Jurnal Sosial dan Sains (SOSAINS)
p-ISSN 2774-7018 e-ISSN 2774-700x

Simulasi Numerik Distribusi Medan Magnet Aksial dan Radial pada Solenoida Berhingga Berbasis MATLAB

Fadhil Muddasir[1], Siti Nurul Khotimah[2]
Institut Teknologi Bandung, Indonesia
Email: 24723301@mahasiswa.itb.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara numerik distribusi medan magnet aksial dan radial pada solenoida berhingga menggunakan perangkat lunak MATLAB. Simulasi dilakukan dengan mengacu pada prinsip dasar teori medan magnet, khususnya hukum Biot–Savart, serta pendekatan matematis dari Pathak untuk memodelkan komponen medan radial. Fokus utama diarahkan pada pemahaman karakteristik medan magnet di sekitar solenoida yang memiliki panjang terbatas, yang dalam praktiknya sering digunakan dalam berbagai aplikasi elektromagnetik. Hasil simulasi menunjukkan bahwa medan magnet aksial bersifat relatif seragam di bagian dalam solenoida, namun mengalami penurunan yang signifikan di dekat ujung-ujungnya akibat efek medan bocor. Di sisi lain, medan magnet radial di luar solenoida menunjukkan pola penurunan eksponensial terhadap jarak radial dari sumbu, menyerupai karakteristik medan dipol magnetik. Temuan ini memberikan validasi awal terhadap model teoritis yang digunakan dalam simulasi, sekaligus menggarisbawahi perlunya verifikasi lebih lanjut melalui eksperimen fisik. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam mendukung desain, pengembangan, dan optimasi perangkat eksperimental berbasis solenoida berhingga, khususnya di bidang fisika terapan dan teknik elektromagnetik.

Kata Kunci: medan magnet aksial, medan magnet radial, solenoida berhingga, simulasi numerik, Matlab, distribusi medan magnet.

ABSTRACT

This study aims to numerically analyze the distribution of axial and radial magnetic fields in a finite solenoid using MATLAB software. The simulation is based on classical magnetic field theory, particularly the Biot–Savart law, along with Pathak's analytical approach for modeling the radial field component. The primary focus is to understand the magnetic field behavior around a solenoid of finite length, which is commonly used in various electromagnetic applications. The simulation results reveal that the axial magnetic field remains relatively uniform within the central region of the solenoid but decreases significantly near its ends due to the fringe field effect. Meanwhile, the radial magnetic field outside the solenoid exhibits an exponential decay with increasing radial distance from the axis, consistent with the behavior of a magnetic dipole field. These findings offer preliminary validation of the theoretical models applied in the simulation while emphasizing the need for further experimental verification. This research is expected to contribute to the design, development, and optimization of experimental devices involving finite solenoids, particularly in applied physics and electromagnetic engineering contexts.

Keywords: *axial magnetic field, radial magnetic field, finite solenoid, numerical simulation, Matlab, magnetic field distribution.*

PENDAHULUAN

Solenoida merupakan salah satu komponen penting dalam teknologi elektromagnetik yang memiliki berbagai aplikasi luas. Komponen ini digunakan, antara lain, dalam sistem starter motor listrik (Kumar R. P., 2020), sebagai aktuator elektromekanis dalam perangkat medis seperti konsentrator oksigen , alat analisis darah otomatis , ventilator , dan sistem pengiriman obat (Solenoid Systems), serta dalam sistem pengisian daya nirkabel untuk drone, khususnya pada sisi penerima (Nadi H., 2024).

Ketika arus listrik mengalir melalui solenoida, medan magnet terbentuk di sekitarnya. Medan magnet ini memainkan peran krusial dalam pengoperasian berbagai sistem tersebut (Handayani et al., 2017). Untuk memahami karakteristik medan magnet yang dihasilkan, para peneliti sering menggunakan model ideal seperti solenoida panjang tak berhingga (Achmady et al., 2022; Fadila, 2024; Nurhakim et al., 2021; Reuter, 2016). Model ini mempermudah analisis melalui penerapan prinsip dasar elektromagnetisme, termasuk hukum Biot–Savart dan hukum Ampère (Griffiths, 2017).

