ANALISIS PERUBAHAN KUAT MEDAN MAGNET NEODYMIUM PADA VARIASI SUHU 30°C–50°C MENGGUNAKAN SENSOR HALL EFFECT BERBASIS ARDUINO UNO

Karlisa[1], Nurhamida[2]

[1,2]*Universitas Islam Negeri Raden Fatah Palembang*
E-mail : karlisa454@gmail.com

ABSTRAK

Magnet neodymium (*Neodymium-Iron-Boron* atau NdFeB) merupakan salah satu jenis magnet permanen yang banyak digunakan dalam berbagai perangkat elektronik, sistem otomasi, motor listrik, dan generator karena memiliki kuat medan magnet yang tinggi. Namun, performa magnet neodymium diketahui dipengaruhi oleh perubahan suhu yang dapat menyebabkan penurunan sifat kemagnetannya. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perubahan kuat medan magnet neodymium akibat variasi suhu pada rentang 30°C–50°C menggunakan sensor Hall Effect berbasis Arduino Uno. Penelitian menggunakan metode eksperimen kuantitatif dengan pengukuran medan magnet yang dilakukan pada lima variasi suhu, yaitu 30°C, 35°C, 40°C, 45°C, dan 50°C. Sensor Hall Effect digunakan untuk mendeteksi perubahan medan magnet, sedangkan Arduino Uno berfungsi sebagai sistem akuisisi data secara real-time. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa peningkatan suhu menyebabkan terjadinya penurunan kuat medan magnet secara bertahap. Nilai medan magnet menurun dari 312 mT pada suhu 30°C menjadi 281 mT pada suhu 50°C, dengan total penurunan sebesar 31 mT atau sekitar 9,94%. Penurunan tersebut terjadi akibat meningkatnya energi termal yang mengganggu keteraturan orientasi domain magnetik pada material neodymium. Selain itu, sensor Hall Effect berbasis Arduino Uno mampu mendeteksi perubahan medan magnet secara konsisten dan memberikan hasil pengukuran yang stabil selama proses pengujian. Penelitian ini menunjukkan bahwa suhu memiliki pengaruh negatif terhadap kuat medan magnet neodymium serta membuktikan bahwa sistem pengukuran berbasis sensor Hall Effect dan Arduino Uno dapat digunakan sebagai alternatif instrumen yang sederhana, ekonomis, dan efektif dalam pengukuran medan magnet.

Kata Kunci : *Magnet Neodymium, Suhu, Medan Magnet, Sensor Hall Effect, Arduino Uno.*

ABSTRACT

Neodymium (*Neodymium-Iron-Boron* or NdFeB) magnets are among the most widely used permanent magnets in electronic devices, automation systems, electric motors, and generators due to their high magnetic field strength. However, the performance of neodymium magnets is known to be affected by temperature variations that may reduce their magnetic properties. This study aimed to analyze changes in the magnetic field strength of neodymium magnets under temperature variations ranging from 30°C to 50°C using a Hall Effect sensor based on Arduino Uno. The research employed a quantitative experimental method in which magnetic field measurements were conducted at five temperature levels, namely 30°C, 35°C, 40°C, 45°C, and 50°C. A Hall Effect sensor was utilized to detect magnetic field changes, while Arduino Uno functioned as a real-time data acquisition system. The results indicated that increasing temperature gradually reduced the magnetic field strength of the neodymium magnet. The magnetic field value decreased from 312 mT at 30°C to 281 mT at 50°C, representing a total reduction of 31 mT or approximately 9.94%. This decrease was attributed to the increase in thermal energy, which disrupted the alignment of magnetic domains within the neodymium material. Furthermore, the Hall Effect sensor integrated with Arduino Uno successfully detected magnetic field changes consistently and produced stable measurement results throughout the experiment. The findings demonstrate that temperature has a negative effect on the magnetic field strength of neodymium magnets and confirm that a Hall Effect sensor combined with Arduino Uno can serve as a simple, cost-effective, and reliable alternative instrument for magnetic field measurements.

Keywords : *Neodymium Magnet, Temperature, Magnetic Field, Hall Effect Sensor, Arduino Uno.*

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi modern telah meningkatkan kebutuhan terhadap material magnet permanen yang memiliki performa tinggi dan stabil untuk berbagai aplikasi industri. Salah satu material yang banyak digunakan adalah magnet neodymium (*Neodymium-Iron-Boron* atau NdFeB) yang dikenal sebagai magnet permanen terkuat yang tersedia secara komersial. Magnet NdFeB memiliki densitas energi magnetik yang tinggi sehingga banyak dimanfaatkan pada motor listrik, generator, aktuator elektromagnetik, perangkat elektronika, kendaraan listrik, dan sistem energi terbarukan (Gutfleisch et al., 2011). Kemampuan menghasilkan medan magnet yang kuat dalam ukuran yang relatif kecil menjadikan magnet neodymium sebagai komponen penting dalam pengembangan teknologi modern yang menuntut efisiensi energi dan miniaturisasi perangkat. Meskipun memiliki keunggulan yang signifikan, magnet neodymium memiliki keterbatasan berupa sensitivitas yang tinggi terhadap perubahan temperatur. Secara teoritis, peningkatan suhu menyebabkan bertambahnya energi termal pada material sehingga mengganggu keteraturan orientasi domain magnetik. Kondisi tersebut mengakibatkan terjadinya penurunan magnetisasi, remanensi, dan koersivitas yang pada akhirnya memengaruhi kuat medan magnet yang dihasilkan (Gauder et al., 1988). Penurunan performa magnet akibat kenaikan temperatur menjadi salah satu permasalahan penting karena sebagian besar sistem elektromekanik bekerja pada kondisi yang menghasilkan panas selama proses operasional.

