



Analisis Medan Magnet Di Luar Sumbu Solenoida Dengan Sensor Efek Hall SS49E 3 Dimensi

Saparullah^{1*}, Hana Indah Pertiwi Arimi², Resti Ayu Ningrum³

^{1,3}Program Studi Teknik Listrik Dan Instalasi, Akademi Komunitas Industri Manufaktur Bantaeng, Indonesia

²Program Studi Fisika, Universitas Negeri Yogyakarta, Indonesia

*Email : saparullah@akom-bantaeng.ac.id

Abstract: This study analyzes the distribution of the magnetic field outside a solenoid using an experimental and theoretical approach with the Hall effect sensor SS49E, amplified by the IC LM358. Measurements were conducted in three dimensions to characterize the magnetic field along the solenoid. The experimental results indicate that the magnetic field distribution is non-uniform, with the highest intensity near the solenoid's ends and a minimum value at its center. Empirical data were compared with a theoretical model based on Biot-Savart's law, showing a 98% correlation, which indicates the accuracy of the measurement method used. This research provides additional insights into the magnetic field outside solenoids and it can be an excellent school project for undergraduate students.

Keywords: magnetic field, solenoid, Hall effect, Biot-Savart law.

1. PENDAHULUAN

Konsep elektromagnetik tidak dapat memisahkan medan magnet dengan arus listrik. Berbeda dengan medan listrik yang dapat muncul baik dalam keadaan statis maupun dinamis, medan magnet hanya muncul akibat pergerakan muatan listrik atau arus listrik. Oleh karena itu, semua perangkat elektronik yang dialiri listrik akan menghasilkan medan magnet, meskipun dalam skala yang kecil.

Penelitian mengenai medan magnet telah banyak dilakukan, terutama pada solenoida. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa medan magnet pada solenoida tidak seragam dan bergantung pada posisi pengukuran. Penelitian sebelumnya menunjukkan medan magnet pada solenoida semakin kecil ketika titik pengukuran semakin jauh dari pusat solenoida (Anggoro & Santosa, 2015; Young et al., 2011). Studi lain oleh Roy (2015) menyatakan bahwa medan magnet di luar solenoida dengan panjang tak terhingga bernilai nol, sedangkan pada solenoida dengan panjang terbatas, medan magnet tetap ada di luar solenoida dan bergantung pada panjangnya (Roy, 2015).

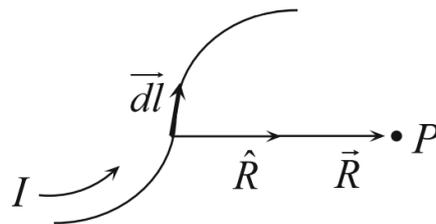
Sebagai besaran vektor, medan magnet memiliki nilai dan arah yang bergantung pada dimensi ruang. Namun, analisis medan magnet di luar solenoida dalam tiga dimensi masih belum banyak dilakukan. Penelitian sebelumnya hanya mengukur medan magnet di dalam solenoida menggunakan sensor efek Hall dalam konfigurasi satu dimensi (Ebrahimi et al., 2018). Pada penelitian ini, distribusi medan magnet di luar solenoida dalam tiga dimensi diukur menggunakan sensor efek Hall SS49E yang diperkuat dengan

IC LM358 (Putranto et al., 2021; Ridhoi et al., 2021). Pengukuran tiga dimensi penting dilakukan untuk menunjukkan kesesuaian teori dengan hasil pengukuran. Hasil pengukuran kemudian dibandingkan dengan data model berdasarkan hukum Biot-Savart tentang medan magnet di sekitar kawat berarus.

Jean Baptiste Biot dan Felix Savart menjelaskan hubungan medan magnet yang timbul di sekitar kawat berarus yang dikenal dengan persamaan Biot-Savart. Gambar 2.2 menunjukkan arus I yang mengalir sepanjang kawat sembarang \vec{dl} . Arus tersebut menghasilkan medan magnet di titik P sebesar

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{\vec{dl} \times \hat{R}}{R^2} \quad (1)$$

dimana $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{N}{A^2}$ dan $\hat{r} = \vec{r}/r$ adalah vektor satuan ke arah \vec{r} .



