



SINTESIS DAN KARAKTERISASI NANOKOMPOSIT $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$ SEBAGAI KOMPONEN ANODA BATERAI

Balkis Br Harahap^{1*}, Ridwan Yusuf Lubis², & Abdul Halim Daulay³

^{1,2,&3}Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sumatera Utara, Jalan Lapangan Golf Nomor 120, Deli Serdang, Sumatera Utara 20353, Indonesia

*Email: brharahapbalkis@gmail.com

Submit: 07-01-2026; Revised: 13-01-2026; Accepted: 14-01-2026; Published: 23-01-2026

ABSTRAK: Material magnetik seperti Fe_3O_4 memiliki potensi tinggi sebagai bahan konduktif dan penyimpan energi. Namun, sifat listriknya yang terbatas memerlukan modifikasi melalui penambahan polimer konduktif untuk meningkatkan kinerjanya. Kombinasi antara Fe_3O_4 dan Polianilin (PANI) diharapkan dapat meningkatkan konduktivitas dan kapasitansi melalui pembentukan nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$. Pada penelitian ini, nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$ disintesis menggunakan metode kopresipitasi dengan bahan dasar pasir besi lokal, kemudian dikombinasikan melalui metode polimerisasi *in situ* menggunakan variasi volume monomer anilin sebesar 4 mL, 6 mL, 8 mL, dan 10 mL, masing-masing diberi kode PA1, PA2, PA3, dan PA4. Hasil karakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) menunjukkan terbentuknya dua fasa utama, yaitu magnetit (Fe_3O_4) dan maghemit ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$). Analisis *Scanning Electron Microscopy* (SEM) memperlihatkan bahwa peningkatan volume monomer anilin menghasilkan permukaan komposit yang lebih homogen, meskipun volume yang berlebihan menyebabkan overpolimerisasi. Hasil uji menggunakan LCR Meter menunjukkan peningkatan nilai kapasitansi dan konduktivitas listrik hingga mencapai kondisi optimum pada sampel PA3, dengan ukuran kristal 50,94 nm, kapasitansi 8,9 F, resistansi 1,0 Ω , dan konduktivitas 127,4 S/m. Hasil ini membuktikan bahwa variasi volume monomer anilin berpengaruh signifikan terhadap sifat struktural dan elektrik nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$. Komposisi optimum PA3 menunjukkan potensi tinggi sebagai material anoda atau elektroda penyimpan energi konduktif yang mendukung pengembangan teknologi energi ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Kata Kunci: Fe_3O_4 , Kopresipitasi, Nanokomposit, PANI, Polimerisasi *In Situ*.

ABSTRACT: Magnetic materials such as Fe_3O_4 have high potential as conductive materials and energy stores. However, its limited electrical properties require modification through the addition of conductive polymers to improve its performance. The combination of Fe_3O_4 and Polyaniline (PANI) is expected to improve conductivity and capacitance through the formation of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$ nanocomposites. In this study, $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$ nanocomposites were synthesized using a coprecipitation method with local iron sand-based materials, then combined through an *in situ* polymerization method using aniline monomer volume variations of 4 mL, 6 mL, 8 mL, and 10 mL, coded PA1, PA2, PA3, and PA4, respectively. The results of characterization using *X-Ray Diffraction* (XRD) showed the formation of two main phases, namely magnetite (Fe_3O_4) and maghemite ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$). *Scanning Electron Microscopy* (SEM) analysis showed that increased volume of aniline monomer resulted in a more homogeneous composite surface, although excessive volume led to overpolymerization. The test results using the LCR Meter showed an increase in capacitance and electrical conductivity values to reach optimal conditions in the PA3 sample, with a crystal size of 50.94 nm, capacitance of 8.9 F, resistance of 1.0 Ω , and conductivity of 127.4 S/m. These results prove that the variation in aniline monomer volume has a significant effect on the structural and electrical properties of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$ nanocomposites. The optimum composition of PA3 shows high potential as an anode material or conductive energy storage electrode that supports the development of environmentally friendly and sustainable energy technology.

Keywords: Fe_3O_4 , Coprecipitation, Nanocomposites, PANI, *In Situ* Polymerization.



How to Cite: Harahap, B. B., Lubis, R. Y., & Daulay, A. H. (2026). Sintesis dan Karakterisasi Nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$ sebagai Komponen Anoda Baterai. *Panthera : Jurnal Ilmiah Pendidikan Sains dan Terapan*, 6(1), 417-426. <https://doi.org/10.36312/panthera.v6i1.988>



Panthera : Jurnal Ilmiah Pendidikan Sains dan Terapan is Licensed Under a CC BY-SA [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi energi yang pesat menjadi faktor penting dalam memenuhi kebutuhan manusia modern. Namun, ketergantungan terhadap energi fosil menimbulkan dampak negatif seperti pencemaran udara dan percepatan perubahan iklim global. Energi terbarukan seperti tenaga surya, angin, dan air kini banyak dikembangkan sebagai alternatif ramah lingkungan. Meskipun demikian, sistem penyimpanan energi masih menjadi kendala utama, karena sifat intermiten dari sumber energi tersebut. Salah satu solusi potensial untuk mengatasi kendala ini adalah penggunaan baterai sebagai media konversi dan penyimpanan energi listrik yang efisien (Ren *et al.*, 2024).