Namun, dalam praktiknya, solenoida memiliki panjang yang terbatas. Kondisi ini menyebabkan distribusi medan magnet menjadi lebih kompleks akibat adanya efek tepi yang menghasilkan medan bocor (*fringe field*). Medan bocor ini menyebabkan distribusi medan magnet di luar solenoida menjadi tidak merata, terutama di sekitar ujung-ujung solenoida (Farley R. H., 2011). Lebih lanjut, Mungan (2012) menekankan bahwa medan magnet di luar solenoida ideal dengan panjang tak berhingga secara teoritis dapat diabaikan. Akan tetapi, pada solenoida dengan panjang berhingga, medan bocor menyebabkan medan magnet di luar solenoida menjadi tidak nol (Oh et al., 2022). Medan ini tidak hanya dipengaruhi oleh geometri dan arus dalam solenoida, tetapi juga oleh medan magnet eksternal seperti medan magnet bumi, serta oleh sifat material magnetik yang digunakan sebagai inti solenoida.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa medan magnet di bagian tengah solenoida berhingga cenderung lebih seragam, terutama jika panjang solenoida diperbesar (Herawan et al., 2020). Sebaliknya, medan magnet di dekat ujung solenoida mengalami penurunan intensitas yang signifikan (Sudharma Sudarti R. D., 2023). Roy (2015) juga menegaskan bahwa distribusi medan magnet di luar solenoida dipengaruhi oleh panjang solenoida serta posisi titik pengamatan relatif terhadap solenoida itu sendiri. Pada jarak yang cukup jauh, medan magnet eksternal menunjukkan karakteristik seperti medan dari dipol magnetik, yang penting untuk memahami interaksi antara medan magnet dan lingkungan sekitarnya (Bistak et al., 2024; Kastawan & Hidayat, 2024). Selain itu, material inti seperti bahan feromagnetik dan konfigurasi lilitan solenoida turut memengaruhi distribusi medan magnet, baik di dalam maupun di luar solenoida (Bahalwan et al., 2019; Lusiyana S. F. and Fadli, R., 2014; Supardiyono R., 2023).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mensimulasikan distribusi medan magnet aksial dan radial pada solenoida berhingga secara numerik menggunakan perangkat lunak MATLAB. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih realistis mengenai perilaku medan magnet pada konfigurasi solenoida berhingga, sehingga hasilnya dapat dimanfaatkan dalam perancangan perangkat elektromagnetik maupun untuk mendukung kegiatan eksperimen fisika.

Hukum Biot-Savart

Hukum ini menghubungkan arus listrik dengan medan magnet yang dihasilkannya dan menjadi dasar untuk menghitung medan magnet dari distribusi arus:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I.d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2}$$

Untuk geometri cincin berarus, komponen tegak lurus medan saling meniadakan sehingga hanya tersisa komponen sepanjang sumbu-z:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2} \cdot \frac{R^2}{(a^2 + R^2)^{3/2}} \hat{k}$$

Hukum Ampère

Hukum ini digunakan untuk menghitung medan magnet di sekitar lintasan tertutup:

$$\oint \vec{B}.d\vec{l} = \mu_0 I_{enc}$$

Untuk solenoida sangat panjang:

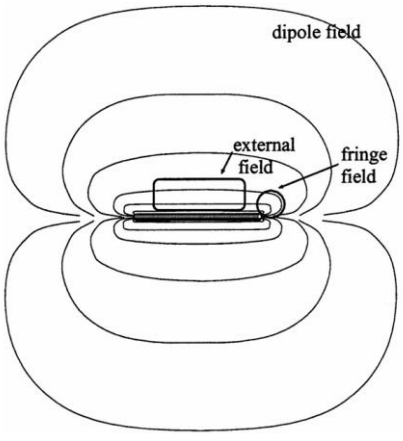
$$B = \mu_0 nI$$

Medan Magnet Solenoida Ideal

Solenoida panjang dengan lilitan rapat menghasilkan medan magnet homogen di dalam dan hampir nol di luar:

$$\vec{B} = \mu_0 nI\, \hat{z} \;\; (di\ dalam\ solenoida)$$
$$\vec{B} = 0 \;\; (di\ luar\ solenoida)$$

Gambar 1 membantu menggambarkan beberapa wilayah di luar solenoid panjang. Wilayah-wilayah ini mencakup medan magnet yang berbeda, termasuk medan dipol yang dihasilkan oleh momen dipol magnetik pada jarak yang jauh lebih besar dari panjang solenoida (L).



