

DOI: doi.org/10.21009/SPEKTRA.033.02

Received: 11 September 2018
Revised: 12 December 2018
Accepted: 28 December 2018
Published: 30 December 2018

STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MAGNETIK DARI LAPISAN TIPIS NANOKOMPOSIT $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVDF}$

Ramli^{1,a)}, Nidya Yulfriska^{1,b)}, Yenni Darvina^{1,c)}, Yulkifli^{1,d)}, Edi Sanjaya^{2,e)}, Ambran Hartono^{2,f)}

¹Jurusan Fisika, Universitas Negeri Padang, Jl. Prof Hamka, Air Tawar Padang 25131, Indonesia

²Jurusan Fisika, UIN Syarif Hidayatullah Jakarta, Tangerang Selatan, Banten 15412, Indonesia

Email: ^{a)}ramli@fmipa.unp.ac.id, ^{b)}nidyayulfriska95@gmail.com, ^{c)}yardarina@yahoo.com, ^{d)}yulkifliamir@gmail.com, ^{e)}edi.sanjaya@uinjkt.ac.id, ^{f)}ambran.hartono@uinjkt.ac.id

Abstrak

Artikel ini berhubungan dengan laporan pembuatan lapisan tipis nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVDF}$ (*Poly Vinylidene Fluoride*) dengan fraksi berat nanopartikel Fe_3O_4 yang berbeda. Nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVDF}$ disiapkan menggunakan metode sol-gel dan kemudian ditumbuhkan menggunakan alat *spin coating* di atas substrat kaca. Lapisan tipis nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVDF}$ dikarakterisasi menggunakan XRD, FTIR, SEM, dan VSM untuk menentukan struktur mikro dan sifat magnetiknya. Fraksi berat nanopartikel Fe_3O_4 dalam matriks PVDF berpengaruh pada struktur mikro dan sifat magnetik nanokomposit. Hasil karakterisasi XRD dan FTIR menunjukkan bahwa nanokomposit telah terbentuk dan telah terjadi interaksi antara pengisi (Fe_3O_4) dengan molekul polimer PVDF. Morfologi permukaan nanokomposit memperlihatkan bentuk spherulites (*spherulites*) dan lamela radial. Analisis kurva histeresis dari nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVDF}$ menunjukkan magnetisasi saturasi dari lapisan nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVDF}$ bertambah dengan bertambahnya konsentrasi Fe_3O_4 dalam sampel.

Kata-kata kunci: Fe_3O_4 , lapisan tipis, nanokomposit, PVDF.

Abstract

Manufacture thin films of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVDF}$ (Poly Vinylidene Fluoride) nanocomposite with different Fe_3O_4 nanoparticles composition is reported in this article. The effect of the composition of Fe_3O_4 nanoparticles in the PVDF matrix on the microstructure and magnetic properties of nanocomposites film is discussed. Nanocomposite $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVDF}$ was prepared using a sol-gel and then grown using a spin coating on a glass substrate. The thin film of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVDF}$ nanocomposite was characterized using XRD, FTIR, SEM, and VSM to determine its microstructure and magnetic properties. The results of XRD and FTIR characterization showed that nanocomposites had been formed and interaction between fillers (Fe_3O_4) and PVDF polymer molecules had occurred. Morphology of nanocomposites shows the form of spherulites and radial lamella. Hysteresis curve analysis of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVDF}$ nanocomposites showed saturation magnetization of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVDF}$ nanocomposite layers increased with increasing Fe_3O_4 concentration in the sample.

Keywords: Fe_3O_4 , thin film, nanocomposite, PVDF.

PENDAHULUAN

Memasuki era "*Internet-of-Things*" sekarang ini, permintaan konsumsi divais yang fleksibel, ringan, berbiaya rendah, berdaya rendah, multifungsi, dan ramah lingkungan telah meningkat tajam [1, 2]. Konsekuensinya, penelitian di bidang sains material maju menjadi intensif dilakukan. Di masa depan, material-material yang memiliki sifat unik, baik dalam nanokomposit maupun lapisan tipis akan menjadi kunci teknologi moderen.

Sintesis dan fungsionalisasi material berstruktur nano merupakan bagian penting dalam penelitian nanomaterial. Pengembangan material berstruktur nano saat ini memiliki potensi yang sangat menjanjikan, mulai dari partikel nano, kawat nano, tabung nano hingga material nanokomposit [3].

Komposit adalah kombinasi dari dua atau lebih bahan yang berbeda, satu sebagai komponen matriks dan yang lainnya sebagai komponen pengisi. Sedangkan nanokomposit itu sendiri adalah struktur padat dengan dimensi nanometer yang disusun berulang-ulang dengan berbagai bentuk compiler.

