

Sintesis Dan Karakterisasi Nanopartikel Fe_3O_4 (*Magnetite*) Dari Pasir Besi Sungai Batanghari Jambi Yang Dienkapsulasi Dengan *Polyethylene Glycol* (Peg-4000)

Oktaviani Elsafitri¹, Nasri MZ², Frastica Deswardani^{3*}

- 1,3 Physics Study Program, Faculty of Science and Technology, Universitas Jambi, Jambi, Indonesia
2. Geophysical Engineering Study Program, Faculty of Science and Technology, Universitas Jambi, Jambi, Indonesia

*Corresponding Author

E-mail: Frastica.deswardani@unja.ac.id

doi:

Abstract-Nanoparticles Fe_3O_4 (*Magnetite*) have been successfully synthesized using the coprecipitation method with the addition of Polyethylene Glycol (PEG-4000) as a coating. The distribution of crystal size, particle size and functional groups of these nanoparticles was examined based on the mass ratio of PEG and Fe_3O_4 , that is 1: 3, 1: 2, 1: 1, 2: 1, and 3: 1. Then characterized by FTIR to be able to analyze the functional groups of all samples. To determine the crystal structure and crystal size in the synthesized samples were characterized by XRD only in pure Fe_3O_4 , 1: 3 and 3: 1 samples, while the morphology and particle size were characterized by SEM only in 1: 1 samples. Based on the FTIR spectrum, it was obtained that all samples appeared a typical Fe_3O_4 functional group, that is Fe-O at the absorption peak of around 544 - 673 cm^{-1} . After the encapsulation process was carried out, the C-C functional groups appeared in the 1: 3, 1: 2, 1: 1 encapsulation samples. In 2: 1, 3: 1 samples, asymmetric C-H, H-C-H, C-O-C, and C-O vibrational bonds appear, which are types of constituent bonds in PEG polymers. The results of the calculation of the XRD diffraction showed that the crystal size of the sample decreased respectively, that is 16.70 nm, 16.68 nm, 13.87 nm. The results of SEM characterization in 1: 1 sample had clear particle morphology and not too much clumping, and had a particle size of 31-156 nm.

Keywords: Fe_3O_4 , Polyethylene glycol (PEG), Functional Group, Diffraction X-ray, Morphology

I. PENDAHULUAN

Pasir besi merupakan sumber daya alam yang banyak dijumpai di Indonesia. Pasir besi tersebar di berbagai pantai seperti pantai barat Sumatera, pantai selatan Jawa, Kalimantan, Sulawesi, Nusa Tenggara dan kepulauan Maluku [1]. Pasir besi pada umumnya dapat disintesis sebagai bahan tambahan semen dan besi baja, dalam perkembangan teknologi pasir besi dapat dimanfaatkan dalam dunia teknologi nano. Teknologi nano adalah teknologi yang melibatkan atom dan molekul dengan ukuran lebih kecil dari 1.000 nanometer. Salah satu jenis materi nano yang paling banyak dikembangkan adalah nanopartikel Fe_3O_4 . Pasir besi dapat menjadi sumber nanopartikel Fe_3O_4 , karena didalam pasir besi terkandung mineral

magnetik seperti seperti magnetit (Fe_3O_4), hematit ($\alpha-Fe_2O_3$) dan maghemit ($\gamma-Fe_2O_3$) [2]. Untuk menghasilkan ukuran butir nanopartikel yang homogen dan halus, Fe_3O_4 dapat disintesis dengan beberapa caraya itu Dengan menggunakan metode kopresipitasi, sol-gel, *solid state*, hidrotermal, sonokimia, *molten salts*, dan lain-lain.

Metode yang digunakan untuk melakukan sintesis nanopartikel *magnetite* pada penelitian ini adalah metode kopresipitasi. Metode kopresipitasi merupakan metode yang cukup efektif dan cukup sederhana bila dibandingkan dengan metode yang lain. Metode ini didasarkan pada pengendapan melalui senyawa organik yang digunakan, sehingga metode ini menjadi lebih sederhana, menghasilkan distribusi ukuran butir yang relatif sama dan dapat dilakukan pada

