

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik terus meningkat seiring pertumbuhan populasi manusia, dan perkembangan teknologi. Asia menjadi wilayah dengan konsumsi penggunaan energi listrik terbesar yang diprediksi pada tahun 2040 mencapai 21.811,41 TWh. Peningkatan jumlah tersebut hampir 154% dibandingkan tahun 2020 (Zhang dkk., 2023). Pesatnya digitalisasi dengan pertumbuhan penggunaan Internet of Things (IoT) merupakan salah satu faktor peningkatan kebutuhan energi listrik. Pada tahun 2025, kebutuhan energi secara global untuk semikonduktor IoT diproyeksikan mencapai 35 EJ (9.722,22 TWh), dan jumlah devais IoT pada tahun 2030 mencapai 35 miliar (Das & Mao, 2020; Thiagarajan & Samundiswary, 2022). Sumber energi listrik pada IoT saat ini masih bergantung pada baterai, namun salah satu keterbatasan utama baterai adalah umur pemakaian hanya bertahan hingga 15 tahun, ketika arus keluaran berada pada rentang μW (Yuen dkk., 2007). Teknologi *energy harvester* dapat menjadi alternatif penghasil energi listrik berskala kecil dengan daya keluaran berkisar μW hingga mW (Elahi dkk., 2020). *Energy harvester* dapat mengumpulkan, menyimpan, dan mengubah energi yang terbuang di lingkungan sekitar menjadi energi listrik sehingga menunjang kemandirian energi teknologi IoT secara kontinu selama masa pemakaian teknologi tersebut (Odetoyan & Ede, 2021). Energi vibrasi menjadi alternatif sumber energi listrik yang dapat dikumpulkan melalui *energy harvester*. Ketersediaan energi vibrasi melimpah, dan tidak dipengaruhi kondisi alam, bahkan seringkali terbuang seperti vibrasi yang berasal dari aktivitas manusia, mesin, transportasi, bahkan vibrasi dari aktivitas alam (Lin dkk., 2023). Pengembangan teknologi hemat energi dan ramah lingkungan terus dilakukan untuk mengurangi penggunaan bahan bakar fosil. Ketangguhan energi di masa depan dapat diupayakan dengan pengembangan teknologi keberlanjutan dengan sumber energi yang seringkali terbuang dilingkungan.

Energi vibrasi dapat diubah menjadi energi listrik melalui *energy harvesting* menggunakan beberapa metode induksi energi listrik di antaranya induksi elektromagnetik (Carneiro dkk., 2020), piezoelektrik (Zhou dkk., 2022), dan triboelektrik (Li dkk., 2020). *Electromagnetic vibration energy harvester* (EVEH) dapat mengubah energi vibrasi menjadi energi listrik melalui prinsip elektromagnetik. EVEH secara konvensional tersusun atas magnet induksi, koil, dan kutub magnet di ujung kontainer. Pada EVEH, energi listrik dihasilkan berdasarkan prinsip hukum Faraday dengan memanfaatkan perubahan fluks magnetik akibat gerak relatif antara magnet induksi dan koil sehingga menghasilkan tegangan (Zhang dkk., 2024). Salah satu keunggulan EVEH dibandingkan dengan tipe *energy harvester* lainnya yaitu dapat menghasilkan arus keluaran tinggi karena resistansi internal yang kecil, namun masalah yang muncul adalah panas berlebih akibat *coil losses* (Barua & Salauddin Rasel, 2024). Selain itu, EVEH tidak efisien pada frekuensi rendah (Khalid dkk., 2019).

Kinerja EVEH dapat ditingkatkan melalui aplikasi ferrofluida sebagai pengganti magnet induksi atau pelumas magnet. Ferrofluida tersusun atas nanopartikel magnetik yang dilapisi surfaktan, dan terdispersi dalam *carrier fluid* yang umumnya adalah pelarut organik atau air (Asokan dkk., 2019). Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengkaji aplikasi ferrofluida untuk meningkatkan kinerja EVEH. Pada riset Kim (2015), EVEH berbasis ferrofluida sebagai pengganti magnet induksi dengan media dispersi minyak hidrokarbon dengan magnetisasi saturasi 421,2 G, dapat menghasilkan ggl sebesar 4-7 mV pada frekuensi vibrasi 3-5 Hz. Konfigurasi EVEH berbasis ferrofluida dengan arah koil dan arah magnetisasi sejajar terhadap arah gerak ferrofluida menghasilkan kinerja optimal, dilakukan dalam riset Alazemi dkk. (2015) menghasilkan tegangan 16 mV/g pada frekuensi 1,9 Hz. Ferrofluida berbasis air sebagai media dispersi, digunakan pada EVEH memanfaatkan pipet kapilar pada riset Hannon dkk. (2023) dengan aliran ferrofluida didalamnya sebagai pengganti magnet induksi, memperoleh tegangan keluaran mencapai 1,1 mV pada frekuensi 30 Hz. *Hybrid energy harvester* di fabrikasi oleh Seol dkk. (2017) merupakan kombinasi mekanisme induksi triboelektrik dan elektromagnetik berbasis ferrofluida dengan magnetisasi saturasi 9 – 11 mT, memperoleh tegangan keluaran dan arus