Baterai *Lithium-ion* (LiB) merupakan teknologi penyimpanan energi yang paling banyak digunakan saat ini, karena memiliki kepadatan energi tinggi, efisiensi konversi yang baik, dan umur siklus panjang. Teknologi ini banyak diaplikasikan pada perangkat elektronik portabel dan kendaraan listrik. Namun, performanya masih dapat ditingkatkan terutama dalam hal kapasitas spesifik, kestabilan struktural, dan efisiensi biaya produksi. Salah satu pendekatan yang banyak dikembangkan untuk meningkatkan kinerja LiB adalah melalui rekayasa material elektroda, khususnya pada bagian anoda (Wang *et al.*, 2017).

Material Fe_3O_4 (magnetit) menjadi kandidat anoda yang menjanjikan, karena memiliki kapasitas teoretis tinggi sebesar 924 mAh g^{-1} , ketersediaan melimpah di alam, serta bersifat ramah lingkungan (Bruck *et al.*, 2016). Namun, Fe_3O_4 memiliki konduktivitas listrik rendah dan mengalami perubahan volume besar selama proses pengisian dan pengosongan yang menyebabkan degradasi material dan penurunan performa (Nguyen *et al.*, 2021). Untuk mengatasi kelemahan tersebut, Fe_3O_4 dapat dikombinasikan dengan polimer konduktif seperti Polianilin (PANI) yang memiliki kestabilan kimia baik, fleksibilitas tinggi, dan konduktivitas listrik yang mampu meningkatkan performa material berbasis oksida logam (Yang *et al.*, 2023).

Beberapa penelitian sebelumnya telah menjelaskan hasil yang menjanjikan. Darvina *et al.* (2024) berhasil mensintesis nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$ menggunakan teknik *spin coating* dan menunjukkan peningkatan kapasitansi seiring meningkatnya proporsi Fe_3O_4 hingga batas optimum tertentu. Rahmawati & Putri (2024) melaporkan bahwa Fe_3O_4 dari pasir besi Gunung Galunggung memiliki struktur kristal kubik dengan ukuran kristalit rata-rata 15,40 nm yang menunjukkan potensi besar pasir besi sebagai sumber bahan baku material magnetik. Zulaicha *et al.* (2020) juga menemukan bahwa kombinasi Fe_3O_4 dan PANI melalui metode polimerisasi *in situ* menghasilkan struktur antarmuka yang lebih homogen, memperbaiki konduktivitas listrik, serta menekan perubahan volume partikel selama proses elektrokimia.



Meskipun demikian, sebagian besar penelitian sebelumnya menggunakan bahan kimia sintesis murni dan belum mengeksplorasi potensi sumber daya lokal sebagai bahan dasar Fe_3O_4 . Pengaruh variasi volume monomer anilin terhadap struktur, morfologi, dan sifat listrik nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$ belum banyak dikaji secara sistematis. Oleh karena itu, penelitian ini mengisi celah tersebut dengan mengembangkan nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$ berbasis pasir besi lokal melalui metode polimerisasi *in situ* dengan variasi volume anilin untuk memperoleh komposisi optimum dan performa listrik terbaik.

Indonesia memiliki potensi besar sebagai sumber bahan dasar Fe_3O_4 melalui pasir besi yang tersebar luas di wilayah pesisir, termasuk di Pantai Pasir Hitam, Kwala Gebang, Kabupaten Langkat, Provinsi Sumatera Utara. Pasir besi tersebut kaya akan senyawa oksida besi seperti Fe_2O_3 dan Fe_3O_4 , namun pemanfaatannya dalam bidang material maju masih terbatas. Pengembangan material Fe_3O_4 berbasis sumber daya lokal tidak hanya meningkatkan nilai tambah mineral nasional, tetapi juga mendukung kemandirian dan keberlanjutan produksi energi di masa depan (Nzereogu *et al.*, 2022). Metode kopresipitasi dipilih karena sederhana, ekonomis, dan efektif untuk menghasilkan partikel Fe_3O_4 berukuran *nano* dengan kemurnian tinggi, serta memungkinkan pengendalian ukuran kristal dan morfologi secara presisi (Harsono, 2021).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini difokuskan pada sintesis dan karakterisasi nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$ berbasis pasir besi lokal untuk aplikasi anoda baterai *lithium-ion*. Kebaruan penelitian ini terletak pada penggunaan sumber Fe_3O_4 dari pasir besi Pantai Pasir Hitam, Kwala Gebang, serta penerapan variasi volume monomer anilin dalam proses polimerisasi *in situ* untuk memperoleh struktur dan sifat listrik optimum. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap peningkatan performa material anoda serta mendukung pengembangan teknologi energi berkelanjutan dan kemandirian material nasional.