Gambar 1. Medan Magnet di Titik P (Papachristou, 2020)

Total medan magnet di titik P didapatkan dengan melakukan integral garis sepanjang kawat berarus yang dinyatakan dengan

$$\vec{B}(P) = \frac{\mu_0}{4\pi} I \int \frac{\vec{dl} \times \vec{R}}{R^3} \quad (2)$$

Hubungan induksi magnetik dan elemen arus pada persamaan 2 inilah yang dikenal dengan Hukum Biot-Savart (Papachristou, 2020). Jika persamaan 2 diterapkan pada solenoid maka didapatkan persamaan untuk arah x, y dan z sebagai berikut

$$B_x(\vec{r}) = \frac{\mu_0 IRz}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\cos\phi}{r^3} d\phi \quad (3)$$

$$B_y(\vec{r}) = \frac{\mu_0 IRz}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\sin\phi}{r^3} d\phi \quad (4)$$

$$B_z(\vec{r}) = \frac{\mu_0 IR}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{R - x\cos\phi - y\sin\phi}{r^3} d\phi \quad (5)$$

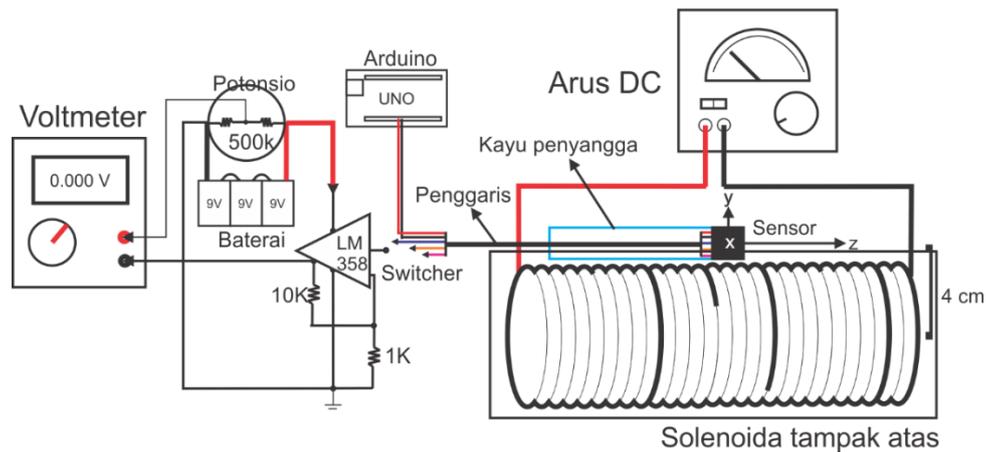
Dengan $r^3 = (x^2 + y^2 + z^2 + R^2 - 2xR\cos\phi - 2yR\sin\phi)^{3/2}$. Persamaan berlaku untuk semua kawat melingkar (Pathak, 2016).

Tujuan dari penelitian ini adalah merancang alat untuk mengukur nilai medan magnet dalam ruang 3 dimensi berdasarkan Hukum Biot-Savart. Oleh karena itu, sistem ini sangat relevan untuk menjadi kajian ilmu Fisika di sekolah maupun di tingkat perguruan tinggi.

2. METODOLOGI PENELITIAN

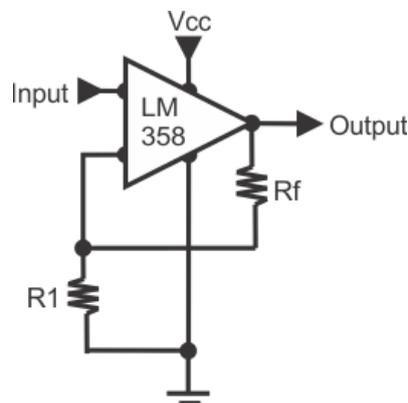
Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental dengan memanfaatkan lilitan solenoid yang dialiri listrik dari sumber listrik searah (DC) untuk menghasilkan medan magnet di sekitar solenoid. Nilai medan magnet pada suatu titik akan meningkat seiring dengan meningkatnya arus yang mengalir dalam kawat solenoid. Begitu pun pada jarak, nilai medan magnet akan menurun seiring jarak yang semakin jauh dari lilitan solenoid. Solenoid yang digunakan memiliki jari-jari 4 cm dengan total panjang lilitan 24 cm.