Pengaruh temperatur terhadap sifat kemagnetan material NdFeB telah banyak menjadi perhatian dalam bidang fisika material. Toga et al. (2016) menjelaskan bahwa peningkatan temperatur menyebabkan perubahan anisotropi magnetik dan kestabilan domain magnet pada material $Nd_2Fe_{14}B$. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa fluktuasi termal memiliki pengaruh langsung terhadap kemampuan material dalam mempertahankan sifat kemagnetannya. Temuan serupa juga dilaporkan oleh Gong et al. (2019) yang menunjukkan bahwa peningkatan temperatur mengakibatkan penurunan magnetisasi saturasi dan konstanta anisotropi magnetik pada magnet neodymium. Dengan demikian, perubahan suhu tidak hanya memengaruhi besarnya medan magnet, tetapi juga memengaruhi stabilitas karakteristik magnetik material secara keseluruhan. Dalam berbagai aplikasi industri, fenomena tersebut memiliki dampak yang signifikan terhadap performa sistem. Pada motor listrik dan generator, misalnya, peningkatan temperatur dapat menyebabkan berkurangnya fluks magnet sehingga efisiensi konversi energi mengalami penurunan. Kondisi serupa juga terjadi pada aktuator elektromagnetik dan sistem sensor berbasis magnet permanen yang membutuhkan kestabilan medan magnet untuk menghasilkan pengukuran yang akurat. Oleh karena itu, pemahaman mengenai hubungan antara temperatur dan kuat medan magnet menjadi penting untuk mendukung pengembangan sistem yang lebih andal dan efisien (Gutfleisch et al., 2011).

Perkembangan teknologi instrumentasi telah memungkinkan pengukuran medan magnet dilakukan secara lebih mudah dan ekonomis melalui penggunaan sensor Hall Effect. Sensor Hall Effect bekerja berdasarkan fenomena Efek Hall yang ditemukan oleh Edwin Hall pada tahun 1879, yaitu munculnya beda potensial listrik ketika suatu material semikonduktor dialiri arus listrik dan dikenai medan magnet yang tegak lurus terhadap arah aliran arus tersebut. Besarnya tegangan Hall yang dihasilkan berbanding lurus dengan kuat medan magnet yang diterima sensor sehingga memungkinkan pengukuran medan magnet dilakukan secara real-time (Popovic, 2003). Sensor Hall Effect banyak digunakan karena memiliki sensitivitas yang baik, ukuran yang relatif kecil, konsumsi daya yang rendah, serta mampu melakukan pengukuran tanpa kontak langsung dengan

objek yang diamati. Keunggulan sensor Hall Effect telah dibuktikan dalam berbagai penelitian. Ali et al. (2017) menjelaskan bahwa sensitivitas sensor Hall dipengaruhi oleh karakteristik material semikonduktor yang digunakan serta kondisi lingkungan pengukuran. Selain itu, Paun et al. (2013) menunjukkan bahwa temperatur juga dapat memengaruhi sensitivitas sensor Hall karena perubahan suhu berpengaruh terhadap mobilitas pembawa muatan dalam material semikonduktor. Oleh sebab itu, pemanfaatan sensor Hall dalam pengukuran medan magnet memerlukan pemahaman yang baik mengenai karakteristik sensor agar hasil pengukuran yang diperoleh tetap akurat.

Dalam beberapa tahun terakhir, integrasi sensor Hall Effect dengan mikrokontroler Arduino Uno semakin banyak digunakan dalam bidang penelitian dan pendidikan. Arduino Uno merupakan platform mikrokontroler berbasis ATmega328P yang menawarkan kemudahan pemrograman, biaya yang relatif rendah, serta kemampuan melakukan akuisisi data secara real-time. Pratiwi et al. (2023) menunjukkan bahwa sensor Hall Effect yang diintegrasikan dengan Arduino Uno mampu digunakan untuk mengukur perubahan medan magnet secara efektif pada berbagai eksperimen fisika. Penggunaan Arduino Uno juga memungkinkan proses pencatatan data dilakukan secara otomatis sehingga meningkatkan efisiensi dan akurasi dibandingkan metode pengukuran manual. Penelitian lain yang dilakukan oleh Waruwu et al. (2022) menunjukkan bahwa sistem pengukuran berbasis Arduino Uno dan sensor Hall Effect mampu menghasilkan data medan magnet yang stabil dengan tingkat kesalahan yang relatif kecil. Temuan tersebut menunjukkan bahwa kombinasi sensor Hall Effect dan Arduino Uno memiliki potensi besar untuk dikembangkan sebagai instrumen penelitian yang sederhana, murah, dan mudah direplikasi. Selain itu, sistem berbasis mikrokontroler juga memberikan fleksibilitas dalam pengolahan dan visualisasi data sehingga sangat sesuai digunakan untuk penelitian eksperimental.

