkapsulasi dengan PEG-4000, bentuk morfologis sebagian menyerupai kotak dengan distribusi ukuran butir, masing-masing turun menjadi 10,9 nm. Selain itu, gambar SAED mengidentifikasi bidang kristal 220, 311, 400, dan 440, yang merupakan bidang kristal CoZnFe₂O₄ dan menunjukkan pola difraksi cincin yang tidak kontinu. Menurut Egerton (2005), pola tersebut merupakan pola cincin difraksi yang diperoleh dari beberapa kristalit (polikristalin). Setelah dienkapsulasi dengan PEG-4000, cincin difraksi nanopartikel membentuk pola bintang dan menunjukkan pola difraksi monokristalin (18).

Hasil Karakterisasi Vibrating Sample Magnetometer (VSM)

Karakterisasi sifat magnetik nanopartikel CoZnFe₂O₄ sebelum dan setelah dienkapsulasi dengan PEG-4000 dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Kurva histeresis nanopartikel CZF dengan enkapsulasi PEG-4000: (P0) 0; (P1) 0,5 g; (P2) 1,0 g; (P4) 2,0 g; (P5) 2,5 g dan (P6) 3,0 g PEG

Parameter utama yang diperoleh dari analisis VSM adalah koersivitas (H_c) dan magnetisasi saturasi (M_s). Nilai koersivitas nanopartikel CoZnFe₂O₄ mencapai 251,9 Oe dan berkurang setelah dienkapsulasi dengan PEG-4000 (Tabel 2) akibat berkurangnya ukuran kristalit. Konsisten dengan Nuzully et al. (2013) yang melaporkan penurunan linear koersivitas (H_c) Fe₃O₄ /PEG karena penambahan material non-magnetik yang mempengaruhi sifat magnetiknya (19). Nilai magnetisasi saturasi nanopartikel CoZnFe₂O₄ sebelum dienkapsulasi adalah 29,0 emu/g dan menurun setelah dienkapsulasi oleh PEG-4000 karena PEG-4000 adalah bahan polimer.

Tabel 2. Nilai H_c dan M_s nanopartikel $\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$ sebelum dan setelah enkapsulasi dengan PEG-4000.

Sampel	Konsentrasi (g)	H_c (Oe)	M_s (emu/g)
P0	0	251,9	29,0
P1	0,5	52,5	16,9
P2	1	54,3	22,5
P4	2	47,1	16,8
P5	2,5	48,2	13,4
P6	3	49,2	13,8

IV. SIMPULAN DAN SARAN

4.1. Simpulan

Nanopartikel spinel ferit $\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$ telah berhasil disintesis menggunakan metode kopresipitasi dan dienkapsulasi dengan PEG-4000. Parameter struktural seperti jarak antarbidang (d), parameter kisi (a), dan densitas (ρ) sebelum dan sesudah enkapsulasi cenderung tetap konstan, yang menunjukkan bahwa PEG-4000 tidak mengubah struktur spinel kubik. Sebelum enkapsulasi, nanopartikel $\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$ cenderung teraglomerasi, sedangkan setelah dienkapsulasi oleh PEG-4000 aglomerasi berkurang dan distribusi partikel menjadi lebih baik. Hasil karakterisasi sifat kemagnetan menunjukkan bahwa koersivitas (H_c) turun dari sekitar 252 Oe menjadi sekitar 49 Oe dan magnetisasi saturasi (M_s) berkurang dari sekitar 29 emu/g setelah enkapsulasi dengan PEG-4000, yang dikaitkan dengan penurunan ukuran kristalit dan keberadaan matriks polimer. Perubahan sifat kemagnetan ini menunjukkan bahwa enkapsulasi PEG-4000 berpotensi mengontrol sifat magnetik nanopartikel $\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$ untuk aplikasi biomedis yang memerlukan koersivitas rendah.

4.2. Saran

Untuk memperoleh kajian yang lebih mendalam maka disarankan agar dilakukan beberapa kajian lainnya seperti: 1) Karakterisasi lanjutan seperti BET, TGA/DSC, atau zeta potential untuk memperoleh informasi lebih lengkap mengenai stabilitas dan interaksi nanopartikel dengan PEG-4000; 2) Penggunaan PEG dengan variasi panjang rantai lain dapat dikaji untuk memperoleh kondisi enkapsulasi yang lebih optimal; 3) Uji biokompatibilitas, toksisitas, serta pengukuran SAR disarankan untuk menilai potensi aplikasi biomedis nanopartikel $\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$ -PEG. 4) Optimasi rasio massa PEG terhadap nanopartikel perlu dilakukan untuk meminimalkan aglomerasi tanpa mengurangi sifat magnetik secara signifikan; 5) Studi komparatif dengan metode sintesis lain untuk meninjau pengaruh metode terhadap ukuran, morfologi, dan sifat magnetik nanopartikel.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih diberikan kepada segenap pimpinan Universitas Halu Oleo yang telah mendanai penelitian ini melalui DIPA Badan Pelayanan Publik Universitas Halu Oleo. Apresiasi yang setinggi-tingginya juga disampaikan kepada tim teknis serta seluruh pihak yang turut berperan dalam tahapan riset ini. Penelitian ini dapat terselesaikan berkat dukungan dan kerja sama dari semua pihak yang terlibat.