METODE

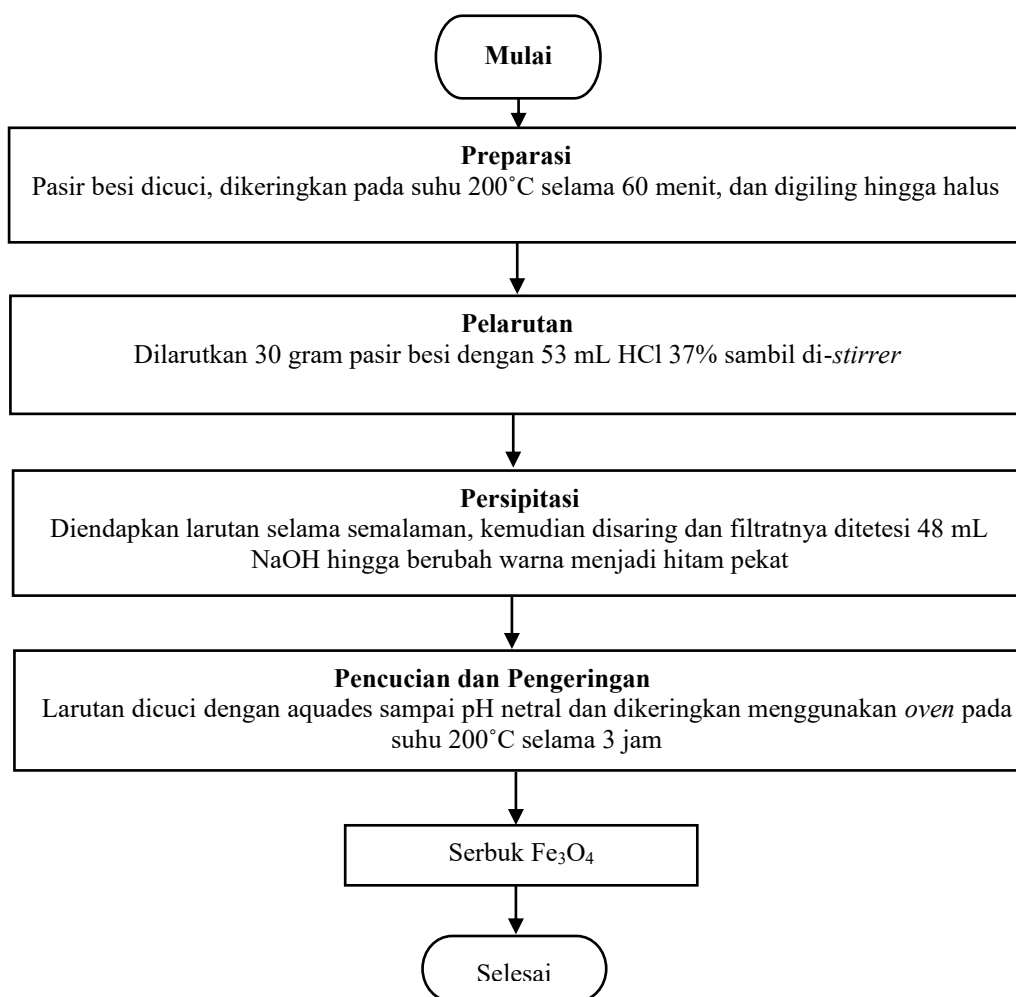
Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental dengan pendekatan kuantitatif yang bertujuan untuk mensintesis dan mengkarakterisasi nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{polianilin}$ ($\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$). Variabel bebas pada penelitian ini adalah variasi volume monomer anilin (PA1, PA2, PA3, dan PA4), sedangkan variabel terikat adalah sifat kristalinitas, morfologi, dan sifat listrik nanokomposit. Parameter kontrol meliputi suhu reaksi, pH larutan, waktu pengadukan (*stirring*), dan konsentrasi reaktan.

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah magnet, tabung *erlenmeyer*, *beaker glass*, *mortar*, spatula, corong kaca, *aluminium foil*, *hotplate stirrer*, *stirrer bar*, kertas lakmus, kertas saring, alat titrasi, suntikan, neraca analitik, dan *oven*. Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah pasir besi, Natrium Hidroksida (NaOH 100%), Asam Klorida (HCl 37% dan HCl 1 M), aquades, anilin, *Ammonium Peroxodisulfate* (APS), dan Etanol.