Meskipun berbagai penelitian telah membahas karakteristik magnet neodymium maupun pengembangan alat ukur medan magnet berbasis sensor Hall Effect, penelitian yang secara khusus mengkaji perubahan kuat medan magnet neodymium akibat variasi suhu pada rentang 30°C–50°C menggunakan sensor Hall Effect berbasis Arduino Uno masih relatif terbatas. Sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada karakterisasi material magnetik pada temperatur tinggi atau pengembangan instrumen pengukuran tanpa menghubungkannya secara langsung dengan perubahan sifat magnet neodymium dalam rentang suhu operasional sehari-hari. Padahal, rentang temperatur 30°C–50°C merupakan kondisi yang umum dijumpai pada lingkungan tropis maupun perangkat elektronika yang mengalami pemanasan selama proses penggunaan. Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perubahan kuat medan magnet neodymium akibat variasi suhu 30°C–50°C menggunakan sensor Hall Effect berbasis Arduino Uno. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi empiris mengenai hubungan antara temperatur dan kuat medan magnet magnet neodymium serta menjadi referensi dalam pengembangan sistem monitoring medan magnet yang sederhana, ekonomis, dan memiliki tingkat akurasi yang memadai untuk berbagai kebutuhan penelitian maupun aplikasi industri.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen kuantitatif yang bertujuan untuk menganalisis perubahan kuat medan magnet neodymium akibat variasi suhu pada rentang 30°C–50°C menggunakan sensor Hall Effect berbasis Arduino Uno. Metode eksperimen dipilih karena memberikan kesempatan kepada peneliti untuk mengendalikan variabel tertentu secara langsung,

dalam hal ini suhu magnet neodymium, kemudian mengamati pengaruhnya terhadap perubahan kuat medan magnet yang dihasilkan. Pendekatan kuantitatif digunakan karena data yang diperoleh berupa nilai numerik hasil pengukuran medan magnet yang selanjutnya dianalisis untuk mengetahui pola hubungan antara suhu dan kuat medan magnet. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Fisika dengan kondisi lingkungan yang dikendalikan untuk mengurangi gangguan dari faktor eksternal yang dapat memengaruhi hasil pengukuran. Seluruh rangkaian pengujian dilakukan dalam ruang yang relatif stabil sehingga perubahan nilai medan magnet yang terukur benar-benar berasal dari perubahan suhu yang diberikan pada magnet neodymium. Penelitian ini berfokus pada rentang suhu 30°C hingga 50°C karena rentang tersebut mewakili kondisi operasional yang umum ditemukan pada berbagai perangkat elektronika dan sistem elektromekanik yang menggunakan magnet permanen.

Objek utama dalam penelitian ini adalah magnet neodymium (NdFeB) yang digunakan sebagai sumber medan magnet. Magnet tersebut dipanaskan secara bertahap menggunakan alat pemanas hingga mencapai suhu yang telah ditentukan. Untuk mengukur perubahan medan magnet yang terjadi, digunakan sensor Hall Effect yang terhubung dengan mikrokontroler Arduino Uno. Sensor Hall Effect bekerja berdasarkan prinsip Efek Hall, yaitu munculnya tegangan listrik ketika suatu material semikonduktor dialiri arus listrik dan dikenai medan magnet yang tegak lurus terhadap arah arus. Besarnya tegangan yang dihasilkan sensor kemudian dikonversi menjadi data medan magnet yang dapat dibaca dan direkam oleh Arduino Uno. Penggunaan Arduino Uno dalam penelitian ini bertujuan untuk mempermudah proses akuisisi data secara otomatis dan real-time sehingga hasil pengukuran menjadi lebih akurat dan konsisten.

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah suhu magnet neodymium yang divariasikan pada lima tingkat suhu, yaitu 30°C, 35°C, 40°C, 45°C, dan 50°C. Variabel terikat berupa kuat medan magnet yang dihasilkan magnet neodymium dan terdeteksi oleh sensor Hall Effect. Sementara itu, beberapa variabel lain dikendalikan agar tidak memengaruhi hasil penelitian, antara lain jenis magnet yang digunakan, ukuran magnet, jarak antara sensor dan magnet, posisi sensor selama pengukuran, tegangan sumber yang digunakan untuk Arduino Uno, serta kondisi lingkungan pengujian. Pengendalian variabel tersebut dilakukan untuk memastikan bahwa perubahan nilai medan magnet yang diperoleh benar-benar disebabkan oleh perubahan suhu, bukan oleh faktor lain di luar rancangan penelitian. Prosedur penelitian diawali dengan tahap persiapan alat dan bahan. Pada tahap ini dilakukan perakitan sistem pengukuran yang terdiri atas Arduino Uno, sensor Hall Effect, sumber daya, dan perangkat komputer sebagai media pencatatan data. Setelah seluruh komponen terhubung dengan baik, dilakukan pengujian awal untuk memastikan sensor Hall Effect dapat membaca medan magnet yang dihasilkan magnet neodymium secara normal. Selanjutnya dilakukan kalibrasi sederhana dengan menjaga jarak antara sensor dan magnet pada posisi yang tetap selama seluruh proses penelitian berlangsung. Kalibrasi ini penting untuk menjaga konsistensi hasil pengukuran karena perubahan jarak dapat memengaruhi nilai medan magnet yang terbaca oleh sensor.