Gambar 1. Wilayah medan magnet di luar solenoida panjang
Sumber: Farley dan Price (2001)

Medan Magnet Solenoida Berhingga

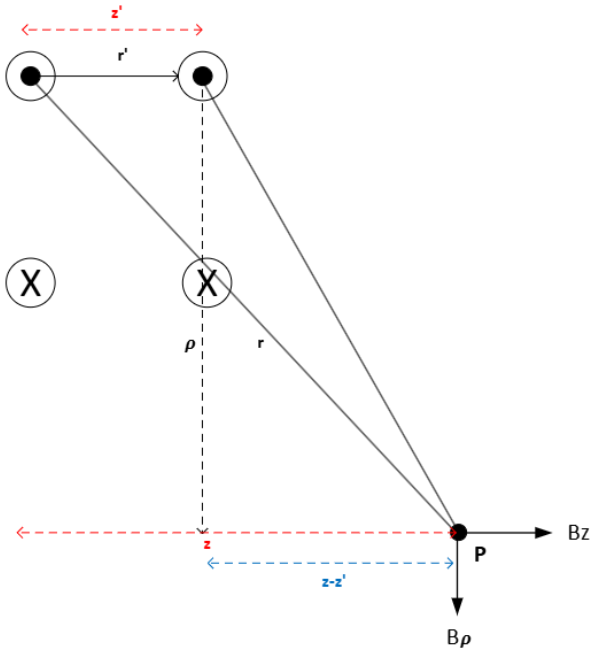
Medan magnet pada solenoida berhingga terdiri dari komponen aksial dan radial. Distribusi medan tergantung pada posisi, panjang solenoida, dan konfigurasi lilitan. Untuk titik pada sumbu solenoida, medan aksial dihitung dengan:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 nI}{2}(\cos\alpha + \cos\beta)$$

Medan Magnet Radial

Berdasarkan pendekatan Pathak (2016), komponen radial dari medan magnet di luar solenoida dapat dihitung dengan integrasi kontribusi dari elemen kecil sepanjang sumbu *z*:

$$\overrightarrow{B_z} = \frac{\mu_0 I}{4\pi}\left[\frac{(z-z')^2 - \rho^2}{((z-z')^2 + \rho^2)^{3/2}}\right]\hat{z}$$



Gambar 2. Komponen medan magnet di titik P untuk elemen kecil solenoida di sumbu z

Pada Gambar 2, komponen $\overrightarrow{B_\rho}$ akan saling meniadakan karena simetri. Untuk elemen kecil dari solenoida di posisi *z'* dan elemen panjang *dz*, solusi medan magnet *Bz* pada jarak radial ρ dari sumbu solenoida *z* adalah:

$$\overrightarrow{B_z}(\rho, z) = \frac{\mu_0 nIA}{4\pi}\left[\frac{(z - L/2)}{((z-L/2)^2 + \rho^2)^{3/2}} - \frac{(z + L/2)}{((z+L/2)^2 + \rho^2)^{3/2}}\right]$$

Medan ini dinyatakan sebagai perbedaan antara dua hal yang masing-masing melibatkan jarak dari titik pengamatan ke kedua ujung solenoida.

Pengaruh Material Magnetik

Bila solenoida berisi material magnetik, maka permeabilitas total:

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

dan medan yang dihasilkan:

$$B = \mu n I = \mu_0 \mu_r n I$$

Pengaruh Medan Bumi

Medan yang terukur adalah hasil penjumlahan vektor medan induksi solenoida dan medan bumi:

$$B_{obs} = B_{solenoid} + B_{earth}\, cos\phi$$

Inilah yang menjadi dasar teoritis untuk simulasi numerik distribusi medan magnet pada solenoida berhingga yang dibahas dalam penelitian ini.