Peralatan penelitian dibangun dengan menghubungkan catu daya pada solenoid untuk menghasilkan medan magnet. Sensor SS49E dihubungkan dengan rangkaian penguat yang didrive dengan tiga buah baterai 9V yang dirangkai seri. Tegangan keluaran dari rangkaian penguat diukur dengan voltmeter sebagai representasi dari nilai medan magnet yang timbul dari pada solenoid.



Gambar 2. Rancangan Alat Pengukur Medan Magnet Tiga Dimensi

Medan magnet yang muncul di sekitar solenoid diubah menjadi tegangan menggunakan sensor efek Hall SS49E. Tegangan yang dihasilkan dari sensor dikuatkan menggunakan penguat operasional (Op-Amp) dengan memanfaatkan IC LM358.



Gambar 3. Rangkaian Penguat Operasional LM358.

Penguatan sinyal ini dilakukan untuk memudahkan pengukuran dan plot data. Tegangan hasil penguatan kemudian dihubungkan dengan voltmeter untuk mendapatkan nilai medan magnet berdasarkan tegangan luaran tersebut yang kemudian divisualisasikan lalu dibandingkan dengan model data berdasarkan hukum Biot-Savart. Data model dilakukan dengan menggunakan operasi Σ (sigma) untuk melakukan operasi integral tentu pada persamaan 3, 4, dan 5 dalam rentang sepanjang arah z ($z = 0$ s/d $z = 12$). Pengukuran dilakukan dengan menempatkan sensor di luar solenoid pada posisi 0 (tengah) sampai 12 cm (ujung solenoid) dengan melakukan perulangan pada arus 1 Ampere hingga dengan 3 Ampere dengan perubahan 0.5 Ampere. sensor dihadapkan pada arah x , y dan z untuk mendapatkan hasil pengukuran 3 dimensi.

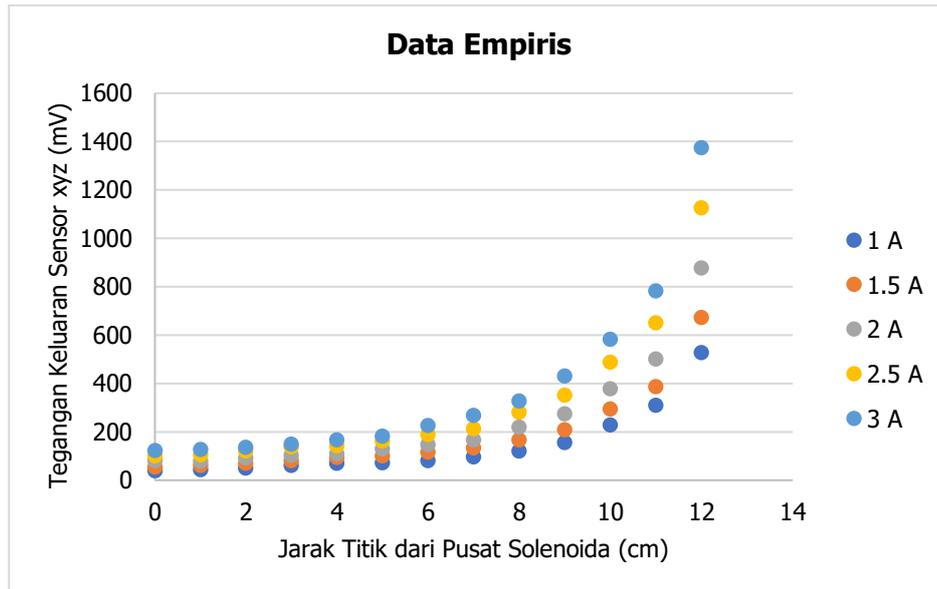
Pemodelan data dilakukan dengan pendekatan numerik menggunakan aplikasi microsoft excel dan visualisasi vektor medan magnet dilakukan dengan aplikasi MATLAB (Tang et al., 2018). Dalam penelitian ini, data keluaran sensor yang digunakan berupa data tegangan listrik tanpa dikonversi menjadi satuan medan magnet (Tesla). Hal ini dilakukan mengingat nilai medan magnet berbanding lurus dengan arus listrik yang mengalir pada lilitan sehingga nilai tegangan dari sensor merupakan representasi linier dari medan magnet yang ditimbulkan oleh lilitan kawat berarus. Selain itu, data empiris dan data model dibandingkan dengan cara melakukan plot linier pada sumbu x untuk data model dan sumbu y untuk data empiris sehingga ralat sistematis dan konversi nilai tegangan menjadi Tesla tidak memiliki pengaruh terhadap perbandingan data. Kesesuaian data model dan empiris dilihat dari nilai R^2 yang dihasilkan, semakin mendekati nilai satu semakin sesuai data empiris dan data model yang didapatkan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