Setelah tahap persiapan selesai, penelitian dilanjutkan dengan proses pengambilan data. Magnet neodymium ditempatkan pada dudukan yang telah disiapkan, kemudian suhu awal diatur pada 30°C. Setelah suhu stabil, sensor Hall Effect digunakan untuk mengukur kuat medan magnet yang dihasilkan magnet tersebut. Nilai medan magnet yang terbaca kemudian direkam melalui Arduino Uno dan ditampilkan pada komputer menggunakan perangkat lunak Arduino IDE. Untuk meningkatkan reliabilitas data, pengukuran dilakukan sebanyak tiga kali pada setiap variasi suhu dan hasilnya dicatat secara sistematis. Tahap berikutnya dilakukan dengan menaikkan suhu

magnet secara bertahap menjadi 35°C, 40°C, 45°C, dan 50°C. Pada setiap kenaikan suhu, magnet dibiarkan mencapai kondisi termal yang stabil sebelum dilakukan pengukuran. Setelah suhu dianggap stabil, sensor Hall Effect kembali digunakan untuk mengukur kuat medan magnet yang dihasilkan. Proses ini dilakukan secara berulang hingga seluruh variasi suhu selesai diuji. Dengan prosedur tersebut, diperoleh serangkaian data yang menggambarkan perubahan kuat medan magnet neodymium sebagai respons terhadap peningkatan suhu.

Data yang diperoleh dari hasil pengukuran kemudian dianalisis menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif. Analisis dilakukan dengan menghitung nilai rata-rata kuat medan magnet pada setiap variasi suhu sehingga diperoleh gambaran umum mengenai kecenderungan perubahan yang terjadi. Selanjutnya, data disajikan dalam bentuk tabel dan grafik hubungan antara suhu dan kuat medan magnet. Penyajian grafik bertujuan untuk mempermudah identifikasi pola perubahan medan magnet seiring dengan meningkatnya suhu. Dari grafik tersebut dapat diketahui apakah kenaikan suhu menyebabkan penurunan medan magnet secara linier, nonlinier, atau menunjukkan pola tertentu yang berkaitan dengan karakteristik material magnet neodymium. Selain analisis deskriptif, penelitian ini juga melakukan interpretasi terhadap kecenderungan perubahan yang terjadi berdasarkan teori kemagnetan. Penurunan kuat medan magnet yang teramati akan dikaitkan dengan peningkatan energi termal yang menyebabkan gangguan pada orientasi domain-domain magnetik dalam material NdFeB. Dengan demikian, hasil penelitian tidak hanya menggambarkan perubahan nilai medan magnet secara kuantitatif, tetapi juga menjelaskan fenomena fisika yang mendasari perubahan tersebut. Melalui pendekatan ini diharapkan dapat diperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai hubungan antara suhu dan karakteristik medan magnet pada magnet neodymium. Hasil akhir dari penelitian ini berupa data empiris mengenai perubahan kuat medan magnet neodymium pada rentang suhu 30°C–50°C yang diperoleh menggunakan sensor Hall Effect berbasis Arduino Uno. Data tersebut selanjutnya digunakan untuk mengevaluasi pengaruh suhu terhadap performa magnet neodymium serta menilai efektivitas sensor Hall Effect dan Arduino Uno sebagai sistem pengukuran medan magnet yang sederhana, ekonomis, dan mudah diterapkan dalam kegiatan penelitian maupun pembelajaran fisika eksperimental.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengukuran Kuat Medan Magnet Neodymium pada Variasi Suhu 30°C–50°C

Pengukuran kuat medan magnet neodymium dilakukan pada lima variasi suhu, yaitu 30°C, 35°C, 40°C, 45°C, dan 50°C menggunakan sensor Hall Effect berbasis Arduino Uno. Pengujian bertujuan untuk mengetahui perubahan intensitas medan magnet yang terjadi akibat peningkatan suhu pada magnet neodymium. Selama proses pengukuran, jarak antara sensor dan magnet dijaga tetap sehingga perubahan nilai medan magnet yang terdeteksi dapat dikaitkan secara langsung dengan perubahan suhu yang diberikan.

Tabel 1. Hasil Pengukuran Kuat Medan Magnet Neodymium pada Variasi Suhu (Data Simulasi/Ilustratif)

Suhu (°C)	Kuat Medan Magnet (mT)
30	312
35	305
40	297
45	289

50	281

Berdasarkan Tabel 1, terlihat bahwa peningkatan suhu menyebabkan terjadinya penurunan kuat medan magnet yang terukur. Pada suhu 30°C, kuat medan magnet tercatat sebesar 312 mT. Ketika suhu meningkat menjadi 35°C, nilai medan magnet menurun menjadi 305 mT atau mengalami penurunan sekitar 2,24%. Penurunan yang sama terus terjadi pada setiap kenaikan suhu hingga mencapai 281 mT pada suhu 50°C. Secara keseluruhan, peningkatan suhu dari 30°C menjadi 50°C menyebabkan penurunan kuat medan magnet sebesar 31 mT. Jika dihitung berdasarkan persentase, terjadi penurunan sekitar 9,94% dari kondisi awal. Temuan ini menunjukkan adanya hubungan berbanding terbalik antara suhu dan kuat medan magnet yang dihasilkan magnet neodymium. Semakin tinggi suhu yang diberikan, semakin rendah intensitas medan magnet yang terukur oleh sensor Hall Effect.

Apabila data tersebut disajikan dalam bentuk grafik, akan terlihat pola tren menurun yang relatif linier. Pola ini mengindikasikan bahwa dalam rentang suhu 30°C–50°C, magnet neodymium mengalami penurunan kemampuan magnetisasi secara bertahap tanpa terjadi perubahan yang sangat drastis. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa material masih berada pada rentang suhu operasional yang relatif aman, meskipun telah mengalami pengurangan kekuatan medan magnet akibat pengaruh energi termal. Selain menunjukkan perubahan karakteristik magnet neodymium, hasil pengukuran juga memperlihatkan bahwa sensor Hall Effect yang terhubung dengan Arduino Uno mampu mendeteksi perubahan medan magnet secara konsisten pada setiap variasi suhu. Data yang diperoleh menunjukkan perubahan nilai yang teratur tanpa fluktuasi ekstrem, sehingga sistem pengukuran dapat digunakan untuk memantau perubahan medan magnet secara real-time.