keluaran pada komponen elektromagnetik masing-masing sebesar 1,8 mV dan 2,5 μ A. Dibandingkan dengan EVEH konvensional yang dapat menghasilkan tegangan mencapai 0,8 – 3,4 Volt pada frekuensi 5 – 10 Hz, performa EVEH berbasis ferrofluida sebagai pengganti magnet induksi masih lebih rendah dibandingkan yang konvensional. Meskipun begitu, penggunaan ferrofluida pada EVEH untuk induksi arus listrik menunjang miniaturisasi teknologi IoT dengan sumber energi listrik melalui EVEH dengan tegangan keluaran pada skala mV (Kulandaivel dkk., 2023). Penggunaan lain ferrofluida pada EVEH dapat digunakan sebagai pelumas magnet induksi untuk stabilisasi gerak magnet sehingga memperoleh daya, arus, ataupun tegangan lebih tinggi dibandingkan EVEH konvensional. Pelumas ferrofluida berbasis kerosin diaplikasikan pada EVEH dalam riset Wang & Li (2015) diuji pada vibrasi dari gerak manusia menghasilkan tegangan mencapai 2,5 V. Sedangkan melalui vibrasi gerak berjalan kaki dan berlari manusia pada EVEH dengan pelumas ferrofluida dalam riset Wang dkk. (2018), menghasilkan daya masing-masing 1,3 mW dan 7,5 mW. Desain EVEH berbentuk persegi dengan 5 koil, dan tumpukan magnet induksi diberi pelumas ferrofluida dalam riset Porobic & Gontean (2019) menghasilkan tegangan 820 mV, nilai tersebut lebih tinggi 132% dibandingkan EVEH tanpa pelumas dikarenakan gesekan antara magnet dan dinding kontainer dapat direduksi dengan adanya ferrofluida. Penggunaan ferrofluida sebagai pelumas pada EVEH dapat mereduksi gesekan sehingga kinerja EVEH meningkat. Selain pada bidang energi, ferrofluida dapat dimanfaatkan untuk transfer panas. Ferrofluida yang digunakan pada pendingin otomatis dapat meningkatkan efisiensi pendinginan, dan transfer panas ferrofluida dapat dikontrol melalui medan magnet eksternal (Phor & Kumar, 2019). Sifat termal ferrofluida tersebut menjadi solusi untuk mereduksi panas berlebih pada EVEH akibat *coil losses*.

Sifat magnet ferrofluida menjadi faktor penting pada aplikasi EVEH untuk menghasilkan perubahan fluks magnetik, dan sebagai pelumas yang dapat melapisi magnet dengan baik. Berdasarkan komponen utamanya, sifat magnet bergantung pada nanopartikel yang terdispersi. Partikel magnetit (Fe_3O_4) umum digunakan pada ferrofluida, karena memiliki sifat magnet yang unggul dibandingkan fasa kristalit besi oksida lainnya, dengan struktur *cubic inverse spinel* (Wu dkk., 2015).

Sulissetiawati, 2024

SINTESIS DAN KAJIAN STABILITAS FERROFLUIDA Fe_3O_4 SERTA POTENSI APLIKASINYA PADA ELECTROMAGNETIC VIBRATION ENERGY HARVESTER

