

KAJIAN SIFAT DIELEKTRIK PADA NANOPARTIKEL *MAGNETITE* (Fe_3O_4) YANG DIENKAPSULASI POLIMER *POLYETHYLENE GLYCOL* (PEG-4000)

Heriansyah¹, Mustawarman¹, Edi Suharyadi^{1*}

¹Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Gadjah Mada, Bulaksumur, Yogyakarta 55281, Indonesia

*¹ Corresponding author: esuharyadi@ugm.ac.id

Abstrak

Kajian sifat dielektrik telah dipelajari pada nanopartikel magnetite (Fe_3O_4) yang dienkapsulasi polimer Polyethylene Glycol (PEG-4000) dengan variasi konsentrasi 0%, 33%, 50% dan 75% pada jangkauan frekuensi 10-120 kHz. Sifat dielektrik diukur menggunakan spektroskopi impedansi, dengan hasil berupa konstanta dielektrik riil (ϵ_r'), dielektrik imajiner (ϵ_r''), dan rugi tangen ($\tan \delta$). Konstanta dielektrik mengalami penurunan dengan meningkatnya frekuensi yang disebabkan polarisasi interfacial, hal ini sesuai dengan model dua lapisan dari Maxwell-Wagner. Selain itu konstanta dielektrik menurun dengan meningkatnya konsentrasi PEG-4000. Terlihat pada frekuensi 10 kHz konstanta dielektrik sampel dengan konsentrasi PEG 33% dan 50% masing-masing bernilai 252,5 dan 208,6. Hal ini terjadi karena ukuran yang besar lebih konduktif dari ukuran yang kecil. Selain itu terdapat pengaruh fase lain yang muncul pada sintesis nanopartikel magnetite (Fe_3O_4) yang dienkapsulasi PEG terhadap sifat dielektrik. Rugi tangen mengecil dengan meningkatnya frekuensi dan meningkat dengan bertambahnya konsentrasi PEG. Hasil pengukuran sifat dielektrik menunjukkan keoptimalan pada sampel yang dienkapsulasi dengan konsentrasi PEG yang rendah, dikarenakan memiliki kehilangan energi yang kecil, dan sifat dielektrik menurun tidak begitu signifikan.

Kata kunci: Dielektrik riil, Dielektrik imajiner, Fe_3O_4 , Polyethylene Glycol (PEG).

Abstract

Dielectric properties of Fe_3O_4 nanoparticles encapsulated with polymer Polyethylene Glycol (PEG-4000) have been studied under various concentration 0%, 33%, 50% and 75% in the frequency range 10-120 kHz. Dielectric properties measured by impedance spectroscopy, and obtained real dielectric constant (ϵ_r'), imaginary dielectric (ϵ_r''), and loss tangent. Dielectric constant decreased rapidly with increasing frequency because of the interfacial polarization, this phenomena corresponding to the two-layer model as predicted Maxwell-Wagner. Moreover, the higher PEG concentration, the lower the value of dielectric constant. At the frequency 10 kHz, dielectric constant of the sample with 33% and 50% concentration of PEG is 252.5 and 208.6 respectively. This occurred because the bigger grain size more conductive than the small one. Besides that, found the influence of the other phases that appear on the synthesis of Fe_3O_4 nanoparticles encapsulated with PEG to the dielectric properties. The loss tangent decreases as the increase of frequency, and it increases as the increase PEG concentration. The results show that the dielectric properties of the sample, reach the optimal value with the low PEG concentration, since it has a low dissipation and the decrease of dielectric properties is not significant.

Keywords: Real Dielectric, Imaginary Dielectric, Fe_3O_4 , Polyethylene Glycol (PEG).

1. Pendahuluan

Perkembangan nanoteknologi pada nanopartikel magnetik telah banyak mendapat perhatian dalam beberapa dekade, terutama dikarenakan fenomena sifat superparamagnetik yang muncul pada saat ukuran dibawah ukuran kritis (secara umum sekitar 10-20 nm) [1]. Pustaka [2] menyatakan bahwa nanopartikel magnetik dengan sifat superparamagnetik memiliki potensi aplikasi yang besar untuk digunakan pada bidang biomedis, seperti

pemisahan sel (*cellular labeling*), perbaikan jaringan, *drug delivery*, *magnetic resonance imaging* (MRI), dan *hyperthermia*.