Perangkat elektronik fungsional yang fleksibel dapat diperoleh dengan mengintegrasikan bahan oksida dalam polimer fleksibel [4]. Akan tetapi, ada masalah yang muncul saat mensintesis oksida logam dalam matriks polimer yakni adanya ketidaksesuaian kimia dan mekanis pada antarmuka material-material tersebut.

Material Fe_3O_4 termasuk oksida logam transisi. Hasil-hasil penelitian telah menunjukkan bahwa oksida logam transisi merupakan salah satu material fungsional penting untuk aplikasi divais elektronik baru karena memiliki sifat-sifat unik. Sifat-sifat tersebut adalah memiliki polarisasi spin yang sempurna, transisi logam-insulator yang besar, sifat feroelektrik, sifat multiferroik, dan efek penukar resistif [5].

Nanopartikel Fe_3O_4 yang digunakan dalam paper ini telah dilaporkan sebelumnya [6] dimana nanopartikel Fe_3O_4 diolah dari mineral pasir besi menggunakan metode *Ball Milling*. Fe_3O_4 dalam ukuran nano telah diteliti memiliki beberapa kelebihan yaitu; superparamagnetik dan mempunyai kejenuhan magnetik yang tinggi serta sifat-sifatnya bergantung pada ukurannya [7].

Sampai saat ini, nanokomposit polimer/ Fe_3O_4 telah dilaporkan oleh beberapa peneliti, yaitu; nanokomposit PEDOT:PSS/ Fe_3O_4 dengan metode solgel [8], nanokomposit PANI/ Fe_3O_4 dengan metode *in situ* polimerisasi [9], dan nanokomposit PVDF/ Fe_3O_4 dengan metode *solution mixing technique*. Dalam artikel ini, nanokomposit Fe_3O_4 /PVDF dibuat dari nanopartikel Fe_3O_4 yang berasal dari pasir besi alam dan metode preparasinya dengan *spin coating*.

Fe_3O_4 dalam ukuran nano yang terkandung dalam pasir besi memiliki kelebihan dibandingkan dengan senyawa lain, karena lebih unggul dalam menanggapi medan magnet luar. Jadi, ia memiliki peluang besar untuk diterapkan di berbagai bidang industri dan elektronik. Sebuah lapisan tipis nanopartikel magnetik di dalam matriks polimer dimungkinkan untuk diterapkan pada teknologi elektronik, magnetik, optik dan mekanik [11, 12]. Fe_3O_4 ini banyak terdapat dalam pasir besi di Sumatera Barat, Indonesia dan pengolahan pasir besi tersebut telah dijadikan nanopartikel Fe_3O_4 [6] dan lapisan tipis Fe_3O_4 [13, 14].

Polyvinylidene Fluoride atau PVDF adalah fluoropolimer termoplastik murni yang memiliki titik leleh rendah sehingga lebih mudah untuk meleleh [15]. Material PVDF sering digunakan pada beberapa aplikasi karena bila dibandingkan dengan *fluoropolymer* yang lain, ia lebih murni, lebih kuat, dan tahan terhadap pelarut asam. Konsekuensinya, penggunaan PVDF sebagai matriks dalam pembuatan nanokomposit adalah salah satu parameter kunci untuk berbagai aplikasi.

Kemajuan teknologi dan adanya permintaan masyarakat, komposit polimer telah menggantikan banyak bahan logam konvensional karena mempunyai keunggulan yaitu sifat mekaniknya yang sangat baik [16], stabilitas termal [17], dan kinerja fungsional [18], kemudahan pengolahan [19], peningkatan produktivitas [20], dan pengurangan biaya produksi [21]. Dengan kata lain, komposit polimer lebih disukai karena lebih kuat, lebih ringan, dan lebih murah daripada bahan logam tradisional [22]. Dalam artikel ini, penulis berkonsentrasi pada pengaruh nanopartikel Fe_3O_4 pada pembentukan nanokomposit Fe_3O_4 /PVDF serta sifat struktur mikro dan magnetik nanokomposit diuraikan lebih rinci.