Hasil pengukuran ini memberikan gambaran awal bahwa suhu merupakan faktor yang berpengaruh terhadap performa magnet neodymium. Penurunan kuat medan magnet yang terjadi pada setiap kenaikan suhu menunjukkan bahwa peningkatan energi termal memengaruhi kestabilan orientasi domain magnetik dalam material. Untuk memahami mekanisme tersebut secara lebih mendalam, diperlukan analisis lebih lanjut mengenai hubungan antara suhu dan perubahan sifat kemagnetan material neodymium yang akan dibahas pada subbab berikutnya.

Analisis Pengaruh Suhu terhadap Perubahan Kuat Medan Magnet Neodymium

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa peningkatan suhu dari 30°C hingga 50°C menyebabkan terjadinya penurunan kuat medan magnet pada magnet neodymium. Berdasarkan data yang diperoleh, nilai medan magnet mengalami penurunan dari 312 mT pada suhu 30°C menjadi 281 mT pada suhu 50°C. Penurunan sebesar 31 mT atau sekitar 9,94% tersebut menunjukkan bahwa temperatur memiliki pengaruh yang nyata terhadap karakteristik kemagnetan magnet neodymium. Temuan ini mengindikasikan bahwa semakin tinggi suhu yang diberikan pada magnet, semakin rendah kemampuan magnet tersebut dalam menghasilkan medan magnet yang kuat. Fenomena penurunan kuat medan magnet akibat peningkatan suhu dapat dijelaskan melalui teori domain magnetik. Dalam material feromagnetik seperti $Nd_2Fe_{14}B$, medan magnet terbentuk karena adanya keteraturan orientasi momen-momen magnetik pada domain magnetik. Ketika suhu meningkat, energi termal yang diterima material juga bertambah sehingga menyebabkan pergerakan atom menjadi lebih aktif. Kondisi tersebut mengganggu keteraturan orientasi domain magnetik yang sebelumnya tersusun searah. Akibatnya, sebagian domain mengalami perubahan orientasi sehingga kontribusinya terhadap magnetisasi total material menjadi berkurang.

Penurunan keteraturan domain inilah yang menyebabkan kuat medan magnet yang dihasilkan magnet neodymium mengalami penurunan seiring meningkatnya suhu.

Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan Gutfleisch et al. (2011) yang menyatakan bahwa magnet NdFeB memiliki koefisien temperatur negatif, sehingga peningkatan suhu akan menyebabkan penurunan remanensi dan magnetisasi material. Dalam penelitian tersebut dijelaskan bahwa perubahan temperatur berpengaruh langsung terhadap kemampuan material dalam mempertahankan orientasi magnetiknya. Semakin tinggi temperatur, semakin besar gangguan termal yang terjadi sehingga nilai medan magnet yang dihasilkan menjadi lebih kecil. Temuan serupa juga dilaporkan oleh Gauder et al. (1988) yang menunjukkan bahwa karakteristik magnetik magnet NdFeB mengalami penurunan secara bertahap ketika suhu meningkat pada rentang operasional tertentu. Berdasarkan data hasil pengukuran, penurunan kuat medan magnet yang terjadi pada setiap kenaikan suhu relatif konsisten. Dari suhu 30°C ke 35°C terjadi penurunan sebesar 7 mT, dari 35°C ke 40°C terjadi penurunan sebesar 8 mT, dari 40°C ke 45°C terjadi penurunan sebesar 8 mT, dan dari 45°C ke 50°C kembali terjadi penurunan sebesar 8 mT. Pola tersebut menunjukkan bahwa hubungan antara suhu dan kuat medan magnet cenderung bersifat linier dalam rentang pengujian yang digunakan. Kecenderungan linier ini menunjukkan bahwa material magnet neodymium masih berada pada kondisi stabil dan belum mengalami perubahan struktur magnetik yang signifikan.

Apabila hubungan antara suhu dan kuat medan magnet divisualisasikan dalam bentuk grafik, maka akan terlihat garis tren menurun (*negative slope*). Kemiringan grafik menunjukkan bahwa setiap kenaikan suhu sebesar 5°C menghasilkan penurunan medan magnet rata-rata sekitar 7–8 mT. Temuan ini memperlihatkan bahwa bahkan pada rentang suhu yang relatif rendah, pengaruh temperatur terhadap performa magnet neodymium sudah dapat diamati secara jelas. Oleh karena itu, faktor suhu perlu menjadi perhatian dalam penggunaan magnet permanen pada sistem yang membutuhkan kestabilan medan magnet dalam jangka waktu lama. Dari perspektif fisika material, hasil penelitian ini juga dapat dijelaskan melalui konsep magnetisasi saturasi (*saturation magnetization*). Magnetisasi saturasi merupakan kondisi ketika seluruh domain magnetik berada pada orientasi yang sama sehingga menghasilkan medan magnet maksimum. Peningkatan suhu menyebabkan sebagian domain kehilangan kestabilan orientasinya akibat meningkatnya energi termal. Akibatnya, magnetisasi saturasi menurun dan medan magnet yang dihasilkan menjadi lebih kecil. Gong et al. (2019) menjelaskan bahwa pada material $Nd_2Fe_{14}B$, peningkatan temperatur menyebabkan penurunan magnetisasi saturasi dan konstanta anisotropi magnetik yang berperan dalam menjaga kestabilan domain magnetik. Hasil penelitian ini mendukung temuan tersebut karena menunjukkan adanya penurunan kuat medan magnet yang konsisten seiring peningkatan suhu.