Nanopartikel magnetik yang banyak diteliti saat ini adalah ferit, salah satunya adalah Fe_3O_4 (*magnetite*) yang bersifat biokompatibel dan memiliki tingkat dispersibilitas yang tinggi diantara ferit lain. Dalam kajian kelistrikan terutama sifat dielektrik, Fe_3O_4 memiliki peluang pada beberapa aplikasi seperti *Electromagnetic Interference (EMI) Shielding*

[3], dan *biosensor Surface Plasmon Resonance* (SPR) [4]. Kedua aplikasi ini memiliki ketergantungan terhadap frekuensi dan konstanta dielektrik.

Nanopartikel Fe_3O_4 memiliki beberapa kelemahan diantara lain mudah teroksidasi, tidak stabil terhadap termal maupun asam, dan mudah terjadi aglomerasi. Aglomerasi dapat mengurangi dispersibilitas material sehingga akan mengurangi daya guna dari Fe_3O_4 pada aplikasi. Pada aplikasi SPR, nanopartikel Fe_3O_4 perlu dilakukan fungsionalisasi dengan cara pelapisan permukaan agar dapat meningkatkan dispersibilitas dan untuk proses pengikatan biomolekul. Pelapisan permukaan ini disebut juga dengan enkapsulasi. Ada beberapa macam jenis bahan yang dapat digunakan dalam modifikasi permukaan seperti bahan organik polimer biokompatibel (*Polyethylene glycol, polyvinyl alcohol, asam oleat, dextran, dll*) dan bahan anorganik (silika, karbon atau logam mulia).

Enkapsulasi Fe_3O_4 menggunakan *Polyethylene glycol* (PEG) telah banyak dilakukan, karena PEG merupakan polimer yang imunogenik, biokompatibel, dapat menyeragamkan bentuk dan ukuran partikel. Nanopartikel Fe_3O_4 dengan enkapsulasi PEG dapat digunakan sebagai imobilisator dalam aplikasi SPR [4,5]. Prinsip SPR berkaitan dengan ketergantungan reflektansi terhadap konstanta dielektrik pada medium disekitar lapisan logam [6]. Sifat dielektrik dari Fe_3O_4 yang dienkapsulasi PEG akan mengalami kecenderungan berubah, hal ini diakibatkan oleh peran ukuran butir dan batas butir akibat pelapisan sebagai template [7]. Penelitian ini melaporkan perilaku dielektrik pada nanopartikel Fe_3O_4 yang dilapisi PEG-4000 dengan variasi konsentrasi. Variasi konsentrasi dilakukan untuk memperoleh prosentasi kandungan PEG yang optimal dikaitkan dengan karakteristik dielektrik Fe_3O_4 . Perilaku dielektrik meliputi konstanta dielektrik, rugi dielektrik/dielektrik imajiner, dan rugi tangen terhadap perubahan frekuensi dan konsentrasi PEG.

2. Metode Penelitian

Pada penelitian ini nanopartikel Fe_3O_4 diperoleh melalui sintesis dengan metode kopresipitasi. Sintesis dilakukan dengan melarutkan prekursor senyawa hidrat $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ (8,109 gram) dan $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ (4,1703 gram), masing-masing sebagai penyedia ion Fe^{3+} dan Fe^{2+} dengan perbandingan molar 2:1. Proses pelarutan menggunakan aquades (30 ml) dan diaduk menggunakan *magnetic stirrer* hingga campuran homogen. Selama pengadukan, larutan NH_4OH (10%) sebanyak 60 ml ditambahkan sebagai kopresipitan, dan diteteskan secara perlahan dengan kecepatan pengadukan ± 450 rpm pada suhu $60^\circ C$ dengan durasi pengadukan 90 menit. Hasil larutan kemudian dicuci menggunakan aquades sebanyak 7 kali untuk meminimalisir jumlah garam terlarut yang tertinggal. Selanjutnya, dilakukan proses dekantasi untuk memperoleh sampel berupa endapan Fe_3O_4 yang kemudian dipanaskan dalam *furnace* pada suhu $80^\circ C$

selama 2 jam. Hasil sintesis Fe_3O_4 diperoleh dalam bentuk serbuk.