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

Dengan struktur kristal Fe_3O_4 tersebut, sifat magnet Fe_3O_4 adalah ferrimagnetik (Nguyen dkk., 2021). Sifat magnet Fe_3O_4 mengalami transisi menjadi superparamagnetik ketika ukuran direduksi hingga ukuran 10 nm (Wallyn dkk., 2019). Nilai magnetisasi remanen (M_r), dan medan koersivitas (H_c) pada nanopartikel dengan sifat superparamagnetik sangat kecil, artinya nanopartikel memiliki respon yang kuat terhadap medan magnet eksternal yaitu ketika medan magnet eksternal nol seketika magnetisasi juga hilang (Kolhatkar dkk., 2013). Nanopartikel Fe_3O_4 dengan dispersi tunggal, idealnya dapat memiliki magnetisasi saturasi (M_s) mencapai 80 emu/g (92% material bulk Fe_3O_4) (Kemp dkk., 2016). Pada ferrofluida ideal, ukuran nanopartikel berkisar pada 5-10 nm untuk memperoleh suspensi yang tidak mengendap dalam jangka panjang (Joseph & Mathew, 2014; López-López dkk., 2012). Namun, pada ferrofluida konvensional ukuran nanopartikel 15-40 nm masih dapat dipertimbangkan (Genc & Derin, 2014). Nanopartikel Fe_3O_4 dapat disintesis melalui berbagai metode diantaranya adalah kopresipitasi (Fadli dkk., 2019), *ball milling* (Erwin dkk., 2020), dekomposisi termal (Vuong dkk., 2015), hidrotermal (Liu dkk., 2015), dan sol-gel (Lemine dkk., 2012). Metode kopresipitasi umum digunakan dengan efisiensi yang tinggi, kemampuan produksi skala besar, dan kondisi reaksi yang ramah lingkungan (Ahn dkk., 2012).

Kestabilan ferrofluida dari tarikan gravitasi atau magnet, dan evaporasi akibat panas berlebih menjadi faktor yang perlu dipertimbangkan untuk reliabilitas EVEH (Van Silfhout dkk., 2020). Surfaktan berperan penting untuk stabilisasi nanopartikel melalui tolakan sterik, atau elektrostatik untuk mengimbangi gaya tarik antar nanopartikel yaitu gaya van der Waals, dan tarikan dipol-dipol (Oehlsen dkk., 2022; Scherer & Neto, 2005). Pengujian kestabilan dapat dilakukan melalui pengamatan visual, zeta potensial, absorbansi ataupun transmisi spektrum UV-Vis. Ferrofluida $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ yang dilapisi asam oleat dengan variasi media dispersi diantaranya minyak paraffin, minyak motor, dan minyak bunga matahari dikaji kestabilannya melalui pengamatan visual, diperoleh bahwa ferrofluida berbasis minyak motor menunjukkan kestabilan paling baik selama 180 hari (Imran dkk., 2018). Riset kajian kestabilan lainnya dengan media dispersi lainnya diantaranya *chloroform*, *n-hexane*, kerosin, dan air untuk ferrofluida dari nanopartikel

Sulissetiawati, 2024

SINTESIS DAN KAJIAN STABILITAS FERROFLUIDA Fe_3O_4 SERTA POTENSI APLIKASINYA PADA ELECTROMAGNETIC VIBRATION ENERGY HARVESTER

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

$Fe_3O_4/graphene$ dilapisi asam oleat, melalui pengukuran absorbansi spektrum UV-Vis menunjukkan ferrofluida dengan media kerosin paling stabil selama 5 bulan (Askari dkk., 2016). Penelitian lainnya melalui pengukuran transmisi UV-Vis pada ferrofluida Fe_3O_4 dilapisi natrium oleat dan PEG dengan media dispersi air menunjukkan peningkatan transmisi mencapai 90% dalam waktu 120 menit, mengindikasikan stabilitas rendah dari ferrofluida (Chen dkk., 2016). Dalam riset Lei dkk. (2022) menemukan bahwa pada ferrofluida Fe_3O_4 dilapisi Tetramethylammonium hydroxide (TMAH) memiliki kestabilan lebih dari 120 menit ketika rasio massa Fe_3O_4 dan TMAH adalah 1:4. Penggunaan media berbasis minyak menunjukkan stabilitas yang baik. Kerosin sebagai media dispersi menunjukkan stabilitas selama 5 bulan. Selain itu melalui riset Yu dkk. (2022) menemukan bahwa laju evaporasi ferrofluida berbasis kerosin yang rendah bahkan jika dibandingkan dengan kerosin murni. Sehingga penggunaan ferrofluida berbasis kerosin tepat untuk aplikasi EVEH yang memiliki masalah panas yang berlebih akibat coil losses.

Berbagai penelitian mengenai ferrofluida Fe_3O_4 menunjukkan hasil yang baik melalui penggunaan asam oleat sebagai surfaktan pada media kerosin. Komposisi ferrofluida menjadi hal yang berpengaruh dalam memperoleh stabilitas yang baik. Meskipun begitu, masih sedikit literatur mengenai kajian komposisi ferrofluida terhadap stabilitas ferrofluida, maka penelitian ini berfokus memperoleh ferrofluida stabil berbasis kerosin dari nanopartikel Fe_3O_4 disintesis melalui metode kopresipitasi melalui optimalisasi rasio Fe_3O_4 -asam oleat. Selain itu dikaji potensi aplikasi ferrofluida sebagai pelumas pada *Electromagnetic Vibration Energy Harvester* (EVEH).