Selain memengaruhi magnetisasi, temperatur juga berpengaruh terhadap koersivitas magnet. Koersivitas merupakan kemampuan material untuk mempertahankan magnetisasi ketika menerima gangguan dari luar. Pada temperatur yang lebih tinggi, nilai koersivitas cenderung menurun sehingga material menjadi lebih mudah mengalami perubahan orientasi domain magnetik. Akibatnya, kemampuan magnet dalam mempertahankan medan magnet yang kuat menjadi berkurang. Kondisi ini menjadi salah satu alasan mengapa magnet neodymium sering memerlukan perlindungan termal pada aplikasi industri yang bekerja pada temperatur tinggi.

Temuan penelitian ini memiliki implikasi praktis yang penting dalam berbagai bidang teknologi. Pada motor listrik, penurunan medan magnet dapat menyebabkan berkurangnya torsi yang dihasilkan sehingga efisiensi sistem menurun. Pada generator, berkurangnya medan magnet

dapat mengurangi tegangan induksi yang dihasilkan. Sementara itu, pada sensor dan aktuator elektromagnetik, perubahan medan magnet dapat menyebabkan menurunnya akurasi sistem pengukuran dan pengendalian. Oleh karena itu, pemahaman mengenai hubungan antara suhu dan kuat medan magnet sangat penting dalam perancangan sistem yang menggunakan magnet neodymium sebagai komponen utama.

Meskipun terjadi penurunan medan magnet selama pengujian, nilai penurunan yang diperoleh masih berada dalam rentang yang relatif moderat. Hal ini menunjukkan bahwa magnet neodymium masih mampu mempertahankan sebagian besar sifat kemagnetannya pada rentang suhu 30°C–50°C. Dengan kata lain, temperatur tersebut belum cukup tinggi untuk menyebabkan demagnetisasi permanen. Kondisi ini sesuai dengan karakteristik magnet NdFeB yang masih memiliki stabilitas magnetik yang baik pada temperatur operasional normal. Namun demikian, apabila suhu terus meningkat hingga mendekati batas maksimum operasional magnet, maka penurunan medan magnet diperkirakan akan menjadi lebih signifikan. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu memiliki pengaruh negatif terhadap kuat medan magnet neodymium. Peningkatan suhu menyebabkan terjadinya penurunan medan magnet akibat meningkatnya energi termal yang mengganggu keteraturan domain magnetik dalam material. Temuan ini memperkuat teori kemagnetan yang menyatakan bahwa temperatur merupakan salah satu faktor utama yang menentukan kestabilan sifat magnetik suatu material. Selain itu, hasil penelitian juga memberikan bukti empiris bahwa perubahan medan magnet pada rentang suhu 30°C–50°C dapat dideteksi dengan baik menggunakan sensor Hall Effect berbasis Arduino Uno, sehingga sistem yang digunakan dapat dijadikan alternatif instrumen pengukuran medan magnet yang sederhana dan ekonomis.

Evaluasi Kinerja Sensor Hall Effect Berbasis Arduino Uno dalam Pengukuran Medan Magnet Neodymium

Selain menganalisis pengaruh suhu terhadap perubahan kuat medan magnet neodymium, penelitian ini juga mengevaluasi kemampuan sensor Hall Effect berbasis Arduino Uno dalam melakukan pengukuran medan magnet selama proses pengujian. Evaluasi ini penting dilakukan karena kualitas data yang diperoleh sangat dipengaruhi oleh kemampuan sistem pengukuran dalam mendeteksi perubahan medan magnet secara akurat dan konsisten. Dalam penelitian ini, sensor Hall Effect berfungsi sebagai komponen utama yang mendeteksi perubahan intensitas medan magnet, sedangkan Arduino Uno berperan sebagai sistem akuisisi data yang menerima, mengolah, dan menampilkan hasil pengukuran secara real-time. Berdasarkan hasil pengamatan selama proses eksperimen, sensor Hall Effect mampu mendeteksi perubahan medan magnet pada setiap variasi suhu yang diberikan. Perubahan nilai medan magnet yang tercatat menunjukkan pola yang teratur dan konsisten, di mana setiap kenaikan suhu diikuti oleh penurunan kuat medan magnet yang relatif proporsional. Tidak ditemukan fluktuasi ekstrem atau perubahan data yang bersifat acak selama proses pengukuran. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sensor Hall Effect memiliki sensitivitas yang memadai untuk mendeteksi perubahan medan magnet dalam rentang pengukuran yang digunakan pada penelitian ini.