Enkapsulasi dilakukan dengan mencampurkan Fe_3O_4 dengan PEG-4000 sesuai variasi perbandingan massa yang ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 1. *Preparasi sampel dengan variasi perbandingan PEG dan Fe_3O_4 .*

Perbandingan massa PEG: Fe_3O_4	Massa PEG (g)	Massa Fe_3O_4 (g)	Prosentase PEG (%)
Tanpa PEG	0	1,5	0
1:2	0,75	1,5	33
1:1	1,5	1,5	50
3:1	4,5	1,5	75

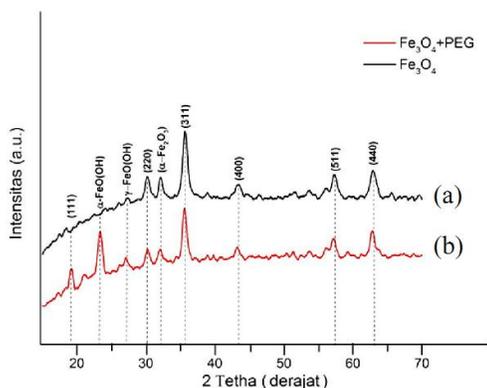
Adapun variasi konsentrasi yang dilakukan yaitu perbandingan massa PEG dengan massa nanopartikel Fe_3O_4 antara lain 0:1, 1:2, 1:1, dan 3:1. PEG yang digunakan adalah PEG-4000 yang berbentuk padat. Dilakukan pelarutan PEG dengan aquades yang diaduk hingga homogen. Pencampuran dilakukan dengan melarutkan Fe_3O_4 dan larutan PEG-4000, lalu dilakukan pengadukan pada kecepatan 1000 rpm pada suhu ruang selama 30 menit. Selanjutnya sampel Fe_3O_4 yang dienkapsulasi PEG dibuang cairan sisa dan diendapkan. Pengendapan dilakukan selama 1 minggu, sampai keadaan sampel kering, agar dapat dijadikan bubuk.

Sampel dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (Shimadzu model XD-3H) dengan tabung $CuK\alpha$ (panjang gelombang 1,5406 Å) untuk mengetahui fase yang terkandung dalam sampel. Selanjutnya sampel dikarakterisasi menggunakan *Transmission Electron Microscopy* (Joel Jem-1400) untuk mengetahui morfologi dan distribusi ukuran partikel. Sifat dielektrik diukur menggunakan Spektroskopi Impedansi terkomputerisasi [8] pada rangkain RC. Sebelumnya sampel dicetak dalam bentuk keping secara kompaksi dengan tekanan sebesar 50.000 N dan diameter keping 1,23 cm. Perilaku dielektrik yang diukur antara lain konstanta dielektrik kompleks (ϵ_r' dan ϵ_r''), dan rugi tangen ($\tan \delta$) terhadap perubahan frekuensi (f) dengan rentang 10-120 kHz.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil pengukuran XRD digunakan untuk mengidentifikasi fase kristal pada sampel. Gambar 1 menunjukkan pola spektrum XRD pada dua sampel yaitu Fe_3O_4 tanpa enkapsulasi PEG-4000 (Gambar 1a) dan Fe_3O_4 dengan enkapsulasi PEG-4000 50% (Gambar 1b). Pola pada sampel Fe_3O_4 tanpa enkapsulasi PEG (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 $2\theta = 30,2^\circ; 35,6^\circ; 43,3^\circ; 57,3^\circ; \text{ dan } 63^\circ$

merepresentasikan indeks bidang (220), (311), (400), (511), dan (440) hal ini sesuai dengan indeks bidang yang dimiliki Fe₃O₄ (JCPDS#19-0629). Puncak bidang yang dimiliki Fe₃O₄ merupakan indeks khas dari struktur kubik spinel.



Gambar 1. Pola spektrum XRD; (a) Sampel Fe₃O₄ tanpa dienkapsulasi PEG-4000; dan (b) Fe₃O₄ yang telah dienkapsulasi PEG-4000.

Pada pola XRD juga diperoleh bahwa terjadi penurunan tinggi dan ketajaman ketinggian puncak bidang utama (311) pada fasa Fe₃O₄ yang sebelum dan sesudah proses enkapsulasi PEG. Hal ini menunjukkan bahwa derajat kristalinitas nanopartikel Fe₃O₄ lebih tinggi ketika sebelum dienkapsulasi.