kondisi lingkungan normal atau pada suhu ruang dan waktu sintesis yang lebih singkat. Salah satu teknik yang dipakai untuk mengontrol distribusi ukurannya itu Dengan cara enkapsulasi nanopartikel. Enkapsulasi Fe_3O_4 menggunakan *Polyethylene Glycol* (PEG) telah banyak dilakukan, senyawa ini tersedia dalam berbagai macam berat molekul, PEG berbentuk linier, tidak bermuatan, polimer ampifilik yang larut dalam air dan banyak pelarut organik dan mempunyai sifat melarutkan. Dalam penelitian ini PEG yang akan digunakan yaitu PEG-4000, karena PEG-4000 berbentuk padatan merupakan serbuk licin putih atau potongan putih kuning gading, praktis tidak berbau dan berasa. PEG-4000 harganya relative lebih murah dari pada tipe PEG-2000, sedangkan PEG-6000 harganya juga relative murah, tetapi sulit untuk didapatkan.

Terkait dengan masalah sintesis nanopartikel, telah dilakukan penelitian dengan variasi suhu sintering [3]. Hasilnya menunjukkan bahwa suhu sintering berpengaruh terhadap ukuran kristal, semakin tinggi suhu maka akan menghasilkan ukuran kristal yang lebih besar. Dengan membandingkan penelitian sebelumnya, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh konsentrasi PEG pada ukuran kristal dengan menggunakan XRD, gugus fungsi menggunakan FTIR, serta morfologi dan ukuran partikel menggunakan SEM.

II. METODE PENELITIAN

Langkah sintesis sampel dalam penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahap, yaitu :

1. Pengambilan pasir besi di sungai Batanghari Jambi yang berlokasi di Jl. Lintas Sumatera, Penyengat Rendah, Aur duri, Kecamatan Telanaipura, Kota Jambi.

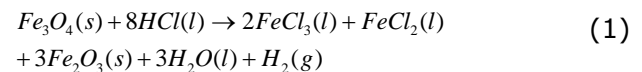
Proses pengambilan pasir besi sungai Batanghari Jambi dilakukan dengan menggunakan magnet permanen. Pengambilan pasir memanfaatkan sifat magnetik dari mineral magnetit sehingga dapat memisahkan diri dari pengotor atau pasir non besi. Pengambilan pasir besi ini dilakukan dengan cara menyaring pasir kering sehingga mendapatkan pasir yang berukuran lebih kecil dan seragam. Kemudian pasir yang telah disaring didekatkan pada magnet permanen agar pasir besi yang terdapat dalam pasir tersebut dapat dipisahkan dari pasir non besi. Proses penarikan pasir besi yang telah didapat dilakukan sebanyak 15 kali untuk memperoleh pasir besi yang murni. Sebelum disintesis, pasir besi di saring terlebih dahulu

menggunakan ayakan 120 mesh, sehingga didapat pasir besi yang lebih murni lagi dari sebelumnya dan kemudian dimortar agar besi tersebut berukuran lebih kecil [4].

2. Melarutkan pasir besi

Pasir besi sungai Batanghari Jambi sebanyak 40 gram dilarutkan kedalam HCl (12M) sebanyak 38 ml pada suhu 55°C dan diaduk sekitar 60 menit dengan menggunakan *magnetic stirrer* [4].

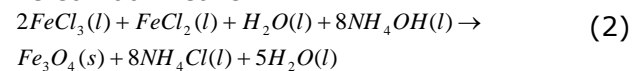
Persamaan reaksi :



3. Mengendapkan dengan metode kopresipitasi

Larutan yang telah terbentuk kemudian disaring dengan menggunakan kertas saring, larutan yang telah disaring berupa filtrat. Untuk mengendapkan larutan ditambahkan NH_4OH sebanyak 73 ml kemudian didiamkan selama 1 jam hingga diperoleh endapan. Untuk mendapatkan hasil yang benar-benar bersih dari pengotor maka hasil endapan pasir besi yang berwarna hitam pekat dipisahkan dari larutannya kemudian dicuci dengan menggunakan aquades sebanyak 7 kali [4].

Persamaan reaksi :



4. Pembuatan nanopartikel Fe_3O_4

Endapan kemudian di oven pada suhu 120°C selama 2 jam, agar kadar air yang terdapat dari hasil endapan dapat menguap. Kemudian dilakukan sintering dengan suhu 400°C selama 2 jam. Hasil sintesis Fe_3O_4 diperoleh dalam bentuk serbuk [4].