METODE

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental. Pengisi nanokomposit adalah Fe₃O₄ yang telah disintesis sebelumnya [6]. Sementara, polimer PVDF (-CH₂-CF₂)_n diperoleh dari Sigma Aldrich dengan mutu analitis dan langsung digunakan tanpa perlakuan lanjutan. Proses pembuatan sol-gel Fe₃O₄, adalah mereaksikan 17,4 gr Fe₃O₄ dan 41,96 ml HNO₃ dengan asam oksalat sebanyak 4,5 gr pada suhu 110⁰C. Kemudian sebanyak 14 gr sol-gel Fe₃O₄ dilarutkan dengan ethylene glycol sebanyak 55 gr dalam gelas beaker, lalu dipanaskan pada suhu 80⁰C selama 2 jam sambil diaduk dengan *magnetic stirrer*.

Sol-gel Fe₃O₄ dilarutkan dalam THF dan diaduk menggunakan *ultrasonic cleaner* selama 2 jam. PVDF (3:70 PVDF: THF) terus dicampur dengan pengaduk magnetik pada suhu 75⁰ C sampai PVDF larut secara menyeluruh dalam pelarut. Selanjutnya, larutan THF - Fe₃O₄ ditambahkan ke dalam larutan PVDF dan diaduk selama 24 jam. Gel prekursor diteteskan di atas substrat kaca kemudin diputar dengan alat *spin coating* dengan kecepatan 3000 rpm selama 60 sekon. Lapisan tipis yang terbentuk di *annealing* dengan suhu 60⁰ C selama 30 menit. Variasi komposisi Fe₃O₄/PVDF dan penamaan sampel diperlihatkan dalam TABEL 1. Lapisan tipis nanokomposit Fe₃O₄/PVDF dikarakterisasi menggunakan *X-Ray diffraction (XRD)*, *Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR)*, *scanning electron microscopy (SEM)*, dan *vibrating sample magnetometer (VSM)*. Sampel Fe₃O₄/PVDF dikarakterisasi dengan SEM penampang lintang untuk mengetahui ketebalan sampel sebagai bukti bahwa telah terbentuk lapisan tipis nanokomposit Fe₃O₄/PVDF.

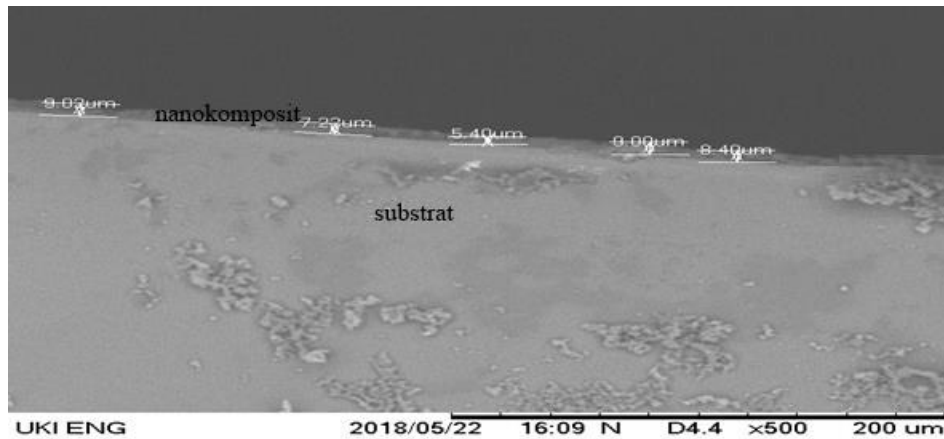
TABEL 1. Persentase Fe₃O₄ dan penamaan sampel

Sampel	% Fe ₃ O ₄	Kode Sampel
PVDF	0%	PVDF
Fe ₃ O ₄	100%	Fe ₃ O ₄
Fe ₃ O ₄ /PVDF	75%	Fe ₃ O ₄ /PVDF C3
Fe ₃ O ₄ /PVDF	67%	Fe ₃ O ₄ /PVDF C2
Fe ₃ O ₄ /PVDF	50%	Fe ₃ O ₄ /PVDF C1