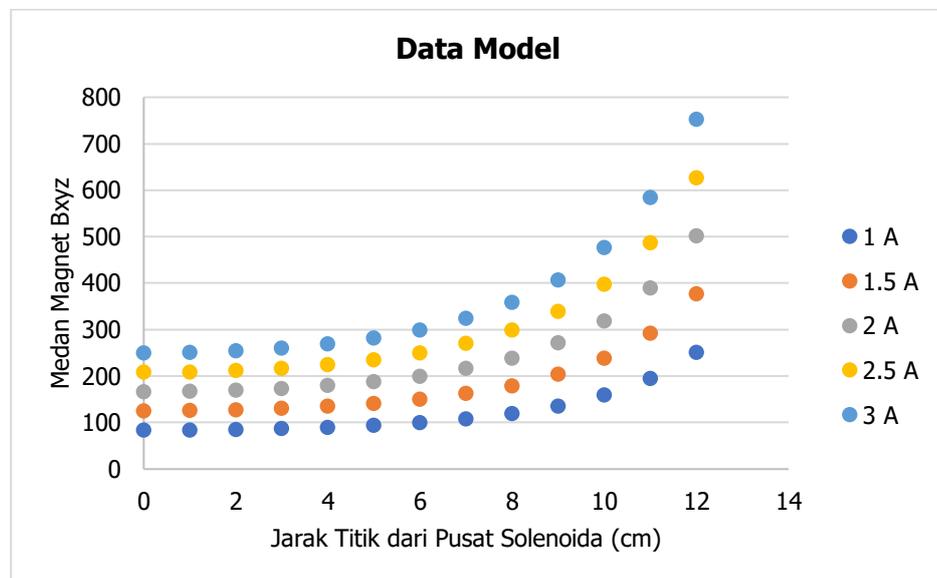
Pengukuran medan magnet di luar sumbu pusat solenoida dilakukan untuk menunjukkan bahwa medan magnet di luar sumbu pusat solenoida khususnya di luar solenoida tidak sama dengan nol. Secara teori, medan magnet di luar solenoida tepat di tengah panjang solenoida memiliki nilai minimum. Data hasil pengukuran diplot dalam grafik yang ditunjukkan Gambar 4.a.

3.1. Medan Magnet Di Luar Solenoid

Data model dibuat berdasarkan persamaan 3, 4 dan 5 yang merupakan hukum Biot Savart untuk medan magnet di luar sumbu pusat solenoida sembarang titik. Persamaan tersebut diselesaikan secara numerik menggunakan Microsoft Excel. Data empiris yang didapatkan dalam penelitian ini merupakan data nilai medan listrik dalam bentuk tegangan listrik keluaran sensor. Hasil pengukuran diplot dalam grafik pada Gambar 4.a dan hasil perhitungan model pada grafik 4.b. Titik medan magnet diukur pada $x = 0$ dan $y = -4$.