5. Enkapsulasi nanopartikel Fe_3O_4

Enkapsulasi dilakukan dengan mencampurkan Fe_3O_4 dengan PEG-4000 sesuai variasi perbandingan massa. Adapun variasi konsentrasi yang dilakukan yaitu perbandingan massa PEG dengan massa nanopartikel Fe_3O_4 antara lain 1:3, 1:2, 1:1, 2:1, dan 3:1. PEG yang digunakan adalah PEG-4000 yang berbentuk padat. Dilakukan pelarutan PEG dengan aquades yang distirrer selama 30 menit pada kecepatan 7000 rpm hingga homogen. Kemudian hasil larutan PEG distirrer lagi dengan Fe_3O_4 selama 30 menit dengan kecepatan 7000 rpm. Selanjutnya sampel Fe_3O_4 yang dienkapsulasi PEG dibuang cairan sisa dan diendapkan. Pengendapan dilakukan selama 1 minggu, sampai keadaan sampel kering, kemudian sampel digerus agar dapat dijadikan bubuk.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

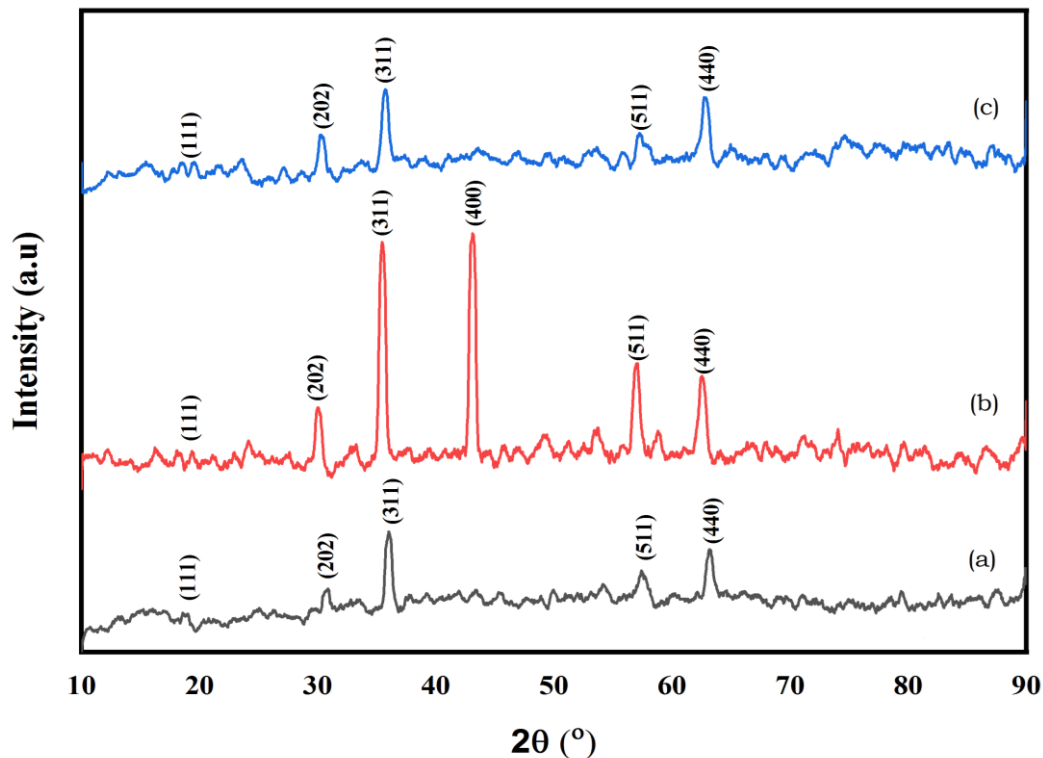
A. Hasil Penelitian

1. Karakterisasi dengan XRD (X-Ray Diffraction)

Hasil pengukuran XRD digunakan untuk mengetahui struktur kristal serta ukuran kristal pada sampel. Gambar 1 menunjukkan pola spektrum XRD pada tiga sampel yaitu Fe₃O₄

murni (Gambar 1a), PEG + Fe₃O₄ (1:3) (Gambar 1b) dan PEG + Fe₃O₄ (3:1) (Gambar 1c).