Prosedur Sintesis dan Karakterisasi Fe_3O_4

Pasir besi yang digunakan dicuci dan dikeringkan pada suhu 200°C selama 60 menit, dan digiling hingga halus. Kemudian dilarutkan 30 gram pasir besi dengan 53 mL HCl 37% sambil di-*stirrer* hingga berubah warna menjadi kuning

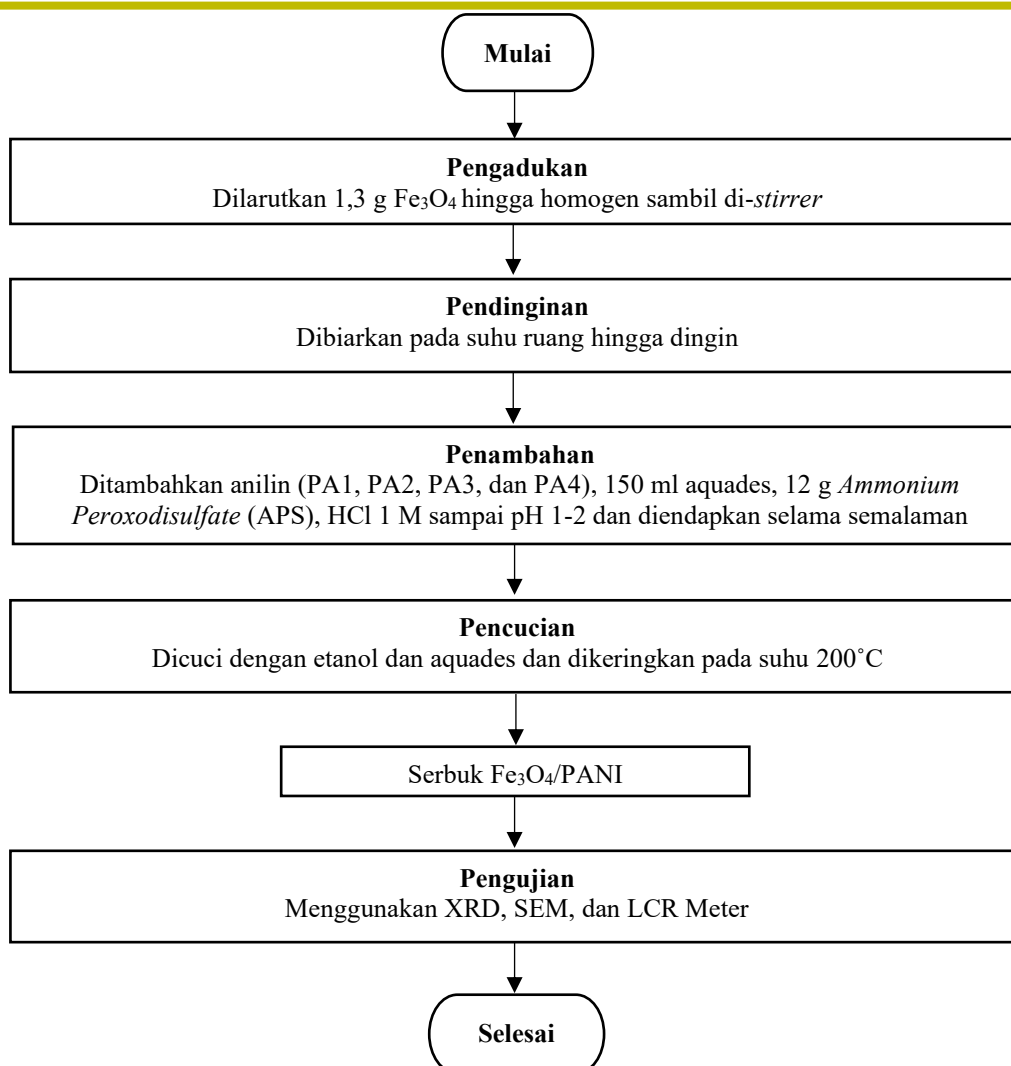
kencur dan homogen. Larutan diendapkan semalaman, kemudian disaring dan filtratnya ditetesi 48 mL NaOH hingga berubah warna menjadi hitam pekat. Endapan dicuci dengan aquades sampai mendapatkan pH netral, kemudian dikeringkan menggunakan *oven* pada suhu 200°C selama 3 jam untuk mendapatkan Fe₃O₄.



Gambar 1. Diagram Alir Sintesis dan Karakterisasi Fe₃O₄.