(a)

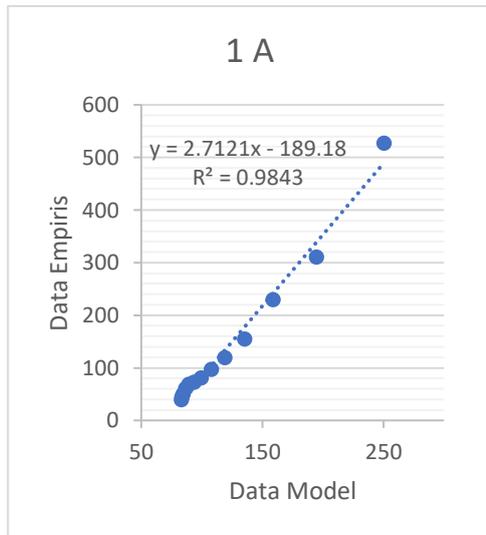


(b)

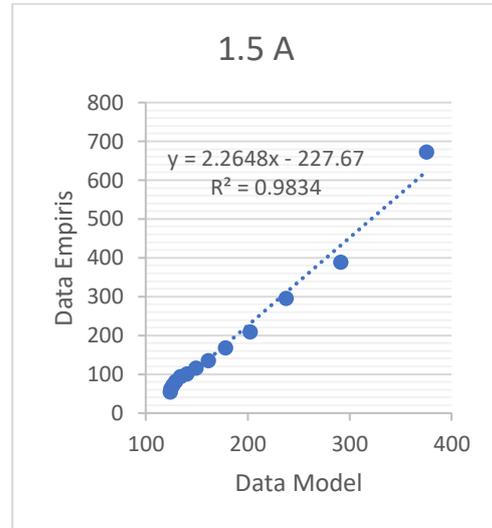
Gambar 4. Grafik Plot Data dari Tengah ke Ujung di Luar Solenoida

Medan magnet B_{xyz} data model merupakan resultan nilai B_x , B_y , dan B_z . Grafik data empiris merupakan resultan nilai perubahan tegangan keluaran sensor 3 dimensi. Nilai B_{xyz} pada data model merupakan resultan vektor medan magnet dari tiap lilitan kawat yang mana nilai tersebut sama dengan nilai B_z . Hal ini terjadi karena nilai B_x dan B_y saling menghilangkan dari masing-masing komponennya (*cancel each other*), sehingga nilai B_x dan B_y merupakan selisih dari sisi positif titik medan magnet dan sisi negatifnya.

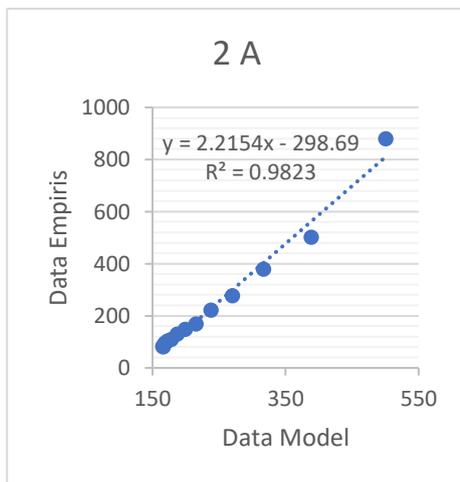
Hasil pengamatan kualitatif dari Gambar 4 menunjukkan tren kedua data yang sama. Kesamaan tren ini dapat dikuatkan dengan melakukan plot kedua data dalam satu grafik dengan data empiris yang disajikan pada Gambar 5.



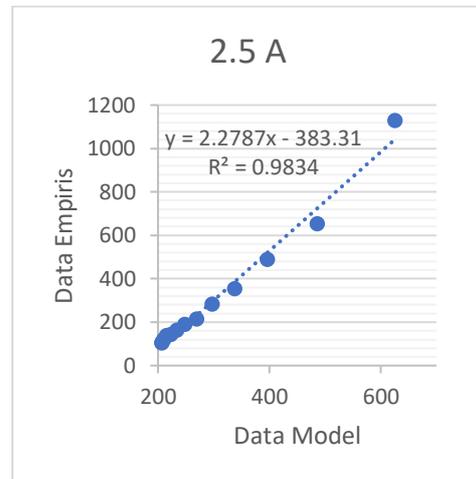
(a)