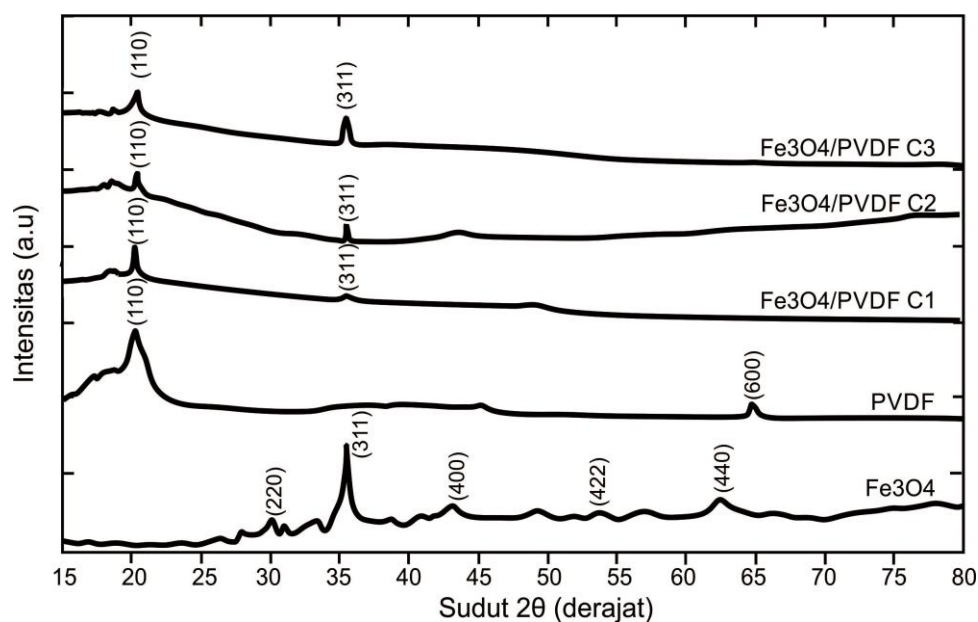
HASIL DAN PEMBAHASAN

GAMBAR 1 adalah citra SEM penampang lintang sampel nanokomposit Fe₃O₄/PVDF. Ketebalan rerata sampel nanokomposit Fe₃O₄/PVDF adalah ±7,6 mikrometer. Hal ini membuktikan bahwa sampel telah memenuhi kriteria sebuah lapisan tipis. Selanjutnya, bahwa nanokomposit Fe₃O₄/PVDF telah terbentuk diketahui dari karakterisasi XRD serta karakterisasi FTIR untuk mengetahui jenis ikatan yang terbentuk.

Hasil karakterisasi XRD pada GAMBAR 2 menunjukkan pola difraksi dari nanopartikel Fe₃O₄, PVDF dan nanokomposit Fe₃O₄/PVDF. Pola XRD diperoleh menggunakan radiasi Cu Ka ($\lambda = 1,541\text{\AA}$) untuk rentang nilai 2θ dari 10⁰ hingga 80⁰. Pola difraksi nanopartikel Fe₃O₄ ditandai dengan adanya puncak Fe₃O₄ dalam pola XRD pada sudut $2\theta = 30,6; 35,8; 43,4; 54,0$ dan $63,0^0$ yang berhubungan dengan bidang (220), (311), (400), (422), dan (440). Puncak-puncak tersebut bersesuaian dengan data JCPDS No. 89-4319. Analisis pola difraksi menunjukkan bahwa sampel berstruktur kubik spinel, karena pantulan terkuat yang berasal dari bidang (311) dan ukuran krsitalit nanopartikel Fe₃O₄ sebesar 20,5 nm, seperti yang telah dilaporkan sebelumnya [6].



GAMBAR 1. Citra SEM penampang lintang nanokomposit Fe₃O₄/PVDF



GAMBAR 2. Pola XRD dari Fe₃O₄, PVDF dan nanokomposit Fe₃O₄/PVDF

Pola difraksi PVDF murni muncul pada sudut $2\theta = 20,2^{\circ}$ dan $65,0^{\circ}$ yang berhubungan dengan bidang (110) dan (600) dengan fase β [23]. Sementara itu, pola difraksi nanokomposit Fe₃O₄/PVDF muncul pada sudut $2\theta = 20,2^{\circ}$ yang berkaitan dengan fase β (110) PVDF dan $2\theta = 35,8^{\circ}$ yang merupakan menandakan keberadaan Fe₃O₄ dengan bidang (311). Intensitas bidang (311) ini dalam nanokomposit meningkat dengan bertambahnya konsentrasi Fe₃O₄. Hal ini menandakan bahwa periodisitas makin banyak sehingga kristalinitas nanokomposit bertambah. Hasil XRD tersebut mengkonfirmasi bahwa telah terjadi penggabungan antara nanopartikel Fe₃O₄ dalam matriks PVDF melalui interaksi antara pengisi (yaitu Fe₃O₄) dengan molekul polimer. Puncak-puncak difraksi ini bersesuaian dengan database JCPDS no. 82–1533 dengan struktur kubus spinel ferrite, seperti yang telah dilaporkan oleh peneliti sebelumnya [24, 25].