METODE

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mensimulasikan distribusi medan magnet aksial dan radial di sekitar solenoida berhingga. Model matematis yang digunakan untuk medan magnet radial mengacu pada persamaan yang dikembangkan oleh *Pathak* (2016), yang secara khusus menggambarkan distribusi medan magnet radial di luar struktur solenoida. Seluruh simulasi numerik dilaksanakan menggunakan perangkat lunak MATLAB. Tahapan simulasi diawali dengan proses disretisasi ruang di sekitar solenoida menjadi sebuah grid dua dimensi yang terdiri atas titik-titik pengukuran. Pada setiap titik dalam grid, nilai medan magnet dihitung secara numerik menggunakan fungsi yang diimplementasikan dalam MATLAB. Fungsi ini mengacu pada model teoritis dan mempertimbangkan parameter fisik solenoida, seperti jumlah lilitan, rapat lilitan, panjang solenoida, kuat arus, dan dimensi penampang kumparan. Hasil simulasi kemudian divisualisasikan dalam bentuk grafik distribusi medan magnet $\vec{B}$, baik terhadap posisi aksial sepanjang sumbu solenoida maupun terhadap variasi jarak radial dari sumbu tersebut. Visualisasi ini memungkinkan pengamatan terhadap pola perubahan medan magnet akibat pengaruh geometri dan parameter operasional solenoida.

HASIL DAN PEMBAHASAN

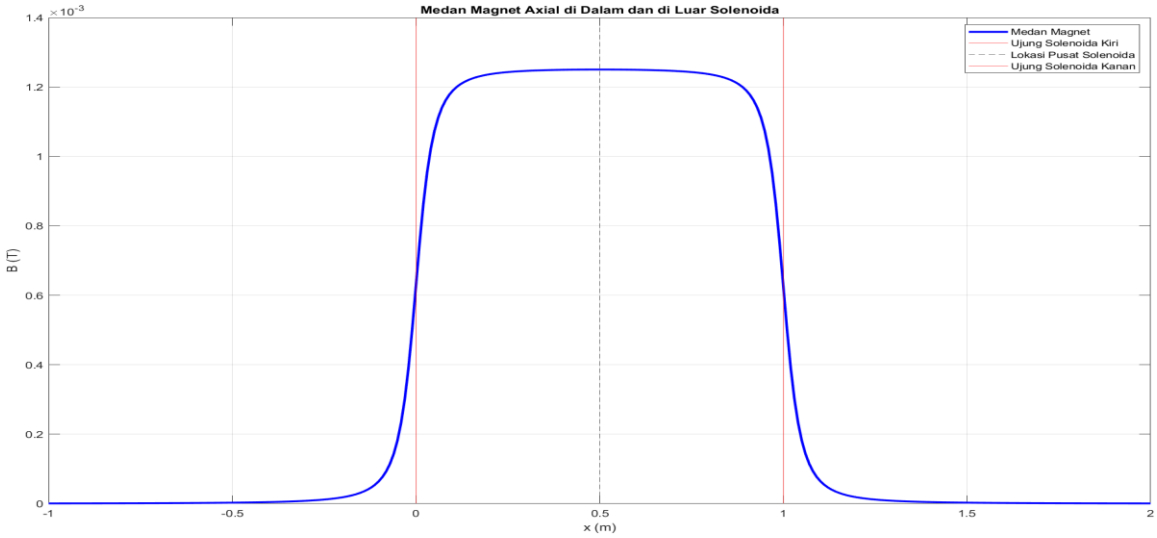
Analisis dalam penelitian ini difokuskan pada dua aspek utama distribusi medan magnet pada solenoida berhingga, yaitu medan magnet aksial (sepanjang sumbu solenoida) dan medan magnet radial (melintang dari sumbu solenoida). Plot kurva yang dihasilkan dari simulasi numerik memberikan gambaran mengenai perilaku medan magnet baik di dalam maupun di sekitar solenoida.