Karakterisasi nanopartikel Fe₃O₄ berdasarkan hasil XRD selain dapat digunakan untuk mengidentifikasi struktur kristal juga dapat digunakan untuk menentukan parameter kisi, dan ukuran kristal. Dari Gambar 1 pada puncak maksimum yaitu (3 1 1) dapat diketahui nilai parameter dan ukuran kristal.



Gbr 1. Pola spektrum XRD; (a) Fe₃O₄; (b) PEG + Fe₃O₄ (1:3); dan (c) PEG + Fe₃O₄ (3:1)

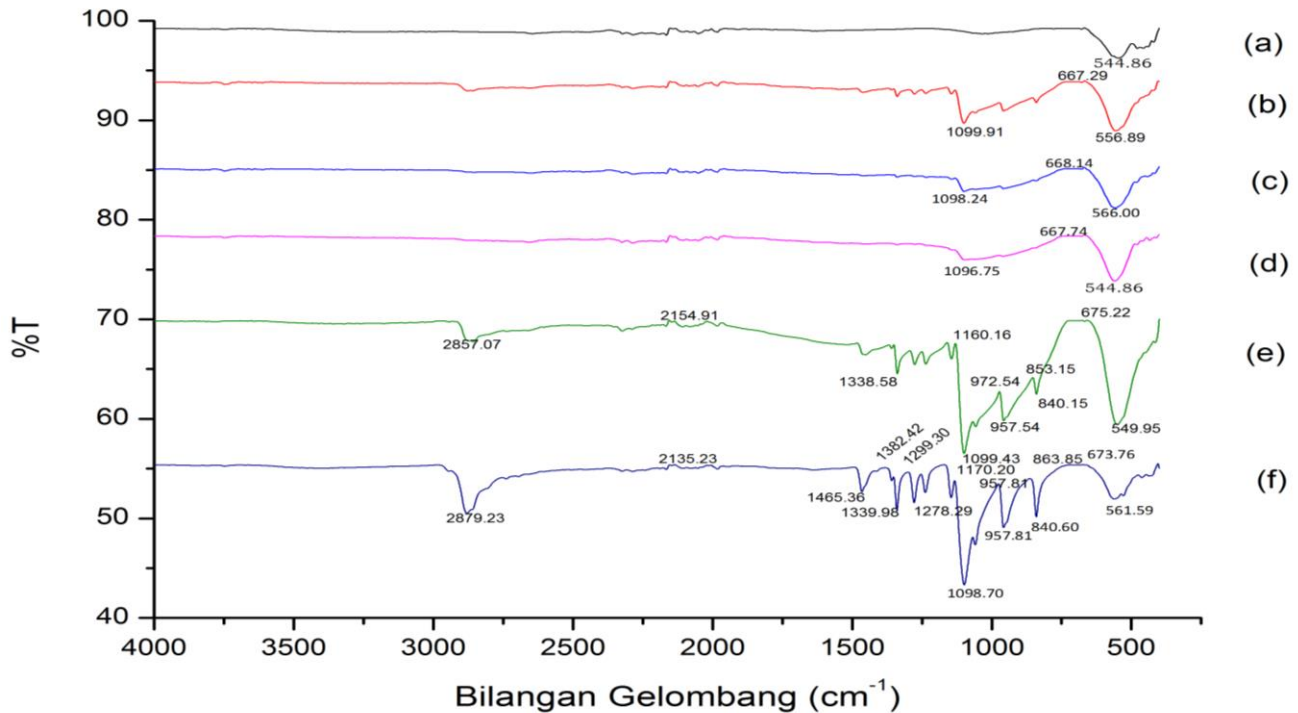
Perhitungan parameter kisi, dan ukuran kristal nanopartikel Fe₃O₄ hasil sintesis dapat menggunakan perangkat lunak *MATCH 3*. Hasil perhitungan menggunakan *MATCH 3* dan ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Lebar kisi, 2θ, parameter kisi, dan ukuran kristal pada puncak (311) sampel (a) Fe₃O₄ murni; (b) PEG + Fe₃O₄ (1:3); dan (c) PEG + Fe₃O₄ (3:1)

Sampel	2θ (°)	Lebar Kisi (nm)	Parame ter Kisi (nm)	Ukuran kristal (nm)
1 A	36,00	0,249	0,826	16,70
2 B	35,48	0,252	0,835	16,68
3 C	35,72	0,251	0,832	13,87

2. Karakterisasi Gugus Fungsi

Hasil karakterisasi gugus fungsi digunakan sebagai salah satu indikasi keberhasilan sintesis magnetit yang telah dienkapsulasi melalui munculnya bilangan gelombang atau perubahan serapan karakteristik tertentu. Interpretasi spektra inframerah pada penelitian ini digunakan pada bilangan gelombang 4000-400 cm⁻¹. Dari hasil pengujian dengan menggunakan spektroskopi FTIR didapat beberapa puncak yang ditunjukkan pada gambar 2 serta panjang gelombang masing-masing puncak yang ditunjukkan pada Tabel 2.