Selain fasa Fe₃O₄, terbentuk fase lain yaitu α-Fe₂O₃ (*hematite*) yang muncul pada sudut 2θ = 32,2°. Kemunculan fasa α-Fe₂O₃ pada sintesis Fe₃O₄ diprediksi akibat proses oksidasi Fe₃O₄ [5]. Pada Sampel Fe₃O₄ dengan enkapsulasi PEG (Gambar 1b) juga ditemukan fasa Fe₃O₄ dan fasa α-Fe₂O₃, serta ditambahkan dengan kemunculan dua fasa lain pada sudut 2θ = 23,4° dan 27,2° yang masing-masing diidentifikasi sebagai α-FeO(OH) dan γ-FeO(OH). Munculnya fasa baru pada sampel Fe₃O₄ yang dienkapsulasi PEG (Gambar 1b) menandakan telah terjadi pelapisan Fe₃O₄ oleh PEG. Kedua fasa tersebut diprediksi karena atom-atom Fe³⁺ bereaksi dengan gugus hidroksil dari pada PEG-4000. konsentrasi volume dari fasa yang muncul, seperti Fe₃O₄, α-Fe₂O₃, α-FeO(OH) dan γ-FeO(OH) ditunjukkan pada tabel 2.

Hasil analisa XRD (Tabel 3) menunjukkan nilai dari parameter kisi, intensitas fasa Fe₃O₄, dan ukuran kristalit. Ukuran kristalit dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan Scherrer pada puncak bidang tertinggi (311), dapat dilihat pada persamaan (1):

$$t = \frac{k\lambda}{B \cos \theta}, \tag{1}$$

dengan t adalah ukuran rata-rata kristalit, k merupakan konstanta Scherrer (0,9), λ adalah panjang

gelombang sinar-X yang digunakan, dan B adalah lebar setengah puncak maksimum difraksi atau *Full Width Half Maximum* (FWHM) dalam radian, dan θ adalah posisi puncak difraksi.

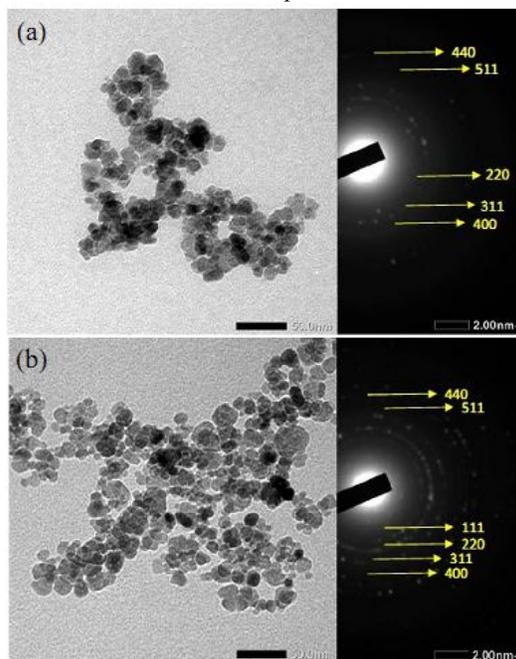
Tabel 2. Hasil rasio volume fasa lain pada sampel Fe₃O₄ yang dienkapsulasi dengan konsentrasi PEG-4000 (50%).

Sampel (konsen-trasi PEG) (%)	Rasio fasa Fe ₃ O ₄ (%)	Rasio fasa α-Fe ₂ O ₃ (%)	Rasio fasa α-FeO(OH) (%)	Rasio fasa γ-FeO(OH) (%)
0	88,4	11,6	-	-
50%	68,2	6,5	19,7	5,7

Tabel 3. Hasil analisa XRD Fe₃O₄ yang dienkapsulasi PEG.