Ukuran kristalit dari sampel dihitung menggunakan persamaan Scherrer,

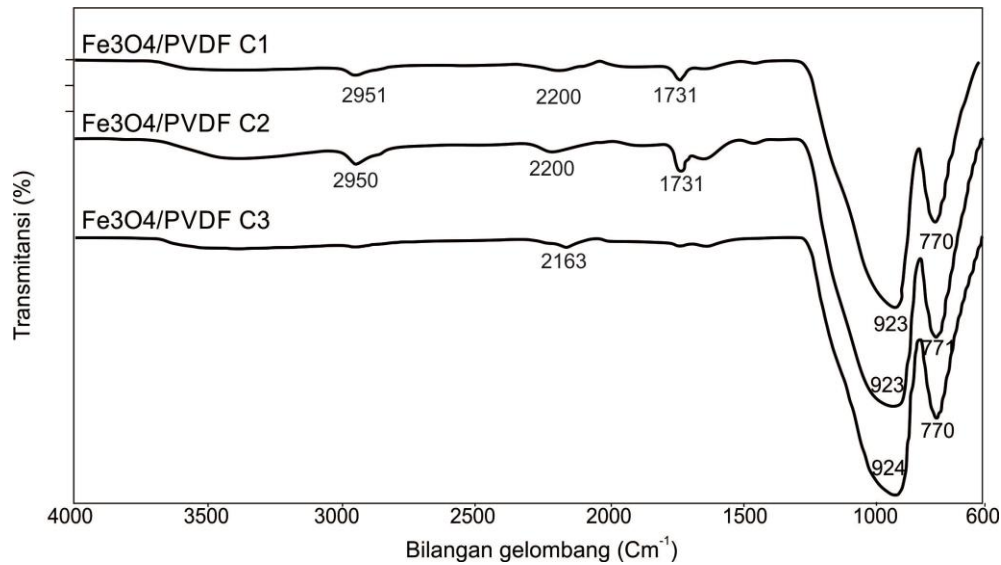
$$D = K \frac{\lambda}{B \cos \theta_B} \tag{1}$$

dengan D adalah ukuran kristalit, K adalah konstanta, λ panjang gelombang sinar X, B adalah lebar setengah pita maksimum (FWHM), dan θ_B adalah sudut Bragg. Ukuran kristalit berkurang dengan bertambahnya fraksi nanopartikel Fe₃O₄ dalam nanokomposit, dimana ukuran butir rata-rata adalah

100 nm, 50 nm dan 20 nm berturut-turut untuk sampel Fe₃O₄/PVDF C1, Fe₃O₄/PVDF C2, dan Fe₃O₄/PVDF C3.

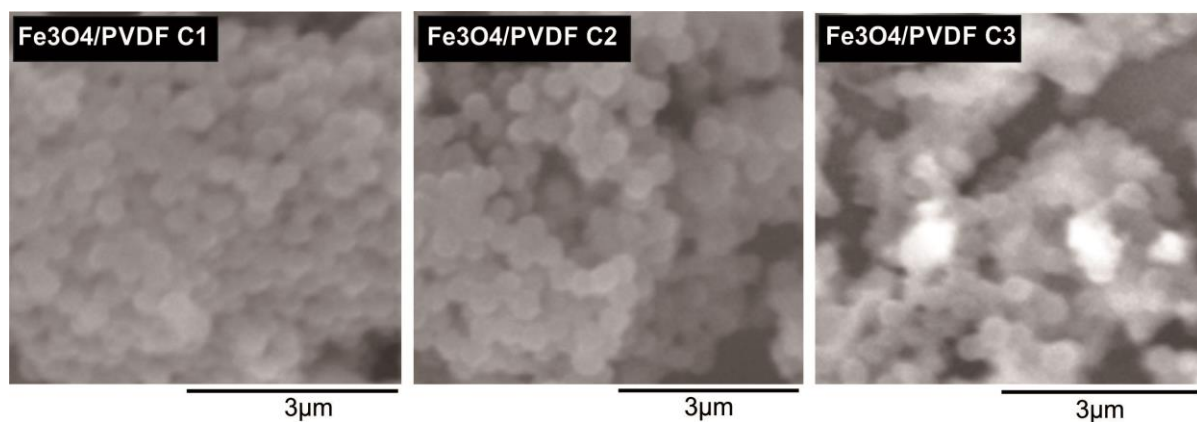
Pengujian FTIR telah dilakukan untuk mengidentifikasi jenis ikatan-ikatan kimia molekul dengan cara memproduksi spektrum serapan infra merah yang mirip dengan “sidik jari” molekul. Spektrum yang dihasilkan merepresentasikan absorbansi dan transmitansi molekular yang menghasilkan suatu sidik jari molekular dari suatu sampel.