DAFTAR PUSTAKA

1. Nadeem K, Krenn H, Sarwar W, Mumtaz M. Comparison of surface effects in SiO_2 coated and uncoated nickel ferrite nanoparticles. *Appl Surf Sci.* 2014 Jan;288:677–81.
2. Bohara RA, Yadav HM, Thorat ND, Mali SS, Hong CK, Nanaware SG, et al. Synthesis of functionalized $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanoparticles for biomedical applications. *J Magn Magn Mater.* 2015 Mar;378:397–401.
3. Ghayour H, Abdellahi M, Ozada N, Jabbrzare S, Khandan A. Hyperthermia application of zinc doped nickel ferrite nanoparticles. *Journal of Physics and Chemistry of Solids.* 2017 Dec;111:464–72.
4. Kharisov BI, Dias HVR, Kharissova O V. Mini-review: Ferrite nanoparticles in the catalysis. *Arabian Journal of Chemistry.* 2019 Nov;12(7):1234–46.
5. Mathew DS, Juang RS. An overview of the structure and magnetism of spinel ferrite nanoparticles and their synthesis in microemulsions. *Chemical Engineering Journal.* 2007 May;129(1–3):51–65.
6. Asmin LO, Mutmainnah M, Suaryadi E. Sintesis Nanopartikel Zinc Ferrite (ZnFe_2O_4) dengan Metode Kopresipitasi dan Karakterisasi Sifat Kemagnetannya. *SPEKTRA: Jurnal Fisika dan Aplikasinya.* 2015;16(3):62–6.
7. Kumar S, Singh V, Mandal UK, Kotnala RK. Nanocrystalline $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrite: Synthesis, characterization and study of their magnetic behavior at different temperatures. *Inorganica Chim Acta.* 2015 Mar;428:21–6.
8. Nikam DS, Jadhav SV, Khot VM, Phadatare MR, Pawar SH. Study of AC magnetic heating characteristics of $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanoparticles for magnetic hyperthermia therapy. *J Magn Magn Mater.* 2014 Jan;349:208–13.
9. Hankare PP, Jadhav SD, Sankpal UB, Chavan SS, Waghmare KJ, Chougule BK. Synthesis, characterization and effect of sintering temperature on magnetic properties of MgNi ferrite prepared by co-precipitation method. *J Alloys Compd.* 2009 May;475(1–2):926–9.
10. Yu M, Huang S, Yu KJ, Clyne AM. Dextran and Polymer Polyethylene Glycol (PEG) Coating Reduce Both 5 and 30 nm Iron Oxide Nanoparticle Cytotoxicity in 2D and 3D Cell Culture. *Int J Mol Sci.* 2012 May 9;13(5):5554–70.
11. Sertkol M, Köseoğlu Y, Baykal A, Kavas H, Başaran AC. Synthesis and magnetic characterization of $\text{Zn}_{0.6}\text{Ni}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanoparticles via a polyethylene glycol-assisted hydrothermal route. *J Magn Magn Mater.* 2009 Feb;321(3):157–62.
12. Antarnusa G, Suharyadi E. A synthesis of polyethylene glycol (PEG)-coated magnetite Fe_3O_4 nanoparticles and their characteristics for enhancement of biosensor. *Mater Res Express.* 2020 May 1;7(5).
13. Darminto, Cholishoh MN, Perdana FA, Baqiya MA, Mashuri, Cahyono Y, et al. Preparing Fe_3O_4 Nanoparticles from Fe^{2+} Ions Source by Co-precipitation Process in Various pH. In 2011. p. 234–7.
14. Arulmozhi KT, Mythili N. Studies on the chemical synthesis and characterization of lead oxide nanoparticles with different organic capping agents. *AIP Adv.* 2013 Dec 1;3(12).
15. Raut AV, Barkule RS, Shengule DR, Jadhav KM. Synthesis, structural investigation and magnetic properties of Zn^{2+} substituted cobalt ferrite nanoparticles prepared by the sol–gel auto-combustion technique. *J Magn Magn Mater.* 2014 May;358–359:87–92.

16. Anbarasu M, Anandan M, Chinnasamy E, Gopinath V, Balamurugan K. Synthesis and characterization of polyethylene glycol (PEG) coated Fe₃O₄ nanoparticles by chemical co-precipitation method for biomedical applications. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc.* 2015 Jan 25;135:536–9.
17. Kareem SH, Ati AA, Shamsuddin M, Lee SL. Nanostructural, morphological and magnetic studies of PEG/Mn(1–)Zn()Fe₂O₄ nanoparticles synthesized by co-precipitation. *Ceram Int.* 2015 Nov;41(9):11702–9.
18. Egerton RF. *Physical Principles of Electron Microscopy*. Boston, MA: Springer US; 2005.
19. Nuzully S, Kato T, Iwata S, Suharyadi DE. Seveny Nuzully / Pengaruh Konsentrasi Polyethylene glycol (PEG) pada Sifat Kemagnetan Nanopartikel Magnetik PEG-Coated Fe₃O₄ Jurnal Fisika Indonesia Pengaruh Konsentrasi Polyethylene glycol (PEG) pada Sifat Kemagnetan Nanopartikel Magnetik PEG-Coated Fe₃O₄. 2013;(51).