Prosedur Sintesis dan Karakterisasi Fe₃O₄/PANI

Prosedur sintesis dan karakterisasi Fe₃O₄/PANI adalah dilarutkan 1,3 g Fe₃O₄ hingga homogen sambil di-*stirrer*; dibiarkan larutan pada suhu ruang hingga dingin; kemudian di-*stirrer* dengan suhu 30°C dan ditambahkan *aniline* dengan 4 variasi (PA1, PA2, PA3, dan PA4) ke dalam larutan bersama dengan larutan 150 mL aquades, 12 g *Ammonium Peroxodisulfate* (APS) dengan HCl 1 M sampai pH 1-2 dan diendapkan selama semalaman. Setelah itu, komposit Fe₃O₄/PANI dicuci dengan etanol dan aquades, lalu dikeringkan menggunakan *oven* pada suhu 200°C atau hingga benar-benar kering. Sebagai tahap akhir, material Fe₃O₄/PANI yang telah kering kemudian dikarakterisasi menggunakan teknik seperti XRD, SEM, dan LCR Meter untuk mengetahui struktur kristal dan sifat kemagnetannya.



Gambar 2. Diagram Alir Sintesis dan Karakterisasi Fe₃O₄/PANI.

Karakterisasi Nanokomposit Fe₃O₄/PANI

Karakterisasi dilakukan untuk mengidentifikasi fasa kristalin, morfologi, dan sifat listriknya menggunakan alat *X-Ray Diffractometry* (XRD), *Scanning Electron Microscopy* (SEM), dan LCR Meter.

X-Ray Diffractometry (XRD)

XRD dapat memberikan informasi tambahan mengenai ukuran kristal. Ukuran kristal rata-rata dapat dihitung dengan pelebaran puncak-puncak difraksi menggunakan persamaan *Scherrer* berikut ini.

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta}$$

Keterangan:

D = Ukuran Kristal (Å);

K = Konstanta Kristal (0,94);

λ = Panjang Gelombang (1,54 Å);

β = FWHM; dan

θ = Sudut Puncak (°).



Dimana D adalah ukuran kristal, λ adalah panjang gelombang dari berkas sinar-X yang datang, β adalah lebar puncak pada setengah dari intensitas maksimum puncak refleksi, dan K adalah konstanta *Scherrer* (Sumadiyasa & Manuaba, 2018).

Scanning Electron Microscopy (SEM)

SEM digunakan untuk mengamati permukaan sampel dengan perbesaran mulai dari 20 kali hingga 500.000 kali. Prinsip kerja alat SEM, yaitu permukaan benda ditembak dengan elektron berenergi tinggi. Elektron akan memantul kembali dan menghasilkan elektron sekunder ke segala arah ketika dikenai pada permukaan benda (Nandiyanto *et al.*, 2017).

LCR Meter

Alat ukur LCR Meter adalah sebuah perangkat elektronik yang digunakan untuk mengukur induktansi (L), kapasitansi (C), dan resistansi (R). Prinsip kerja dari alat ini adalah dengan mengukur impedansi, impedansi diukur secara internal dan dikonversikan ke layar penampil pengukuran yang dikonversikan ke kapasitansi atau nilai induktansi yang sesuai. Pembacaan akan cukup akurat jika kapasitor atau induktor perangkat yang diuji tidak memiliki impedansi komponen resistif yang signifikan. Nilai konduktivitas dapat dihitung menggunakan persamaan berikut ini.

$$\sigma = \frac{L}{R \times A}$$

Keterangan:

L = Ketebalan sampel (m);

R = Resistansi (Ω); dan

A = Luas Penampang (m^2).

(Sumber: Asfe *et al.*, 2020).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilakukan pada bulan Juli-Agustus Tahun 2025 di Laboratorium Material, Universitas Islam Negeri Sumatera Utara.

X-Ray Diffractometry (XRD)

XRD untuk mengidentifikasi fasa kristalin, mengetahui struktur kristal, serta menghitung ukuran kristal dari nanokomposit $Fe_3O_4/PANI$. Ukuran kristal dapat dihitung menggunakan persamaan *Scherrer*, sedangkan pola difraksi dibandingkan dengan standar JCPDS Nomor 19-0629 untuk Fe_3O_4 .

Tabel 1. Ukuran Kristal Sampel Material Nanokomposit $Fe_3O_4/PANI$.

Sampel	FWHM (radian)	FWHM (deg)	D (nm)
PA1	0.77706	0.01356	13.6833
PA2	0.71753	0.01252	14.8206
PA3	0.20895	0.00365	50.9363
PA4	0.38440	0.00671	27.6683