Gbr. 2 Spektra FTIR (a) Fe_3O_4 , (b) PEG + Fe_3O_4 (1:3), (c) PEG + Fe_3O_4 (1:2), (d) PEG + Fe_3O_4 (1:1), (e) PEG + Fe_3O_4 (2:1), (f) PEG + Fe_3O_4 (3:1)

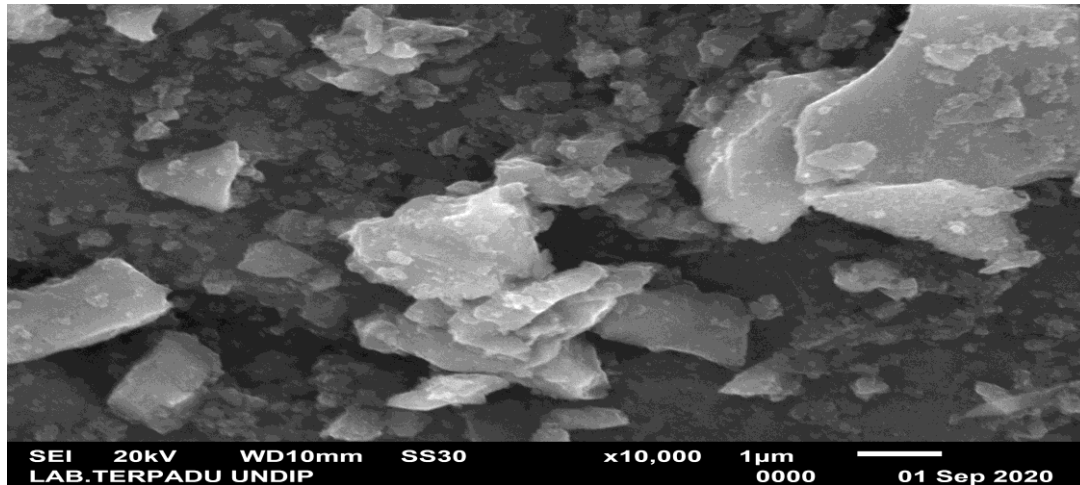
Tabel 2. Interpretasi gugus fungsi Fe_3O_4 , PEG + Fe_3O_4

Gugus Fungsi	Bilangan Gelombang (cm^{-1})					
	Fe_3O_4	1:3	1:2	1:1	2:1	3:1
C-H asimetris	-	-	-	-	2857.07	2879.23
H-C-H	-	-	-	-	2154.91	2135.23
H-C-H	-	-	-	-	-	1465.36
C-O-C	-	-	-	-	1160.16	1170.20
C-O	-	-	-	-	1338.58	1382.42
C-O	-	-	-	-	-	1339.82
C-C	-	1096.75	1098.24	1099.91	1099.43	1098.70
C-C	-	-	-	-	972.54	957.81
C-C	-	-	-	-	957.54	840.60
C-C	-	-	-	-	853.15	-
C-C	-	-	-	-	840.15	-
Fe-O	-	667.74	668.14	667.29	-	673.76
Fe-O	544.86	544.86	566.00	556.89	549.95	561.59

3. Karakterisasi dengan SEM (*Scanning Electron Microscopy*)

Pada penelitian ini dikarakterisasi 1 sampel yaitu sampel Fe_3O_4 + PEG (1:1), untuk

mengetahui bentuk morfologi permukaan sampel digunakan karakterisasi SEM dengan pembesaran 10.000x. Morfologi partikel Fe_3O_4 + PEG (1:1) ditunjukkan pada Gambar 3.