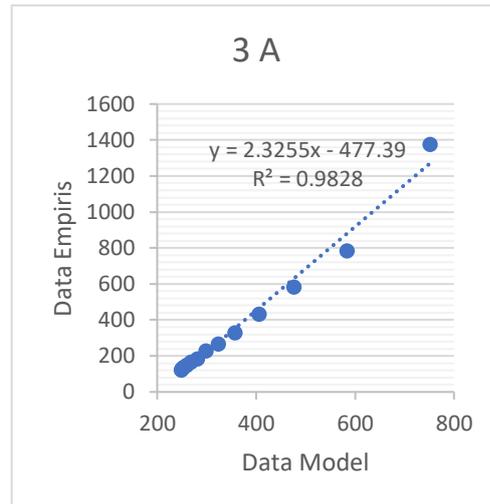
(b)



(c)



(d)



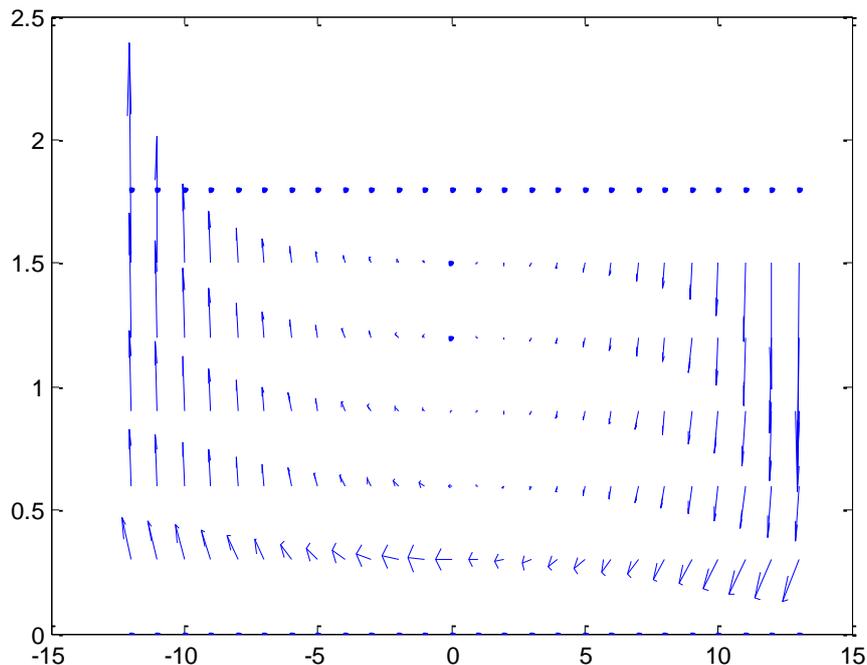
(e)

Gambar 5. Plot data terhadap arus (di luar sumbu pusat solenoida)

Setiap data pada Gambar 5 difit linear untuk melihat kesesuaian tren. Hasil *fitting linear* menunjukkan kelima data memiliki nilai $R^2 > 0,98$. Hal ini menunjukkan bahwa data yang diukur saat eksperimen memiliki tren yang cukup sesuai dengan data model.

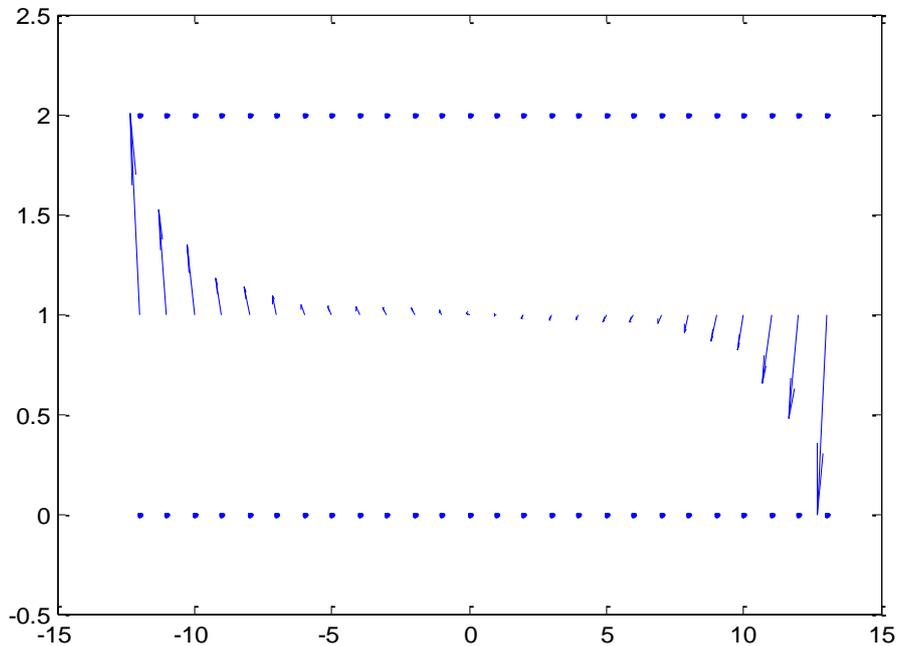
3.2. Distribusi Medan Magnet di Luar Sumbu Pusat Solenoida