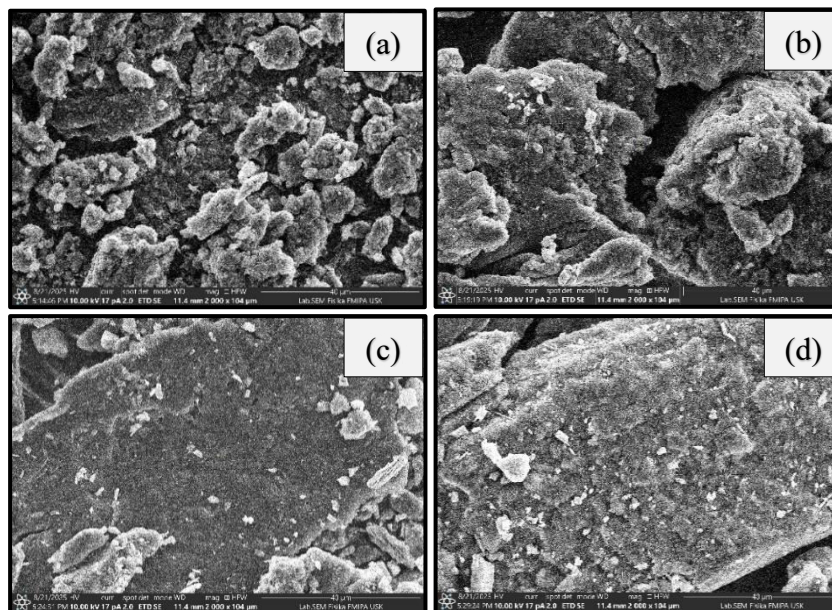
Pola difraksi keempat sampel menunjukkan puncak karakteristik Fe_3O_4 pada sudut 2θ sekitar $18,5^\circ$ (002), $22,8^\circ$ (200), $64,3^\circ$ (202), $68,7^\circ$ (122), dan $77,3^\circ$ (004). Tidak ditemukan puncak lain yang menandakan fasa oksida besi lain (seperti Fe_2O_3), sehingga dapat disimpulkan bahwa fasa yang terbentuk adalah magnetit (Fe_3O_4). Pada komposit $Fe_3O_4/PANI$, intensitas puncak Fe_3O_4 sedikit menurun

seiring peningkatan volume anilin. Hal ini menunjukkan bahwa lapisan polianilin bersifat *amorf*, menutupi sebagian permukaan Fe_3O_4 dan menurunkan kristalinitas total material. Terdapat juga pergeseran kecil posisi puncak ke arah 2θ yang lebih tinggi pada sampel PA3 dan PA4 yang menandakan adanya regangan kisi (*lattice strain*) akibat interaksi antar *ion* $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ dengan gugus amina dari polianilin.

Ukuran kristal yang dihitung menunjukkan tren bahwa semakin besar nilai FWHM, semakin kecil ukuran kristalnya. Sampel PA3 memiliki ukuran kristal terbesar (50,94 nm), sedangkan PA1 terkecil (13,68 nm). Peningkatan ukuran kristal hingga PA3 menunjukkan bahwa pertumbuhan kristal Fe_3O_4 relatif optimal pada komposisi anilin menengah, sedangkan pada PA4 terjadi penurunan kembali akibat *overpolymerization* yang menghambat difusi *ion* selama proses nukleasi. Hasil ini sejalan dengan penelitian Rahmawati & Putri (2024) yang melaporkan bahwa metode kopresipitasi menghasilkan fasa magnetit murni dengan ukuran kristal sekitar 15-50 nm. Secara teoretis, hasil ini mendukung konsep teori nukleasi dan pertumbuhan kristal, dimana keseimbangan antara laju nukleasi dan pertumbuhan menentukan distribusi ukuran kristal yang dihasilkan.

Scanning Electron Microscopy (SEM)

Pengujian SEM dilakukan dengan tujuan untuk mempelajari morfologi dan karakterisasi permukaan suatu material lebih detail dengan perbesaran tinggi dan resolusi yang sangat baik.



Gambar 3. SEM. (a) PA1; (b) PA2; (c) PA3; dan (d) PA4.

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa pada sampel PA1, permukaan terlihat kasar dengan aglomerasi besar akibat lapisan PANI yang belum terbentuk merata. Pada PA2, distribusi partikel lebih homogen, menunjukkan awal pembentukan lapisan PANI yang kontinu. Sampel PA3 menunjukkan morfologi paling seragam dengan partikel bulat berukuran 40-60 nm yang tersebar merata, menandakan terbentuknya lapisan polianilin tipis dan terdistribusi baik di sekitar



partikel Fe_3O_4 . Struktur ini memungkinkan peningkatan interaksi antar partikel dan memperkuat jalur perkolasi elektron.

Namun pada PA4, permukaan tampak menggumpal dan lapisan PANI menjadi terlalu tebal (>100 nm), menyebabkan penurunan homogenitas dan peningkatan hambatan listrik. Distribusi ukuran partikel yang diukur dari citra SEM menunjukkan bahwa peningkatan jumlah monomer anilin menyebabkan partikel menjadi lebih besar dan bentuknya cenderung tidak beraturan. Hasil ini sesuai dengan Basith *et al.* (2021) yang menyatakan bahwa lapisan PANI dapat berfungsi sebagai agen pendispersi (*dispersing agent*), membantu mencegah aglomerasi partikel Fe_3O_4 , serta meningkatkan homogenitas struktur komposit. Namun, bila jumlah PANI berlebih dan proses polimerisasi tidak terkontrol, maka menyebabkan pembentukan aglomerat yang menurunkan efisiensi konduksi.