Spektrum serapan FTIR dari komposit Fe₃O₄/PVDF ditunjukkan pada GAMBAR 3. Pita absorpsi yang kuat dan lebar hadir pada 770 cm⁻¹ dan 923 cm⁻¹ yang berkaitan dengan C-H bend. Pita 1731 cm⁻¹ berhubungan vibrasi grup karbonil (C=O), sementara puncak 2200 cm⁻¹ berhubungan dengan vibrasi C-F, dan puncak 2951 cm⁻¹ berhubungan dengan vibrasi C-H [26]–[28].



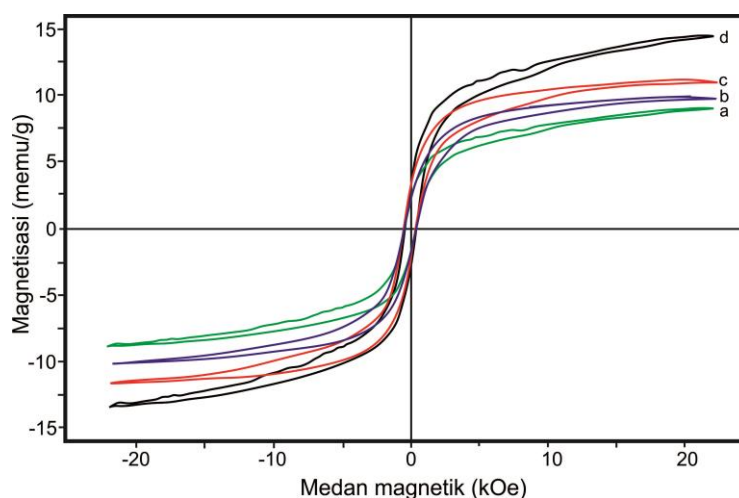
GAMBAR 3. Spektrum FTIR dari nanokomposit Fe₃O₄/PVDF

Morfologi permukaan dari sampel nanokomposit Fe₃O₄/PVDF diperlihatkan dalam GAMBAR 4. PVDF dikenal memperlihatkan morfologi yang terdiri dari sperulus (*spherulites*) dan lamella radial ketika ia mengkristal dari larutannya [29]. Morfologi dari lapisan tipis nanokomposit menunjukkan sperulus yang lebih besar dan lamella radial antar sperulus dan juga terdapat porositas. Sperulus ini ditemukan memiliki diameter rata-rata dalam kisaran 0,31-0,34 μm. Peningkatan ukuran sperulus menunjukkan peningkatan laju kristalisasi polimer, yang menegaskan bahwa penambahan Fe₃O₄ membantu kristalisasi yang lebih cepat. Terlihat partikel Fe₃O₄ terdistribusi dengan baik di seluruh matriks PVDF yang ditandai dengan titik putih.



GAMBAR 4. Citra SEM lapisan nanokomposit Fe₃O₄/PVDF

Sementara itu, sifat magnetik lapisan tipis nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVDF}$ diketahui dari kurva histeresis. GAMBAR 5 memperlihatkan kurva histeresis dari sampel Fe_3O_4 dan nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVDF}$ yang diukur pada suhu ruang. Semua sampel nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVDF}$ memperlihatkan kurva histeresis yang sempit. Hal ini berarti bahwa semua sampel bersifat ferimagnetik lunak. Sampel lapisan tipis Fe_3O_4 diperoleh memiliki magnetisasi saturasi sebesar 14,43 emu/g. Sementara magnetisasi saturasi dari lapisan tipis nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVDF}$ bertambah dengan bertambahnya konsentrasi Fe_3O_4 dalam sampel. Dengan kata lain, sifat magnetik dari nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVDF}$ diinduksi oleh efek penambahan nanopartikel Fe_3O_4 . Meningkatnya nilai magnetisasi saturasi dengan penambahan nanopartikel Fe_3O_4 karena nanopartikel Fe_3O_4 tertanam dalam matriks polimer non-magnetik. Hasil ini sesuai dengan yang dilaporkan sebelumnya untuk nanokomposit $\text{PVDF}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ yang dibuat dengan metode penuangan pelarut (*solvent casting method*) [24].