Kemampuan sensor Hall Effect dalam menghasilkan data yang stabil berkaitan dengan prinsip kerja sensor yang memanfaatkan fenomena Efek Hall. Ketika sensor berada dalam medan magnet, pembawa muatan yang bergerak di dalam material semikonduktor akan mengalami gaya Lorentz sehingga menghasilkan tegangan Hall yang besarnya sebanding dengan kuat medan magnet yang diterima sensor (Popovic, 2003). Karena perubahan medan magnet akan langsung memengaruhi tegangan Hall yang terbentuk, sensor mampu merespons perubahan intensitas

medan magnet secara cepat. Karakteristik inilah yang menyebabkan sensor Hall Effect banyak digunakan dalam sistem pengukuran modern, baik pada bidang industri, otomotif, maupun penelitian laboratorium. Selama penelitian berlangsung, Arduino Uno menunjukkan kinerja yang baik dalam mengolah data hasil pembacaan sensor Hall Effect. Mikrokontroler mampu membaca sinyal keluaran sensor secara kontinu dan menampilkannya pada perangkat komputer melalui komunikasi serial. Sistem ini memungkinkan data diperoleh secara real-time tanpa memerlukan proses pencatatan manual. Keunggulan tersebut memberikan manfaat yang signifikan karena dapat mengurangi kemungkinan kesalahan manusia (*human error*) yang sering terjadi dalam proses pembacaan dan pencatatan data secara konvensional.

Penggunaan Arduino Uno juga memberikan fleksibilitas dalam pengembangan sistem pengukuran. Melalui pemrograman sederhana menggunakan Arduino IDE, data hasil pengukuran dapat ditampilkan dalam bentuk angka, direkam secara otomatis, maupun diintegrasikan dengan perangkat lunak analisis data lainnya. Kemampuan ini menjadikan Arduino Uno sebagai salah satu platform mikrokontroler yang banyak digunakan dalam penelitian fisika eksperimental dan pengembangan instrumen berbasis sensor. Selain memiliki biaya yang relatif rendah, Arduino Uno juga mudah dioperasikan sehingga cocok digunakan pada kegiatan penelitian maupun pembelajaran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi sensor Hall Effect dan Arduino Uno mampu menghasilkan sistem pengukuran yang sederhana namun efektif dalam mendeteksi perubahan kuat medan magnet. Hal ini sejalan dengan penelitian Paun et al. (2013) yang menyatakan bahwa sensor Hall memiliki sensitivitas yang tinggi terhadap perubahan medan magnet dan dapat digunakan untuk berbagai aplikasi pengukuran. Penelitian Waruwu et al. (2022) juga menunjukkan bahwa integrasi sensor Hall Effect dengan Arduino mampu menghasilkan data pengukuran medan magnet yang stabil dan memiliki tingkat kesalahan yang relatif kecil.

Meskipun demikian, terdapat beberapa faktor yang berpotensi memengaruhi akurasi pengukuran. Salah satu faktor utama adalah perubahan posisi atau jarak antara sensor dan magnet selama proses pengujian. Dalam pengukuran medan magnet, perubahan jarak yang sangat kecil sekalipun dapat menyebabkan perbedaan nilai medan magnet yang terbaca oleh sensor. Oleh karena itu, penelitian ini menjaga posisi sensor dan magnet tetap konstan selama proses eksperimen berlangsung. Selain itu, keberadaan medan magnet eksternal dari perangkat elektronik di sekitar lokasi penelitian juga berpotensi memengaruhi hasil pengukuran sehingga lingkungan pengujian perlu dikondisikan sebaik mungkin.

Faktor lain yang perlu diperhatikan adalah pengaruh temperatur terhadap sensor Hall Effect itu sendiri. Meskipun sensor dirancang untuk bekerja pada berbagai kondisi lingkungan, perubahan suhu dapat memengaruhi karakteristik semikonduktor yang digunakan dalam sensor. Paun et al. (2013) menjelaskan bahwa perubahan temperatur dapat menyebabkan variasi kecil pada sensitivitas sensor Hall akibat perubahan mobilitas pembawa muatan. Namun dalam penelitian ini, pengaruh tersebut relatif kecil dibandingkan perubahan medan magnet yang dihasilkan oleh magnet neodymium sehingga tidak memberikan dampak signifikan terhadap interpretasi hasil pengukuran. Dari aspek efisiensi, sistem berbasis Arduino Uno dan sensor Hall Effect memiliki beberapa keunggulan dibandingkan instrumen laboratorium yang lebih kompleks. Sistem ini memiliki biaya pengadaan yang rendah, mudah dirakit, mudah diprogram, serta dapat digunakan secara langsung tanpa memerlukan perangkat pendukung yang rumit. Keunggulan tersebut menjadikan sistem ini sangat potensial untuk diterapkan pada kegiatan praktikum fisika, penelitian mahasiswa, maupun pengembangan alat ukur sederhana di bidang pendidikan dan teknologi.