Medan Magnet Aksial

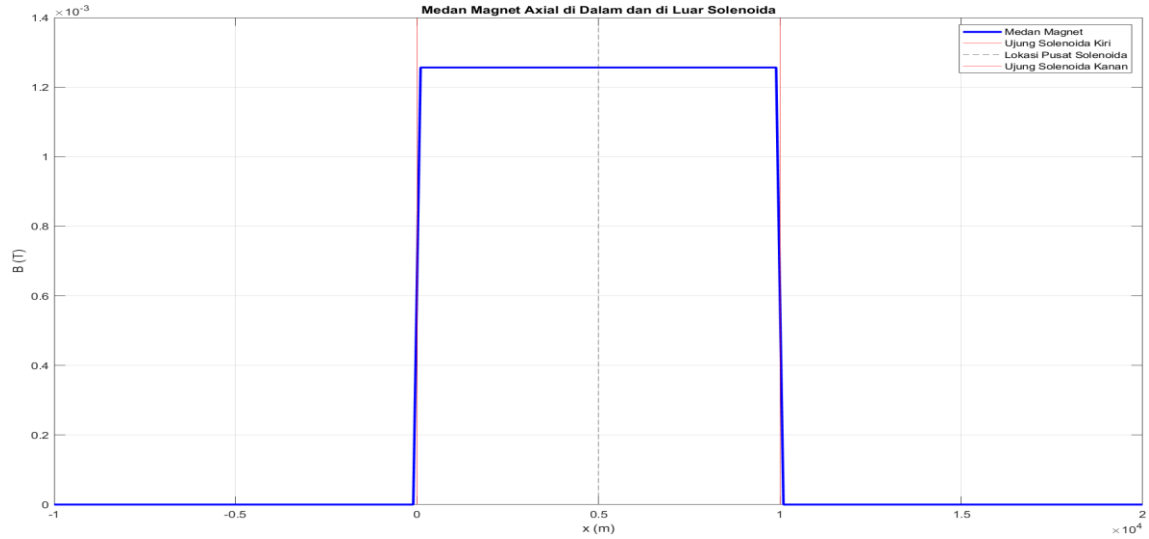
Medan magnet aksial pada solenoida berhingga menunjukkan beberapa karakteristik khas yang tampak jelas pada grafik. Di bagian dalam solenoida, khususnya antara titik awal $x = 0$ hingga $x = L$ (panjang solenoida), medan magnet cenderung seragam. Uniformitas ini sesuai dengan prinsip kerja solenoida, di mana lilitan kawat yang disusun rapat menghasilkan medan yang homogen. Kurva menunjukkan adanya penurunan tajam kekuatan medan magnet

di kedua ujung solenoida, menjadi sekitar setengah dari nilai maksimum di pusat solenoida. Fenomena ini dikenal sebagai *efek ujung* akibat *medan bocor* (*fringe field*), yaitu kebocoran garis-garis medan magnet ke luar karena tidak adanya lilitan yang mempertahankan arah medan. Di luar sumbu solenoida, penurunan medan berlangsung lebih cepat hingga mendekati nol.

Pada Gambar 3 dan 4, ditampilkan perbandingan distribusi medan magnet aksial antara dua solenoida dengan rapat lilitan yang sama tetapi panjang L yang berbeda. Gambar 4 menunjukkan bahwa solenoida dengan panjang lebih besar menghasilkan distribusi medan yang lebih seragam di bagian dalam. Hal ini sejalan dengan teori medan magnet pada solenoida ideal yang tak berhingga panjangnya, di mana untuk $L \to \infty$, medan magnet di dalam solenoida menjadi homogen dengan besar $B = \mu_0 nI$, dan medan di luar solenoida mendekati nol.