Perhitungan data model dibuat variasi titik y sejauh 1 cm dari titik data empiris sebanyak 5 variasi. Hasil perhitungan numerik tersebut diplot menggunakan MATLAB membentuk distribusi arah medan magnet tiap titik yang dapat dilihat pada Gambar 6.



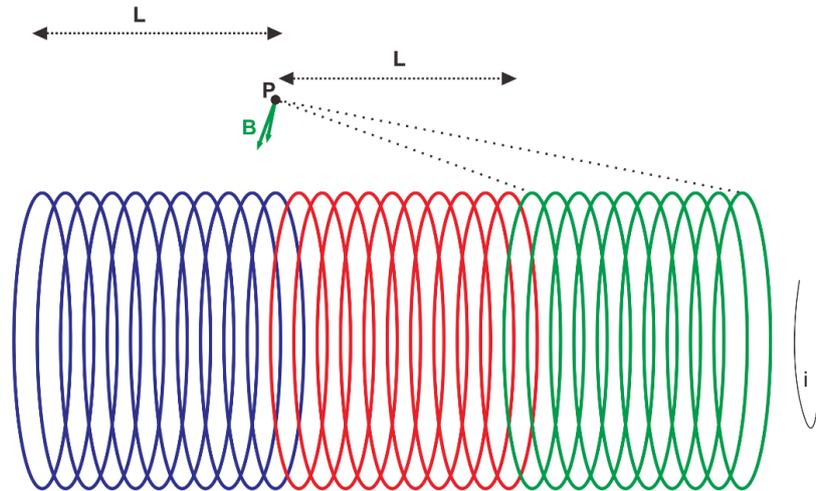
Gambar 6. Distribusi Medan Magnet di Luar Sumbu Pusat Solenoida

Gambar 6 menunjukkan distribusi medan magnet di luar solenoida dilihat dari bidang (z,y) . Arah medan magnet dari tengah solenoida sejajar sumbu z dan tegak lurus pada ujung solenoida. Medan magnet di ujung solenoida memiliki nilai yang besar, sedangkan di tengah solenoida memiliki nilai yang relatif sangat kecil. Hal ini dapat dilihat dari panjang garis vektor.



Gambar 7. Distribusi Medan Magnet dari Data Empiris

Gambar 6 dan 7 menunjukkan tren yang sama, yaitu kenaikan nilai dari posisi tengah ke ujung solenoida. Hal ini dapat dijelaskan berdasarkan komponen vektor yang dihasilkan tiap lilitan pada solenoida. Data yang didapatkan sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Granum (2022) yang menunjukkan hasil pemodelan medan magnet pada solenoid (Granum et al., 2022). Komponen B_y saling menghilangkan pada panjang lilitan yang sama dari sisi kanan dan sisi kiri titik medan magnet (Gambar 8) dan menyisakan nilai B_y dari selisih panjang lilitan solenoida (biru dan merah saling menghilangkan) sehingga medan magnet pada titik P hanya dihasilkan dari kawat sepanjang kawat hijau (Gambar 8).