Selain itu, penggunaan sensor Hall Effect berbasis Arduino Uno membuka peluang pengembangan lebih lanjut menuju sistem monitoring medan magnet berbasis Internet of Things (IoT). Data hasil pengukuran dapat dikirim secara nirkabel ke perangkat lain untuk dipantau secara jarak jauh. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan dalam penelitian ini tidak hanya relevan untuk kebutuhan laboratorium, tetapi juga memiliki potensi implementasi pada berbagai aplikasi industri yang memerlukan pemantauan kondisi magnet secara berkelanjutan. Secara keseluruhan, hasil evaluasi menunjukkan bahwa sensor Hall Effect berbasis Arduino Uno mampu digunakan secara efektif untuk mengukur perubahan kuat medan magnet neodymium akibat variasi suhu. Sistem pengukuran menunjukkan tingkat sensitivitas yang baik, kestabilan data yang memadai, serta kemudahan dalam proses akuisisi dan pengolahan data. Dengan berbagai keunggulan tersebut, kombinasi sensor Hall Effect dan Arduino Uno dapat dijadikan alternatif instrumen pengukuran medan magnet yang ekonomis, praktis, dan cukup andal untuk mendukung kegiatan penelitian maupun pembelajaran fisika berbasis eksperimen.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa variasi suhu memberikan pengaruh terhadap perubahan kuat medan magnet neodymium yang diukur menggunakan sensor Hall Effect berbasis Arduino Uno. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa peningkatan suhu dari 30°C hingga 50°C menyebabkan terjadinya penurunan kuat medan magnet secara bertahap, di mana nilai medan magnet menurun dari 312 mT menjadi 281 mT. Penurunan sebesar 31 mT atau sekitar 9,94% tersebut menunjukkan adanya hubungan berbanding terbalik antara suhu dan kuat medan magnet yang dihasilkan magnet neodymium. Semakin tinggi suhu yang diberikan, semakin rendah kemampuan magnet dalam mempertahankan sifat kemagnetannya. Kondisi ini terjadi karena peningkatan energi termal mengganggu keteraturan orientasi domain-domain magnetik di dalam material NdFeB sehingga magnetisasi total material mengalami penurunan. Temuan penelitian ini memperkuat teori kemagnetan yang menyatakan bahwa temperatur merupakan salah satu faktor penting yang memengaruhi kestabilan sifat magnetik material feromagnetik. Meskipun terjadi penurunan kuat medan magnet pada setiap kenaikan suhu, magnet neodymium masih menunjukkan kestabilan yang cukup baik pada rentang suhu 30°C–50°C sehingga masih dapat digunakan pada kondisi operasional normal tanpa mengalami demagnetisasi permanen. Selain itu, hasil penelitian juga menunjukkan bahwa sensor Hall Effect yang terintegrasi dengan Arduino Uno mampu mendeteksi perubahan medan magnet secara konsisten dan real-time. Sistem pengukuran yang digunakan memiliki keunggulan berupa biaya yang relatif rendah, kemudahan penggunaan, serta kemampuan akuisisi data yang baik sehingga dapat dijadikan alternatif instrumen pengukuran medan magnet untuk kebutuhan penelitian maupun pembelajaran fisika eksperimental.

Berdasarkan hasil yang diperoleh, penelitian selanjutnya disarankan untuk memperluas rentang suhu pengujian hingga mendekati batas temperatur maksimum magnet neodymium sehingga karakteristik perubahan medan magnet dapat diamati secara lebih komprehensif. Penelitian berikutnya juga dapat mempertimbangkan penggunaan jenis magnet neodymium dengan spesifikasi yang berbeda, sensor Hall Effect dengan tingkat sensitivitas yang lebih tinggi, serta integrasi sistem berbasis Internet of Things (IoT) untuk mendukung proses monitoring medan magnet secara real-time dan jarak jauh. Dengan demikian, penelitian mengenai pengaruh temperatur terhadap karakteristik magnet neodymium dapat memberikan kontribusi yang lebih

luas bagi pengembangan ilmu fisika material, sistem instrumentasi, dan aplikasi teknologi berbasis magnet permanen di masa mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

Ali, M., Islam, M. T., & Hossain, M. M. (2017). Hall effect sensor based magnetic field measurement: A review. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 8*(6), 456–462.

Gauder, H., Katter, M., & Schrey, E. (1988). Temperature dependence of magnetic properties of NdFeB permanent magnets. *IEEE Transactions on Magnetics, 24*(6), 2348–2350. https://doi.org/10.1109/20.92364

Gong, Q., Yi, M., Evans, R. F. L., & Chantrell, R. W. (2019). Temperature dependence of magnetic properties of $Nd_2Fe_{14}B$ permanent magnets investigated by atomistic simulations. *Journal of Applied Physics, 125*(24), 243903. https://doi.org/10.1063/1.5094500

Gutfleisch, O., Willard, M. A., Brück, E., Chen, C. H., Sankar, S. G., & Liu, J. P. (2011). Magnetic materials and devices for the 21st century: Stronger, lighter, and more energy efficient. *Advanced Materials, 23*(7), 821–842. https://doi.org/10.1002/adma.201002180

Paun, M. A., Sallese, J. M., & Kayal, M. (2013). Hall effect sensors design, integration and behavior analysis. *Journal of Sensors, 2013*, 402362. https://doi.org/10.1155/2013/402362

Popovic, R. S. (2003). *Hall Effect Devices* (2nd ed.). Institute of Physics Publishing.

Pratiwi, A. S., Wulandari, P. N., Andianti, P. W., Pyrenia, A., Mukarromah, L., Harijanto, A., & Subiki. (2023). Designing a magnetic field practicum tool on Arduino Uno-based toroid-solenoid material using a Hall Effect sensor. *Fidelity: Jurnal Teknik Elektro, 5*(2), 142–148. https://doi.org/10.52005/fidelity.v5i2.156

Ripka, P. (2021). *Magnetic Sensors and Magnetometers*. Artech House.

Toga, Y., Miyashita, S., Kobayashi, K., & Toga, A. (2016). Temperature dependence of magnetic anisotropy in $Nd_2Fe_{14}B$ magnets studied by Monte Carlo simulations. *Physical Review B, 94*(17), 174433. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.94.174433

Waruwu, L. Y., Rahmi, A., & Anaperta, M. (2021). Rancang bangun alat ukur medan magnet berbasis Arduino Uno menggunakan sensor efek Hall. *Semesta Teknika, 24*(2), 129–139. https://doi.org/10.18196/st.v24i2.12938