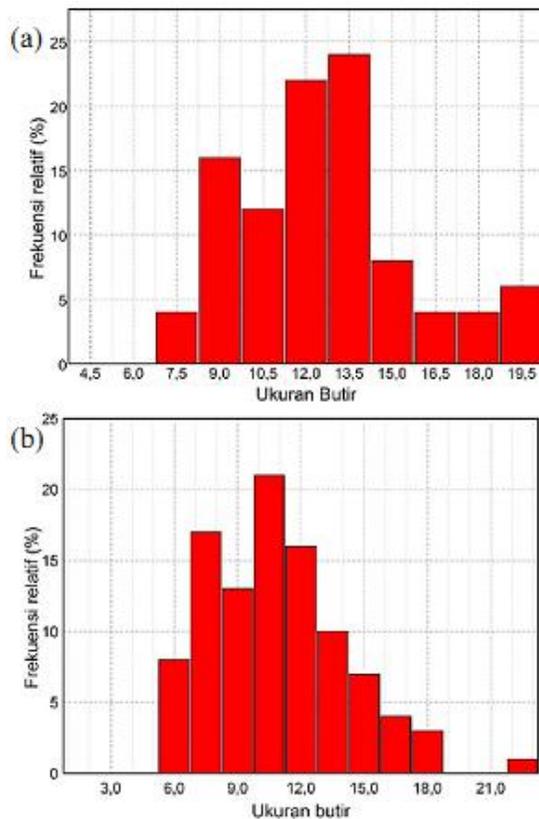
Sampel (konsentrasi PEG) (%)	Parameter kisi (Å)	Ukuran kristalit (nm)	Intensitas Fasa Fe ₃ O ₄ (a.u)
0 %	8,35±0,03	13,5±0,6	699,16
50 %	8,36±0,04	10,4±0,5	765,24

Hasil TEM menyajikan morfologi sampel Fe₃O₄ tanpa enkapsulasi dan Fe₃O₄ yang dienkapsulasi PEG-4000 dapat dilihat pada Gambar 2. Sampel Fe₃O₄ tanpa enkapsulasi (Gambar 2a) menunjukkan bentuk partikel yang homogen dan terdistribusi cukup dispersif, meskipun masih terdapat aglomerasi. Sedangkan sampel Fe₃O₄ yang dienkapsulasi PEG-4000 (Gambar 2b) menunjukkan berkurangnya aglomerasi dibandingkan sampel sebelumnya, terlihat partikel terdistribusi lebih dispersif.



Gambar 2. Morfologi dan pola difraksi (a) sampel Fe_3O_4 tanpa dienkapsulasi PEG-4000, (b) sampel Fe_3O_4 yang dienkapsulasi PEG-4000.

Hasil analisis TEM juga dapat diperoleh distribusi ukuran butir partikel (gambar 3). Ukuran rata-rata untuk sampel Fe_3O_4 tanpa enkapsulasi adalah $13,5 \pm 0,4$ nm, hal ini sesuai dengan estimasi ukuran kristalit pada XRD. Untuk sampel Fe_3O_4 yang dienkapsulasi PEG diperoleh ukuran butir partikel rata-rata adalah $10,5 \pm 0,3$ nm. Kesesuaian ukuran kristalit dari XRD dan ukuran butir dari TEM menunjukkan bahwa nanopartikel Fe_3O_4 yang dihasilkan merupakan *polycrystal*. Berkurangnya ukuran partikel pada Fe_3O_4 setelah dienkapsulasi PEG dapat disebabkan oleh rantai-rantai PEG yang terikat pada Fe_3O_4 menghambat pertumbuhan kristal sehingga ukuran partikel menjadi lebih kecil.



Gambar 3. Distribusi ukuran nanopartikel pada (a) sampel Fe_3O_4 tanpa dienkapsulasi PEG-4000, (b) sampel Fe_3O_4 yang dienkapsulasi PEG-4000.

Sifat dielektrik nanopartikel Fe_3O_4 diukur pada temperatur ruang dengan jangkauan frekuensi masukan adalah 10-120 kHz menggunakan spektroskopi impedansi terkomputerisasi. Hasil pengukuran berupa dielektrik kompleks relatif (dielektrik riil dan dielektrik imajiner), rugi tangen, dan impedansi. Secara umum konstanta