GAMBAR 5. Kurva histeresis lapisan nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVDF}$ dan Fe_3O_4 . a. sampel $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVDF}$ C1, b. sampel $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVDF}$ C2, c. sampel $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVDF}$ C3, dan d. Fe_3O_4

KESIMPULAN

Lapisan tipis nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVDF}$ telah berhasil dipreparasi dengan metode *spin coating*. Hasil pengujian XRD dan FTIR memperlihatkan bahwa telah terjadi penggabungan antara nanopartikel Fe_3O_4 dalam matriks PVDF melalui interaksi antara pengisi (Fe_3O_4) dengan molekul polimer. Penambahan konsentrasi Fe_3O_4 dalam matriks PVDF menyebabkan kristalinitas nanokomposit meningkat. Sementara penambahan Fe_3O_4 membantu kristalisasi polimer yang lebih cepat yang ditandai dengan peningkatan ukuran sperulus pada morfologi permukaan. Sifat magnetik lapisan tipis $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVDF}$ adalah ferimagnetik lunak dengan magnetisasi saturasi bertambah dengan bertambahnya konsentrasi Fe_3O_4 dalam sampel lapisan tipis $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVDF}$.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis berterimakasih kepada DRPM Ristekdikti yang telah memberikan dukungan dana penelitian melalui skim Penelitian Berbasis Kompetensi 2018 nomor kontrak 074/SP2H/LT/DRPM/2018. Terimakasih juga disampaikan kepada LP2M Universitas Negeri Padang yang telah membantu administrasi dan Laboratorium Fisika Material dan Biofisika Universitas Negeri Padang atas izin pemakaian fasilitas laboratorium.

REFERENSI

- [1] J. Lee, H.-A. Kao and S. Yang, "Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data environment", *Procedia CIRP*, vol. 16, pp. 3 – 8, Jun. 2014.
- [2] Y. Bitla and Y-H. Chu, "MICAtronics: A new platform for flexible X-tronics," *FlatChem*, vol. 3, pp. 26–42, Jun. 2017.
- [3] M. K. Riley and W. Vermeris, "Recent Advances in Nanomaterials for Gene Delivery—A Review," *Nanomaterials*, vol. 7, no. 5, p. 94, Apr. 2017.
- [4] I. -C. Cheng and S. Wagner, "Overview of Flexible Electronics Technology," in *Flexible Electronics; Materials and Application*, New York, USA, Springer, 2009, ch. 1, pp. 1-28.
- [5] K. Goto, T. Kanki, T. Kawai, and H. Tanaka, "Giant Magnetoresistance Observed in (Fe,Mn)₃O₄ Artificial Nanoconstrained Structures at Room Temperature," *Nano Lett*, vol. 10, no. 8, pp. 2772–2776, Jul. 2010.
- [6] Y. Darvina, D. Rianto, F. Murti, N. Yulfriska, Ramli, "Struktur Nano Partikel Besi Oksida dari Pasir Besi Pantai Tiram Sumatera Barat," Prosiding Semirata BKS Bidang MIPA Wilayah Barat, Jambi, Indonesia, 12 Mei 2017, pp. 1080-1090.
- [7] Y. Aiguo, X. Liu, G. Qiu, H. Wu, R. Yi, N. Zhang, J. Xu "Solvothermal synthesis and characterization of size-controlled Fe₃O₄ nanoparticles," *J. Alloys Compd*, vol. 458, no. 1-2, pp. 487 – 491, Jun. 2008.
- [8] Y-J. Xia, J. Fang, P. Li, B. Zhang, H. Yao, J. Chen, J. Ding, J. Ouyang, "Solution-Processed Highly Superparamagnetic and Conductive PEDOT:PSS/Fe₃O₄ Nanocomposite Films with High Transparency and High Mechanical Flexibility," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 9 no. 22, pp 19001–19010. May. 2017.
- [9] J. Husain, P. Pradeep, N. Raghu, A. M. Yadwad, P. Kamblee, N. Reddy, J. Sagar, B. Anjum, M. N. V. Prasad, "Synthesis, conductivity and sensitivity studies of polyaniline – iron oxide nanocomposites," *Ferroelectrics* 505, pp. 229–235. Dec. 2016.
- [10] Z-W. Ouyang, E-C. Chen, T-M. Wu, "Thermal Stability and Magnetic Properties of Polyvinylidene Fluoride/Magnetite Nanocomposites," *Materials*, vol. 8, no. 7, pp. 4553-4564. Jul. 2015.
- [11] J. Kumar, R. K. Singh, S. B. Samanta, R. C. Rastogi, R. Singh, "Single-step magnetic patterning of iron nano - particles in a semiconducting polymer matrix," *Macromol. Chem. Phys.*, vol. 207, pp. 1584–1588, Sept. 2006.
- [12] W. Eerenstein, N. D. Mathur, J. F. Scott, "Multiferroic and magnetoelectric materials." *Nature*, vol. 442, pp. 759–765, Aug. 2006.
- [13] N. Yulfriska et al., "Optical Properties of Fe₃O₄ Thin Films Prepared from the Iron Sand by Spin Coating Method," IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 335 012010, 2018 © IOP Publishing, doi: 10.1088/1757-899X/335/1/012010.
- [14] D. Rianto et al., "Analysis of Crystal Structure of Fe₃O₄ Thin Films Based on Iron Sand Growth by Spin Coating Method," IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 335 012012, 2018, IOP Publishing, doi: 10.1088/1757-899X/335/1/012012.
- [15] A. Hartono et al., "Effect of mechanical treatment and fabrication temperature on piezoelectric properties of PVDF film," AIP Conference Proceedings 1656 030018, 2015 © AIP Publishing LLC, doi: 10.1063/1.4917107.
- [16] W. Jiang, F. L. Jin, S.J. Park, "Thermo-mechanical behaviors of epoxy resins reinforced with nano-Al₂O₃ particles," *J Ind Eng Chem*, vol. 18, pp. 594–596, Mar. 2012.