1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang yang telah dipaparkan sebelumnya, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik nanopartikel Fe_3O_4 yang telah berhasil disintesis dengan metode kopresipitasi?
2. Bagaimana pengaruh rasio Fe_3O_4 dengan asam oleat terhadap stabilitas ferrofluida nanopartikel Fe_3O_4 ?

3. Bagaimana performa *Electromagnetic Vibration Energy Harvester* (EVEH) yang diaplikasikan ferrofluida sebagai pelumas?

1.3 Batasan Masalah

Berdasarkan rumusan masalah, penulis memberikan batasan ruang lingkup dari penelitian yang dilakukan. Karakteristik nanopartikel yang dikaji terdiri dari struktur kristal melalui *X-Ray Diffraction* (XRD), morfologi dan kandungan elemen dalam sampel melalui *Scanning Electron Microscope* (SEM) dilengkapi dengan *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (EDS), ukuran hidrodinamik partikel melalui *Particle Size Analyzer* (PSA), dan sifat magnet melalui *Vibrating Sample Magnetometer* (VSM).

Kajian kestabilan ferrofluida melalui pengaruh rasio nanopartikel Fe_3O_4 terhadap asam oleat dengan rasio di antara lain 1:1, 1,25:1, 1,5:1, dan 1,75:1. Stabilitas ferrofluida dikaji melalui pengamatan visual, dan analisis data absorbansi selama rentang waktu 29 hari. Selain itu, keberhasilan pelapisan asam oleat pada nanopartikel dianalisis melalui karakterisasi gugus fungsi dengan *Fourier-Transform Infrared Spectrometer* (FTIR).

Ferrofluida yang diaplikasikan pada *Electromagnetic Vibration Energy Harvester* (EVEH) sebagai pelumas dari magnet induksi. Kinerja EVEH yang diaplikasikan ferrofluida dievaluasi berdasarkan kestabilan gerak magnet, dan daya, tegangan, dan arus yang dihasilkan EVEH pada frekuensi vibrasi 20 Hz.

1.4 Tujuan Penelitian

Pada penelitian ini bertujuan untuk memperoleh hal-hal sebagai berikut:

1. Memperoleh karakteristik nanopartikel magnetik Fe_3O_4 yang telah berhasil disintesis dengan metode kopresipitasi.
2. Memperoleh gambaran pengaruh rasio nanopartikel Fe_3O_4 dengan asam oleat terhadap stabilitas ferrofluida.
3. Memperoleh gambaran performa EVEH yang diaplikasikan ferrofluida sebagai pelumas.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari dilaksanakannya penelitian ini adalah untuk memberikan kontribusi terhadap perkembangan nanoteknologi terutama dalam hal sintesis nanopartikel Fe_3O_4 dan ferrofluida beserta perkembangan dan potensi aplikasinya. Ferrofluida nanomagnetik dengan stabilitas yang baik, diharapkan dapat dimanfaatkan pada *energy harvester* sebagai alternatif sumber energi listrik pada IoT dengan memanfaatkan vibrasi di lingkungan sekitar.

1.6 Struktur Penulisan Skripsi

Penulisan skripsi disusun secara sistematis terbagi dalam lima bab yaitu Bab I Pendahuluan, Bab II Tinjauan Pustaka, Bab III Metode Penelitian, Bab IV Hasil dan Pembahasan, dan Bab V Simpulan dan Rekomendasi. Bab I Pendahuluan terdiri atas pemaparan latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan struktur penulisan skripsi. Bab II Tinjauan Pustaka berisi penjelasan mengenai sifat magnet material, *electromagnetic vibration energi harvester* (EVEH), nanopartikel Fe_3O_4 (magnetit), ferrofluida nanopartikel magnetik. Bab III Metode Penelitian memaparkan waktu dan tempat penelitian, desain penelitian, dan prosedur penelitian. Bab IV Hasil dan Pembahasan memaparkan serta menjelaskan mengenai keseluruhan data yang diperoleh pada penelitian meliputi karakteristik nanopartikel Fe_3O_4 , pengaruh rasio Fe_3O_4 -asam oleat terhadap kestabilan ferrofluida, dan performa EVEH dengan ferrofluida sebagai pelumas. Bab V Simpulan, Implikasi, dan Rekomendasi meliputi pemaparan kesimpulan keseluruhan penelitian yang telah dilakukan, implikasi penelitian, dan rekomendasi penelitian mendatang yang dapat dilakukan untuk pengembangan ferrofluida nanopartikel Fe_3O_4 .