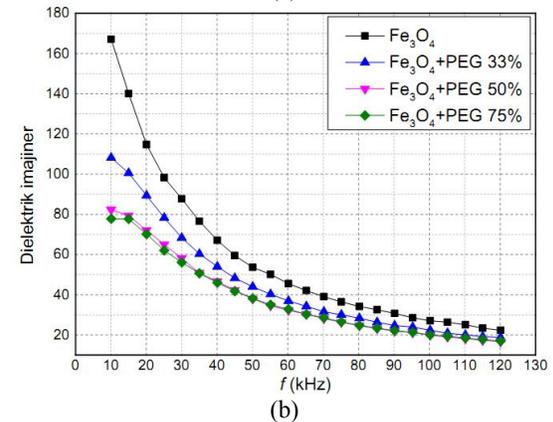
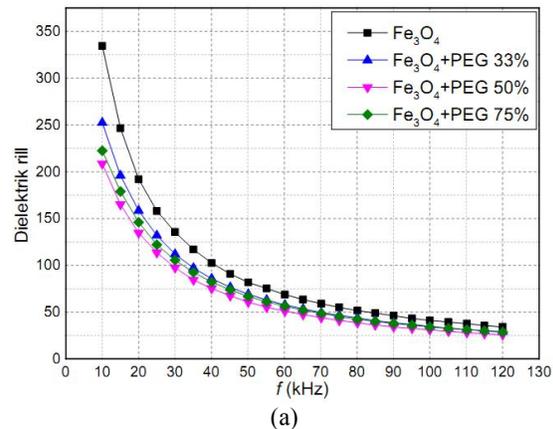
dielektrik kompleks relatif suatu material dituliskan seperti persamaan (2)

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - i\epsilon_r'' \quad (2)$$

dengan ϵ_r' adalah bagian riil konstanta dielektrik, yang berhubungan dengan kemampuan material untuk menyimpan energi dan sifat optik pada suatu material. Sedangkan ϵ_r'' adalah bagian imajiner, yang menentukan jumlah energi yang hilang (disipasi energi).

Grafik konstanta dielektrik riil dan imajiner terhadap frekuensi dari masing-masing sampel dapat dilihat pada Gambar 4. Konstanta dielektrik masing-masing sampel cenderung mengalami penurunan dengan meningkatnya frekuensi. Menurut pustaka [10], Ketergantungan terhadap frekuensi disebabkan polarisasi interfacial seperti yang diprediksi oleh Maxwell-Wagner. Struktur dielektrik ferit diasumsikan memiliki dua lapisan, lapisan dalam bersifat konduktif (butir ferit) dan lapisan lainnya sebagai batas butir yang merupakan insulator. Pada frekuensi rendah batas butir Fe_3O_4 lebih dominan, sedangkan pada frekuensi lebih tinggi maka butir Fe_3O_4 menjadi dominan.

Konstanta dielektrik sebanding dengan kemampuan polarisasi dari dipol suatu material. Struktur Fe_3O_4 terdiri dari kation Fe^{2+} dan Fe^{3+} , dimana ion ini memunculkan



Gambar 4. Grafik hubungan konstanta dielektrik sebagai fungsi frekuensi (a) konstanta dielektrik riil (ϵ_r'), (b) konstanta dielektrik imajiner (ϵ_r'').

dipol pada Fe_3O_4 sehingga menghasilkan polarisasi orientasi. Polarisasi ini dominan terhadap frekuensi rendah, dan menurun dengan meningkatnya frekuensi. Ketika medan listrik eksternal diberikan kepada nanopartikel, lompatan elektron pada kation Fe^{2+} menuju Fe^{3+} pada struktur oktahedral meningkatkan polarisasi, namun dengan meningkatnya frekuensi, elektron tidak dapat mengikuti perubahan medan listrik yang berfluktuasi sehingga menurunkan konstanta dielektrik. Tingginya konstanta dielektrik pada frekuensi rendah secara garis besar dipengaruhi oleh ion Fe^{2+} , perpindahan elektron, cacat pada batas butir, dll [7].

Dielektrik imajiner (ϵ_r'') menunjukkan pola yang serupa dengan konstanta dielektrik riil, yaitu menurun dengan meningkatnya frekuensi. Penurunan dielektrik imajiner menunjukkan berkurangnya energi yang terdisipasi pada sampel dengan meningkatnya frekuensi. Disipasi energi terjadi karena polarisasi pada material yang dikarenakan pemberian medan listrik eksternal mengakibatkan meningkatnya mobiltas elektron, hal tersebut memungkinkan terjadinya gesekan antar elektron hingga menimbulkan panas. Pada frekuensi tinggi kemampuan material untuk terpolarisasi berkurang sehingga menurunkan energi yang terdisipasi (hilang).

Besar nilai konstanta dielektrik riil dan imajiner pada Fe_3O_4 yang dienkapsulasi PEG dapat dilihat pada Tabel 4

Tabel 4. Konstanta dielektrik kompleks pada sampel Fe_3O_4 dengan variasi enkapsulasi PEG untuk frekuensi 10 kHz, 50 kHz dan 100 kHz.