Gbr 3. Morfologi Sampel Fe_3O_4 + PEG (1:1)

B. Pembahasan

Gambar 1 merupakan pola difraksi dengan indeks miller yang menunjukkan khas struktur kubik spinel, yaitu pada puncak (111), (202), (311), (511), dan (440). Namun berbeda halnya pada sampel B yaitu muncul puncak difraksi (400), hal ini disebabkan tingkat keteraturan atom pada bidang (400) di sampel B lebih tinggi dibandingkan dengan sampel lain. Pada pola sampel Fe_3O_4 murni (Gambar 1a) menunjukkan sebagian besar yang muncul adalah puncak bidang yang dimiliki oleh Fe_3O_4 sehingga mengindikasikan terbentuknya fasa Fe_3O_4 pada sampel tersebut. Sudut 2θ $18,78^\circ$; $30,68^\circ$; $36,00^\circ$, $57,54^\circ$, dan $63,14^\circ$ berturut-turut yang menunjukkan indeks bidang (111), (202), (311), (511), dan (440) hal ini sesuai dengan indeks bidang yang dimiliki Fe_3O_4 (JCPDS#19-629).

Proses pelapisan dengan perbandingan massa (1:3) tidak mengubah pola difraksi dari Fe_3O_4 akan tetapi mengubah intensitasnya, pada sudut 2θ $35,48^\circ$ bidang (311) yang merupakan puncak difraksi dengan intensitas tertinggi dari puncak-puncak khas Fe_3O_4 memiliki intensitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan difraksi Fe_3O_4 murni. Hal ini dikarenakan menggunakan perbandingan massa PEG yang sedikit sehingga partikel Fe_3O_4 tidak terlapis dengan sempurna dan mengakibatkan pertumbuhan partikel Fe_3O_4 semakin meningkat. Kemudian pada sampel dengan perbandingan massa (3:1) juga tidak mengubah pola difraksi dari Fe_3O_4 akan tetapi intensitasnya menurun secara signifikan dibanding dengan sampel sebelumnya.

Dari Tabel 1 dapat dilihat bahwa ukuran kristal pada masing-masing sampel mengalami penurunan berturut-turut yaitu 16,70 nm, 16,68 nm, dan 13,87 nm. Pada sampel Fe_3O_4 tanpa penambahan PEG-4000 mempunyai ukuran

kristal yang lebih besar dibandingkan sampel dengan penambahan PEG-4000. Dari hasil karakterisasi dapat dilihat bahwa semakin besar konsentrasi penambahan PEG-4000, maka semakin kecil pula ukuran kristal yang didapatkan, dan semakin banyak permukaan partikel PEG semakin menghambat pertumbuhan partikel ini. Hal ini berlaku juga pada lebar kisi dan parameter kisi, yang mengakibatkan terjadinya pergeseran atom meskipun tidak terjadi perubahan yang signifikan.

Gambar 2 dan tabel 2 merupakan spektrum serta gugus fungsi yang terdapat pada masing-masing sampel. Dimana spektrum hasil FTIR dari sampel Fe_3O_4 murni dengan puncak serapan khas untuk Fe_3O_4 yaitu bilangan gelombang $544,86 \text{ cm}^{-1}$ untuk atom Fe pada struktur spinel oktahedral dan menunjukkan pita serapan dari vibrasi *stretching* Fe-O pada Fe-OH [5]. Spektrum FTIR dari sampel PEG + Fe_3O_4 (1:3) muncul puncak baru yang merupakan ciri dari gugus fungsi PEG, puncak yang muncul yaitu pada $1096,75 \text{ cm}^{-1}$ diindikasikan terdapat ikatan vibrasi *bending* (C-C), pada puncak sekitar $667,74 \text{ cm}^{-1}$ dan $544,86 \text{ cm}^{-1}$ diindikasikan terdapat gugus fungsi Fe-O *bending* dan *stretching*. Kemudian pada sampel PEG + Fe_3O_4 (1:2) puncak sekitar $1098,24 \text{ cm}^{-1}$ menunjukkan adanya ikatan vibrasi *bending* (C-C), pada puncak $668,14 \text{ cm}^{-1}$ dan $566,00 \text{ cm}^{-1}$ diindikasikan terdapat gugus fungsi Fe-O *bending* dan *stretching*.