LCR Meter

Pengujian LCR Meter dilakukan untuk mengetahui sifat listrik komposit, mencakup kapasitansi (C), resistansi (R), dan konduktivitas listrik (σ). Sampel uji berupa pelet silinder berdiameter 1 cm dan ketebalan 1 cm, dengan elektroda lempeng tembaga pada kedua permukaannya.

Tabel 2. Hasil Nilai LCR Meter $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$.

Sampel	Kapasitansi (F)	Resistansi (Ω)	Konduktivitas (S/m)
PA1	8.5	1.6 Ω	79.7
PA2	8.8	1.4 Ω	91.0
PA3	8.9	1.0 Ω	127.4
PA4	8.1	1.8 Ω	70.8

Berdasarkan Tabel 2, nilai kapasitansi $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$ menunjukkan adanya peningkatan dari 8,5 F pada sampel PA1 menjadi 8,9 F pada sampel PA3, kemudian menurun kembali menjadi 8,1 F pada sampel PA4. Nilai resistansi hasil pengujian juga memperlihatkan kecenderungan yang serupa, yaitu mengalami penurunan dari 1,6 Ω pada sampel PA1 menjadi 1,0 Ω pada sampel PA3, lalu meningkat kembali menjadi 1,8 Ω pada sampel PA4. Nilai konduktivitas yang diperoleh dari hasil pengujian juga memperkuat hasil analisis sebelumnya. Konduktivitas komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$ mengalami peningkatan dari 79,7 S/m sampel pada sampel PA1 menjadi nilai tertinggi sebesar 127,4 S/m pada sampel PA3, kemudian menurun menjadi 70,8 S/m pada sampel PA4. Hasil pengujian LCR Meter menunjukkan bahwa variasi jumlah anilin berpengaruh signifikan terhadap sifat listrik komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$. SEM dilakukan dengan tujuan untuk mempelajari morfologi dan karakterisasi permukaan suatu material lebih detail dengan perbesaran tinggi dan resolusi yang sangat baik.

Hasil ini sejalan dengan temuan Basith *et al.* (2021) yang melaporkan peningkatan konduktivitas listrik komposit PANI/ Fe_3O_4 hingga batas optimum, kemudian menurun akibat aglomerasi Fe_3O_4 berlebih. Secara ilmiah, dapat disimpulkan bahwa keseimbangan antara rasio Fe_3O_4 dan ketebalan lapisan PANI berperan penting dalam membentuk jalur perkolasi elektron kontinu yang menentukan performa listrik optimum dari komposit. Dispersi Fe_3O_4 yang homogen dalam matriks PANI juga menjadi faktor krusial karena mampu meminimalkan hamburan muatan dan mempertahankan konektivitas antarmuka yang efektif.



SIMPULAN

Penelitian ini berhasil mensintesis dan karakretisasi Fe_3O_4 menggunakan metode kopresipitasi, kemudian dikombinasikan dengan PANI melalui metode polimerisasi *in situ* menggunakan variasi anilin, yaitu PA1, PA2, PA3, dan PA4. Hasil XRD menunjukkan bahwa peningkatan volume anilin meningkatkan ukuran kristal $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$ dari 13,68 nm (PA1) hingga 50,94 nm (PA3), lalu menurun menjadi 27,67 nm (PA4) karena kelebihan anilin menghambat pertumbuhan kristal. Hasil SEM menunjukkan peningkatan homogenitas permukaan seiring bertambahnya volume monomer anilin, namun volume berlebih menyebabkan overpolimerisasi. Hasil LCR Meter menunjukan peningkatan kapasitansi dan konduktivitas.

SARAN

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan agar dilakukan optimasi lebih lanjut terhadap perbandingan massa Fe_3O_4 dan volume anilin guna memperoleh karakteristik nanokomposit yang lebih stabil, konduktivitas listrik yang tinggi, dan perlu diperhatikan pengendalian suhu, pH, dan kecepatan pengadukan, karena faktor-faktor tersebut sangat mempengaruhi kemurnian, ukuran kristal, dan homogenitas material yang dihasilkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan puji dan syukur ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya, sehingga penelitian dan penulisan artikel ini dapat diselesaikan dengan baik. Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada kedua orang tua atas doa, dukungan, dan motivasi yang diberikan selama proses penelitian. Terima kasih juga disampaikan kepada dosen pembimbing atas bimbingan, arahan, serta saran yang sangat berharga. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada pihak Laboratorium Fisika, Universitas Islam Negeri Sumatera Utara, yang telah menyediakan fasilitas dan membantu ketika penulis membutuhkan bantuan, sehingga proses penelitian dapat berjalan dengan baik dan lancar.