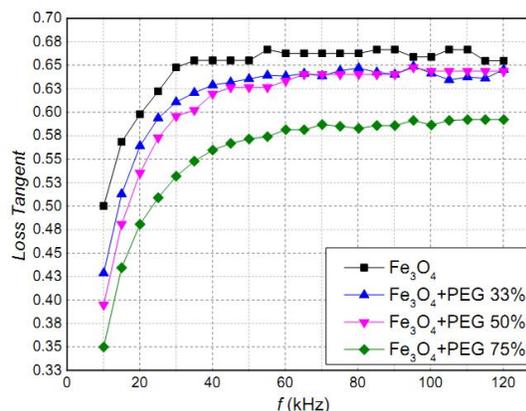
Kosentrasi PEG (%)	ϵ'			ϵ''		
	10	50	100	10	50	100
	(kHz)			(kHz)		
0%	334	81,8	41,1	167,2	53,6	27,1
33%	252,5	69,2	34,8	108,9	37,7	21,3
50%	208,6	60,7	30,9	108,2	44,0	22,3
75%	222,4	66,8	34,2	82,3	38,0	19,9

yang menunjukkan kecenderungan menurun dengan bertambahnya kosentrasi PEG. Penurunan besar konstanta dielektrik dapat dijelaskan dengan penurunnya ukuran butir dari sampel Fe_3O_4 yang dienkapsulasi PEG (lihat Tabel 3). Menurut pustaka [10], untuk struktur heterogen dengan partikel ukuran besar akan memiliki ion besi lebih banyak daripada ukuran yang lebih kecil, sehingga bersifat lebih konduktif. Energi yang terdisipasi cenderung menurun terhadap penurunan ukuran butir, hal ini dapat dijelaskan bahwa ukuran yang besar memiliki

mobilitas elektron yang besar, sehingga energi yang hilang menjadi besar juga.

Pada keempat sampel terdapat satu sampel yang tidak dipengaruhi oleh ukuran butir, yaitu sampel dengan enkapsulasi PEG 75%. Pada umumnya Fe_3O_4 yang dienkapsulasi PEG akan memberikan efek menurunnya ukuran butir [11,12]. Sampel dengan PEG 75% seharusnya akan memiliki sifat dielektrik yang paling kecil dari pada sampel variasi kosentrasi lainnya, namun sampel dengan PEG 75% lebih besar konstanta dielektrik riil dan imajiner dari pada sampel dengan PEG 50%. Hal ini dimungkinkan adanya pengaruh lain selain ukuran butir, contohnya kosentrasi fasa lain yang dominan. Sampel Fe_3O_4 yang dienkapsulasi PEG memiliki kosentrasi fasa lain yang besar, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2. Fasa $\alpha-Fe_2O_3$, $\alpha-FeO(OH)$ dan $\gamma-FeO(OH)$ akan memberikan pengaruh pada sifat dielektrik sampel.

Grafik rugi tangen dapat dilihat pada Gambar 5. Besarnya dielektrik imajiner berhubungan langsung dengan rugi tangen yang juga disebut *loss factor*.



Gambar 5. Grafik rugi tangen ($\tan \delta$) terhadap frekuensi untuk seluruh sampel.

Rugi tangen menunjukkan rasio dari dielektrik imajiner dengan dielektrik riil. Meningkatnya frekuensi akan membuat rugi tangen meningkat, hal ini menjelaskan bahwa dengan bertambahnya frekuensi maka semakin meningkatnya energi yang terdisipasi. Hal ini dapat dijelaskan akibat dari pengaruh berkurangnya polarisasi yang terjadi dan meningkatnya mobilitas muatan. Dari Gambar 5 diperoleh juga bahwa besar rugi tangen akan meningkat dengan bertambahnya kosentrasi PEG pada sampel Fe_3O_4 , hal ini menjelaskan bahwa faktor kehilangan energi pada sampel Fe_3O_4 tanpa enkapsulasi lebih tinggi dari pada faktor kehilangan energi pada sampel dengan kosentrasi PEG. Ukuran partikel yang besar (Fe_3O_4 tanpa enkapsulasi) akan meningkatkan mobilitas muatan pada butir konduktif, sehingga meningkatkan besar *loss factor*.