- [17] S. E. Lee, E. Jeong, M. Y. Lee, M. K. Lee, Y. S. Lee, "Improvement of the mechanical and thermal properties of polyethersulfone-modified epoxy composites," *J Ind Eng Chem*, vol. 33, pp. 73–79, Jan. 2016.
- [18] P. Y. Hung, K. T. Lau, B. Fox, N. Hameed, J. H. Lee, D. Hui, "Surface modification of carbon fibre using graphene-related materials for multifunctional composites," *Composites Part B*, vol. 133, pp.240–257, Jan. 2018.
- [19] S. R. Forrest, "The path to ubiquitous and low-cost organic electronic appliances on plastic," *Nature*, vol. 428, pp. 911–918, Apr. 2004.
- [20] W. S. Kang, K. Y. Rhee, S. J. Park, "Thermal, impact and toughness behaviors of expanded graphite/graphite oxide-filled epoxy composites," *Composites Part B*, vol. 94, pp. 238–244, Jun. 2016.
- [21] R. Liu, W. F. Pu, D. J. Du, "Synthesis and characterization of core-shell associative polymer that prepared by oilfield formation water for chemical flooding," *J Ind Eng Chem*, vol. 46, pp. 80–90, Feb. 2017.
- [22] Y. Zhang, K. Y. Rhee, D. Hui, S. -J. Park, "A critical review of nanodiamond based nanocomposites: Synthesis, properties and applications," *Composites Part B*, vol. 143, pp. 19-27, Jun. 2018.
- [23] A. Hartono, S. Satira, M. Djamal, R. Ramli, H. Bahar, E. Sanjaya, "Effect of Mechanical Treatment Temperature on Electrical Properties and Crystallite Size of PVDF Film," *Advances in Materials Physics and Chemistry*, vol. 3, no. 1, pp. 71-76, Mar. 2013.
- [24] T. Prabhakaran, J. Hemalatha, "Ferroelectric and magnetic studies on unpoled Poly (vinylidene Fluoride)/Fe₃O₄ magnetoelectric nanocomposite structures," *Mater. Chem. Phys*, vol. 137, no. 3, pp. 781-787, Jan. 2013.
- [25] A. S. Bhatt, D. K. Bhat, M. S. Santosh, "Crystallinity, conductivity, and magnetic properties of PVDF-Fe₃O₄ composite films," *J. Appl. Polym. Sci*, vol. 119, no. 2, pp. 968-972, Jan. 2011.
- [26] Z. Cao, W. Jiang, X. Ye, X. Gong, "Preparation of superparamagnetic Fe₃O₄/PMMA nano composites and their magnetorheological characteristics," *J. Magn. Magn. Mater*, vol. 320, no. 8, pp. 1499–1502, Apr. 2008.
- [27] S. Si, A. Kotal, T. K. Mandal, S. Giri, H. Nakamura, T. Kohara, "Size-Controlled Synthesis of Magnetite Nanoparticles in the Presence of Polyelectrolytes," *Chem. Mater*, vol. 16, no. 18, pp. 3489-3496, Jul. 2004.
- [28] P. Dallas, V. Georgakilas, D. Niarchos, P. Komninou, T. Kehagias, D. Petridis, "Synthesis, characterization and thermal properties of polymer/magnetite nanocomposites," *Nanotechnology*, vol. 17, no. 8, pp. 2046–2053, Mar. 2006.
- [29] R. Gregorio Jr, D. S. Borges, "Effect of crystallization rate on the formation of the polymorphs of solution cast poly(vinylidene fluoride)," *Polymer*, vol. 49, no. 18, pp. 4009-4016, Aug. 2008.