Gambar 8. Medan Magnet dari Komponen B_x dan B_y

Komponen B_x berdasarkan acuan yang berlaku pada penelitian ini menghasilkan medan magnet yang saling menghilangkan antara elemen kawat sepanjang 0 sampai π dengan elemen kawat pada panjang π sampai 2π . Hal ini menjelaskan vektor medan magnet pada gambar 6 dan 7 yang muncul merupakan komponen vektor yang sejajar dan tegak lurus sumbu z (Ebrahimi *et al.*, 2018).

4. KESIMPULAN

Desain sistem pengukuran medan magnet dibangun dengan memanfaatkan sensor efek Hall sebagai transduser yang kemudian dikuatkan menggunakan penguat operasional Op-Amp LM 358. Sensor ditempatkan di luar solenoid dengan variasi posisi pada arah z dari Z_0 sampai Z_n dengan n dari 1 cm hingga 12 cm. Variasi juga dilakukan pada besar medan magnet yang dihasilkan solenoid dengan mengubah arus listrik yang mengalir dari catu daya. Nilai arus divariasikan dari 1 Ampere hingga 3 Ampere dengan perubahan 0.5 Ampere. Hasil pengukuran kemudian dibandingkan dengan model data berdasarkan persamaan Biot-Savart. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem bekerja sesuai dengan teori yang ada dengan regresi $R^2 = 0.98$ namun masih memiliki kekurangan berupa nilai konversi medan magnet dari tegangan yang telah dikuatkan. Meskipun demikian sistem ini memiliki potensi yang besar untuk terus dikembangkan karena memiliki hasil yang presisi. Beberapa rekomendasi untuk penelitian selanjutnya untuk membuat rangkaian yang lebih baik dengan menambahkan fitur konversi tegangan keluaran sensor menjadi nilai medan magnet untuk mendapatkan besar nilai konversi tegangan yang akurat dengan mengurangi ralat sistematis pada rangkaian sehingga akurasi hasil pengukuran dapat ditingkatkan.

REFERENSI

- Anggoro, C. J., & Santosa, I. E. (2015). *Distribusi Medan Magnet di Sekitar Kumparan Berarus Listrik*. 8.
- Ebrahimi, N., Schimpf, P., & Jafari, A. (2018). Design optimization of a solenoid-based electromagnetic soft actuator with permanent magnet core. *Sensors and Actuators A: Physical*, 284, 276–285. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.10.026>
- Granum, P., Madsen, M. L., McKenna, J. T. K., Hodgkinson, D. L., & Fajans, J. (2022). Efficient calculations of magnetic fields of solenoids for simulations. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1034, 166706. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.166706>
- Papachristou, C. J. (2020). *Introduction to Electromagnetic Theory and the Physics of Conducting Solids*. Springer International Publishing : Imprint: Springer.
- Pathak, A. (2016). An elementary argument for the magnetic field outside a solenoid. *European Journal of Physics*, 38(1), 015201. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/38/1/015201>
- Putranto, A. B., Muhlisin, Z., Lutfiah, A., Mangkusasmito, F., & Hersaputri, M. (2021). Perancangan Alat Karakterisasi Dioda dengan ESP32 dan Rangkaian Op-Amp LM358 Berbasis Android. *Ultima Computing : Jurnal Sistem Komputer*, 13(1), 22–29. <https://doi.org/10.31937/sk.v13i1.2088>
- Ridhoi, A., Setyadjit, K., & Hariadi, B. (2021). PENGATURAN LAMPU PENERANGAN MENGGUNAKAN KOMPARATOR OP-AMP LM358. *Jurnal Teknik Industri; Vol 24 No 1 (2021): Maret: Jurnal Teknik Industri*. <https://univ45sby.ac.id/ejournal/index.php/industri/article/view?path=>
- Roy, D. (2015). *Dependence of Magnetic field outside a finite long solenoid on the length of the solenoid*.
- Tang, Y., Flesch, R. C. C., Zhang, C., & Jin, T. (2018). Numerical analysis of the effect of non-uniformity of the magnetic field produced by a solenoid on temperature distribution during magnetic hyperthermia. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 449, 455–460. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.10.076>
- Young, H., Freedman, R., & Bhathal, R. (2011). *Sears and Zemanky's university Physics with modern physics* (1st ed., Vol. 1). Pearson.