Sama halnya dengan spektra FTIR dari sampel PEG + Fe_3O_4 (1:1) dimana puncak gugus fungsi yang muncul pada $1099,91 \text{ cm}^{-1}$ diindikasikan vibrasi *bending* (C-C) dan pada puncak $667,29 \text{ cm}^{-1}$ dan $556,89 \text{ cm}^{-1}$ menunjukkan bahwa terdapat gugus fungsi Fe-O *bending* dan *stretching*. Berbeda hal dengan sampel PEG +

Fe_3O_4 (2:1) dan PEG + Fe_3O_4 (3:1) yang menunjukkan adanya gugus fungsi baru, dimana pada sampel PEG + Fe_3O_4 (2:1) gugus fungsi yang muncul pada puncak 2857.07 cm^{-1} diindikasikan terdapat vibrasi *stretching* (C-H asimetris) [6]. Terdapat vibrasi *stretching* (H-C-H) pada puncak 2154.91 cm^{-1} , kemudian pada puncak sekitar 1160.16 cm^{-1} diindikasikan terdapat vibrasi *stretching* (C-O-C), pada sampel ini juga terdapat gugus fungsi C-O yang terdapat pada puncak 1338.58 cm^{-1} yang diindikasikan merupakan vibrasi *stretching*. Kemudian terdapat gugus fungsi C-C pada puncak 1099.43 cm^{-1} dan 972.54 cm^{-1} yang diindikasikan merupakan vibrasi *bending* dan *stretching*. Pada sampel ini juga muncul gugus fungsi Fe-O yang terdapat pada puncak 549.95 cm^{-1} yang diindikasikan merupakan vibrasi *stretching*.

Kemudian spektra dari sampel PEG + Fe_3O_4 (3:1) puncak yang muncul sekitar 2879.23 cm^{-1} merupakan ikatan vibrasi *stretching* (C-H asimetris) [6]. Puncak pada sekitar 2135.23 cm^{-1} dan 1465.36 cm^{-1} diindikasikan terdapat ikatan vibrasi *stretching* dan *bending* (H-C-H), kemudian terdapat vibrasi *stretching* (C-O-C) pada puncak 1170.20 cm^{-1} , pada puncak sekitar 1382.42 cm^{-1} diindikasikan adanya vibrasi *stretching* (C-O), terlihat pada puncak 1098.70 cm^{-1} diindikasikan adanya vibrasi *bending* (C-C), kemudian terdapat gugus fungsi Fe-O pada puncak 673.76 cm^{-1} dan 561.59 cm^{-1} yang diindikasikan merupakan vibrasi *bending* dan *stretching*.

Pada spektrum hasil karakterisasi FTIR terdapat adanya beberapa vibrasi ikatan yaitu H-C-H, C-O-C, C-H asimetris, C-O, dan C-C yang merupakan ikatan penyusun pada sampel PEG-4000 diindikasikan bahwa telah terjadi ikatan PEG-4000 pada permukaan nanopartikel Fe_3O_4 . Selain itu pada bilangan gelombang 2857.07 cm^{-1} pada sampel (2:1) dan 2879.23 cm^{-1} pada sampel (3:1) terjadi penurunan ketajaman puncak serapan, kedua sampel ini juga menghasilkan gugus fungsi yang lebih banyak dibanding sampel yang dienkapsulasi dengan perbandingan massa PEG yang lebih sedikit, karena sampel PEG + Fe_3O_4 (2:1) dan PEG + Fe_3O_4 (3:1) merupakan konsentrasi massa PEG yang lebih banyak, sehingga vibrasi ikatan penyusun PEG juga lebih banyak. Pergeseran puncak vibrasi pada masing-masing sampel disebabkan oleh perubahan energi vibrasi Fe-O yang memungkinkan terjadi serapan PEG oleh atom Fe.

Kemudian, gambar 3 merupakan morfologi partikel Fe_3O_4 dengan penambahan PEG-4000 dengan perbandingan 1:1. Dapat dikatakan

bahwa PEG sangat mempengaruhi bentuk permukaan nanopartikel Fe_3O_4 . Dimana hasil sintesis pelapisan Fe_3O_4 dengan PEG menggunakan perbandingan massa 1:1 ini memiliki morfologi partikelnya terlihat secara jelas dan penggumpalan partikel tidak terlalu banyak. Hal ini membuktikan bahwa pelapisan nanopartikel Fe_3O_4 dengan PEG ini dapat memisahkan penggumpalan partikel (*agglomeration*). Sampel PEG + Fe_3O_4 (1:1) memiliki ukuran partikel sebesar 31-156 nm yang dianalisa melalui gambar menggunakan *software ImageJ*, pengukuran yang dihasilkan menunjukkan mayoritas ukuran partikelnya dibawah 100 nm dan hanya beberapa partikel yang berukuran lebih dari 100 nm. Hal ini menunjukkan bahwa hasil analisis yang diperoleh merupakan nanopartikel, hal ini sesuai dengan pernyataan [7]. Bahwa nanopartikel adalah partikel yang berukuran antara 1-100 nanometer.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa :

1. Variasi konsentrasi PEG-4000 dalam ekstrak pasir besi mempengaruhi puncak-puncak difraksi yang terbentuk dan ukuran kristal yang terbentuk. Ukuran kristal untuk Fe_3O_4 murni diperoleh 16,70 nm, sampel PEG + Fe_3O_4 (1:3) diperoleh 16,68 nm, dan sampel PEG + Fe_3O_4 (3:1) diperoleh 13,87 nm.
2. Variasi konsentrasi PEG-4000 mempengaruhi gugus fungsi yang dihasilkan. Pada keseluruhan sampel muncul gugus fungsi khas Fe_3O_4 yaitu Fe-O pada puncak serapan sekitar 544 – 673 cm^{-1} . Pada sampel 1:3, 1:2, dan 1:1 muncul gugus fungsi C-C *bending* pada puncak serapan 1096 – 1099 cm^{-1} . Namun berbeda halnya pada sampel 2:1 dan 3:1, dimana terdapat beberapa vibrasi ikatan H-C-H, C-O-C, C-H asimetris, C-O, dan C-C yang merupakan ikatan penyusun pada polimer PEG, hal ini dikarenakan sampel 2:1 dan 3:1 merupakan konsentrasi massa PEG yang lebih banyak, sehingga vibrasi ikatan penyusun PEG juga lebih banyak.
3. Hasil enkapsulasi pada sampel PEG + Fe_3O_4 (1:1) ini memiliki morfologi partikelnya terlihat secara jelas dan penggumpalan partikel yang tidak terlalu banyak. Dan ukuran partikel yang diperoleh sekitar 31-156 nm, pengukuran yang dihasilkan

menunjukkan mayoritas ukuran partikel nya dibawah 100 nm dan hanya beberapa partikel yang berukuran lebih dari 100 nm.

B. Saran

Adapun saran penulis yang dapat disampaikan untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut :

1. Perlu dilakukan penelitian dengan variasi variabel yang lain, misalnya konsentrasi larutan HCl dan NH₄OH.
2. Perlu dilakukan karakterisasi dengan alat lain seperti TEM, VSM, dan lain-lain.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Aji, M. P, "Kajian sifat magnetik magnetit (Fe₃O₄) hasil penumbuhan dengan metode presipitasi berbahan dasar pasir besi". *Thesis*. Institut Teknologi Bandung, 2008.
- [2] A. Yulianto, S. Bijaksana, W. Loeksmanto, "Comparative study on magnetic characterization of iron sand from several locations in Central Java Indonesian", *Journal of Physics*, vol. 14, no. 2, pp. 24-32, 2003.
- [3] I. Safitri, "Pengaruh suhu sintering terhadap struktur kristal dan sifat optik nanopartikel Fe₃O₄ pasir besi sungai Batanghari Jambi". *Skripsi*. Universitas Jambi, 2019.
- [4] S. Nurjanah, "Sintesis dan karakterisasi nanopartikel magnetik Fe₃O₄ pasir besi Glagah Kulon Progo dengan metode kopresipitasi", *Skripsi Fisika*, UNY, 2018.
- [5] F. I. P. Sari, "Karakterisasi nanopartikel magnetite, Mg/Al NO₃-Hidrotalsit dan komposit magneti-hidrotalsit", *Jurnal Kimia Valensi Penelitian dan Pengembangan Ilmu Kimia*, vol. 3, no. 1, pp. 44-49, 2017.
- [6] S. Nuzuly, "Pengaruh konsentrasi polyethylene glycol (PEG) pada sifat kemagnetan nanopartikel magnetik PEG-Coated Fe₃O₄", *Jurnal Fisika Indonesia*, vol. 17, no. 51, pp.16-18, Universitas Gajah Mada, 2010.
- [7] Hubler, "Digital quatum batteries: Energy and information storage in nanovacuum tube arrays" Complexity, 2010.