4. Kesimpulan

Sifat dielektrik sampel nanopartikel Fe_3O_4 yang dienkapsulasi PEG telah menunjukkan ketergantungan terhadap frekuensi, hal ini sesuai dengan sifat dielektrik Fe_3O_4 dan ferit lainnya. Konstanta dielektrik riil dan dielektrik imajiner menurun dengan bertambahnya frekuensi. konstanta dielektrik juga mengalami penurunan dengan bertambahnya konsentrasi PEG, hal ini cenderung disebabkan oleh batas butir dan butir sampel, namun pengaruh dari fasa lain pada sampel juga berkontribusi pada sifat dielektrik. Rugi tangen meningkat dengan bertambahnya frekuensi dan menurun dengan bertambahnya konsentrasi PEG. Hasil pengukuran sifat dielektrik menunjukkan keoptimalan pada sampel yang dienkapsulasi dengan konsentrasi PEG yang rendah, dikarenakan memiliki disipasi energi yang cukup kecil, dan sifat dielektrik menurun tidak begitu signifikan.

Ucapan Terimakasih

1. Nano-Fabrication Consortium of Nagoya University, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) Nano-Project Platform, Japan, 2012 – 2017.
2. Hibah Penelitian Kompetensi (HiKom) Dikti, Kementerian Pendidikan Nasional, 2015 – 2016.

Daftar Acuan

- [1] A. H. Lu, E. L. Salabas, and F. Schuth, Magnetic nanoparticles: synthesis, protection, functionalization, and application, *Angew. Chem. Int. Ed*, Vol. 46, 2007, pp. 1222-1244.
- [2] A. K. Gupta, and M. Gupta, Synthesis and surface engineering of iron oxide nanoparticles for biomedical applications, *Biomaterials*, Vol. 26, 2005, pp. 3995-4021.
- [3] Y. Liu, D. Song, C. Wu, and J. Leng, EMI shielding performance of nanocomposites with MWCNTs, nanosized Fe_3O_4 and Fe, *Composites: Part B*, Vol. 63, 2014, pp.34–40.
- [4] K. S. Lee, M. Lee, K. M. Byun, and I.S. Lee, Surface plasmon resonance biosensing based on target-responsive mobility switch of magnetic nanoparticles under magnetic fields, *Journal Materials Chemistry*, Vol 21, 2011, pp. 5156-5162.
- [5] A. Riyanto, Sintesis nanopartikel Fe_3O_4 (magnetit) dan potensinya sebagai material aktif pada permukaan sensing biosensor berbasis

surface plasmon resonance (SPR), *Thesis*, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta. 2012.

- [6] D. Habauzit, J. Chopineau, and B. Roig, SPR-based Biosensor: a toll for biodetection of hormonal compounds, *Anal Bional Chem*, Vol. 387, 2006, pp. 1215-1223.
- [7] I. Haldar, M. Biswas, and A. Nayak, Microstructure, dielectric response and electrical properties of polypyrrole modified (Poly N-Vinyl Carbazole- Fe_3O_4) nanocomposites, *Synthetic Metal*, Vol. 161, 2011, pp. 1400-1407.
- [8] N. Majid, Rancang bangun sistem spektroskopi impedansi untuk menentukan tetapan dielektrik kompleks material dalam rentang frekuensi 5 – 120 kHz, *Thesis*, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2012.
- [9] H. Kumar, R. C. Srivastava, P. Negi, H. M. Agrawal and K. Asokan, Dielectric behavior of cobalt ferrite nanoparticles, *International Journal of electrical and Electronic Engineering*, Vol. 2, 2013, pp. 59-66.
- [10] K. Iwauchi, Dielectric properties of fine particle Fe_3O_4 and some ferrite, *Japanese Journal of Applied Physic*, Vol. 10, 1971, pp. 1520-1528.
- [11] J. Sun, S. Zhou, P. Hou, Y. Yang, J. Weng, X. Li, and M. Li, Synthesis and Characterization of Biocompatible Fe_3O_4 Nanoparticles, *Wiley Periodicals, Inc. J Biomed Mater Res*, vol. 80A, 2006, pp. 333–341.
- [12] S. A. Jayanthi, D. Sukanya, A. J. A. Pragasam and P. Sagayaraj, The influence of PEG 20,000 concentration on the size control and magnetic properties of functionalized bio-compatible magnetic nanoparticles, *Der Pharma Chemica*, Vol. 5, 2013, pp.90-102.