DAFTAR RUJUKAN

- Asfe, D. H., Marzuarman, M., & Syaiful, A. (2020). Rancang Bangun Alat Ukur LCR Meter Berbasis *Arduino Uno*. In *Seminar Nasional Industri dan Teknologi* (pp. 45-53). Riau, Indonesia: Politeknik Negeri Bengkalis.
- Basith, A., Syahputra, A., Fitriyadi, S., Rosmaiyadi, R., Fitri, F., & Triani, S. N. (2021). Academic Stress and Coping Strategy in Relation to Academic Achievement. *Jurnal Cakrawala Pendidikan*, 40(2), 292-304. <https://doi.org/10.21831/cp.v40i2.37155>
- Bruck, A. M., Cama, C. A., Gannett, C. N., Marshcilok, A. C., Takeuchi, E. S., & Takeuchi, K. J. (2016). Nanocrystalline Iron Oxide Based Electroactive Materials in Lithium Ion Batteries: The Critical Role of Crystallite Size, Morphology, and Electrode Heterostructure on Battery Relevant Electrochemistry. *Inorganic Chemistry Frontiers*, 3(1), 26-40. <https://doi.org/10.1039/c5qi00247h>



- Darvina, Y., Desnita, D., Zainul, R., Laghari, I. A., Azril, A., & Abdullah, M. (2024). Advancements in Fe₃O₄/PANI Nanocomposite Film Technology: Synthesis and Characterization. *Journal of Medicinal and Chemical Sciences*, 7(1), 689-702. <https://doi.org/10.26655/jmchemsci.2024.5.5>
- Harsono, H. (2021). *Sintesis Partikel Nan Seng Oksida (ZnO) Doping Mangan (Mn) dengan Metode Kopresipitasi dan Karakteristik Kekristalan serta Sifat Magnetik*. Tangerang: Pascal Books.
- Nandiyanto, A. B. D., Hadirahmanto, A. T., Ahid, A., Cinthya, F., Jafarian, M. B., Murida, R., Asyiah, S. M. S., & Liswanti, W. (2017). *Pengantar Sains dan Teknologi Nano*. Bandung: UPI Press.
- Nguyen, M. D., Tran, H.-V., Xu, S., & Lee, T. R. (2021). Fe₃O₄ Nanoparticles: Structures, Synthesis, Magnetic Properties, Surface Functionalization, and Emerging Applications. *Applied Sciences*, 11(23), 1-34. <https://doi.org/10.3390/app112311301>
- Nzereogu, P. U., Omah, A. D., Ezema, F. I., Iwuoha, E. I., & Nwanya, A. C. (2022). Anode Materials for Lithium-Ion Batteries: A Review. *Applied Surface Science Advances*, 9(1), 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2022.100233>
- Rahmawati, E., & Putri, N. P. (2024). Sintesis dan Karakterisasi PANI/Fe₃O₄ Menggunakan Fe₃O₄ dari Pasir Besi Gunung Galunggung Jawa Barat. *Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI)*, 13(2), 45-50. <https://doi.org/10.26740/ifi.v13n2.p45-50>
- Ren, H., Li, H., Barry, P., Zhongling, W., Campos, A. R., Takeuchi, E. S., Marshchilok, A. C., Yan, S., Takeuchi, T., & Reichmanis, E. (2024). Recent Advances in the Application of Magnetite (Fe₃O₄) in Lithium-Ion Batteries: Synthesis, Electrochemical Performance, and Characterization Techniques. *Chemistry of Materials*, 36(19), 9299-9319. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.4c02013>
- Sumadiyasa, M., & Manuaba, I. B. S. (2018). Determining Crystallite Size Using Scherrer Formula, Williamson-Hull Plot, and Particle Size with SEM. *Buletin Fisika*, 19(1), 28-34.
- Wang, L., Li, Y. R., Li, J., Zou, S., Stach, E. A., Takeuchi, K. J., Takeuchi, E. S., Marshcilok, A. C., & Wong, S. S. (2017). Correlating Preparative Approaches with Electrochemical Performance of Fe₃O₄-MWNT Composites Used as Anodes in Li-Ion Batteries. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 6(6), 3122-3131. <https://doi.org/10.1149/2.0231706jss>
- Yang, X., Chen, Y., Zhang, C., Duan, G., & Jiang, S. (2023). Electrospun Carbon Nanofibers and their Reinforced Composites: Preparation, Modification, Applications, and Perspectives. *Composites Part B: Engineering*, 249(1), 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110386>
- Zulaicha, A. S., Saputra, I. S., Sari, I. P., & Annas, D. (2020). Sintesis dan Karakterisasi Modifikasi Mikropartikel Magnetit (Fe₃O₄) dalam Pemanfaatan Karat dengan Ekstrak Daun Ilalang (*Imperata cylindrica* L). *Jurnal Jejaring Matematika dan Sains*, 2(2), 51-55. <https://doi.org/10.36873/jjms.2020.v2.i2.405>