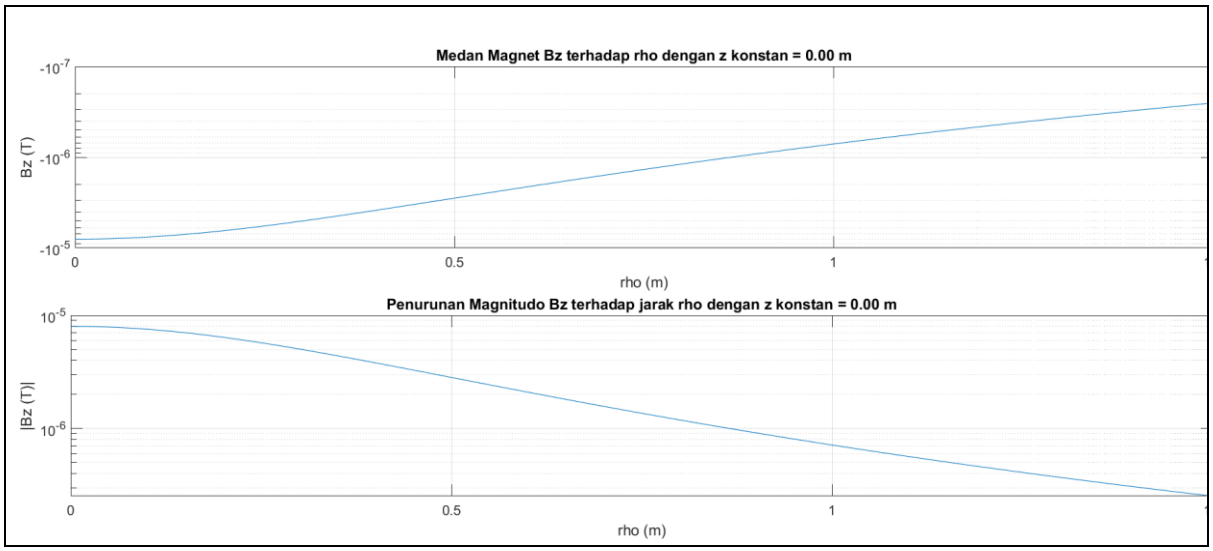
Gambar 3. Distribusi Medan Magnet Aksial Solenoida dengan $n = 10^3$ lilitan/m dan $L = 1$ m
Sumber: Data olahan



Gambar 4. Distribusi Medan Magnet Aksial Solenoida dengan $n = 10^3$ lilitan/m dan $L = 10^4$ m
Sumber: Data olahan

Medan Magnet Radial

Medan magnet radial di luar solenoida berhingga menunjukkan pola penurunan signifikan seiring bertambahnya jarak radial dari sumbu *z*. Hal ini menunjukkan bahwa medan magnet terkonsentrasi di dalam solenoida dan menurun drastis ketika menjauhi sumbu. Pada Gambar 5, ditunjukkan arah medan magnet untuk kondisi *z = 0,* yaitu pusat solenoida dengan panjang *L* dari *-L/2* hingga *L/2*. Variasi jarak radial ρ menunjukkan bahwa *Bz*(ρ) bernilai negative, yang berarti arah medan di luar solenoida berlawanan dengan arah medan induksi di dalam solenoida dan nilainya mendekati nol seiring bertanbahnya ρ.

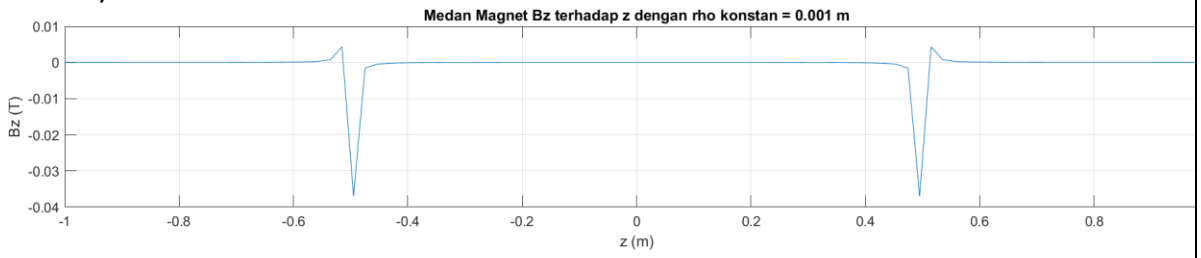


Gambar 5. Medan Magnet di luar solenoida fungsi radial jarak ρ dari pusat sumbu solenoida (z = 0)

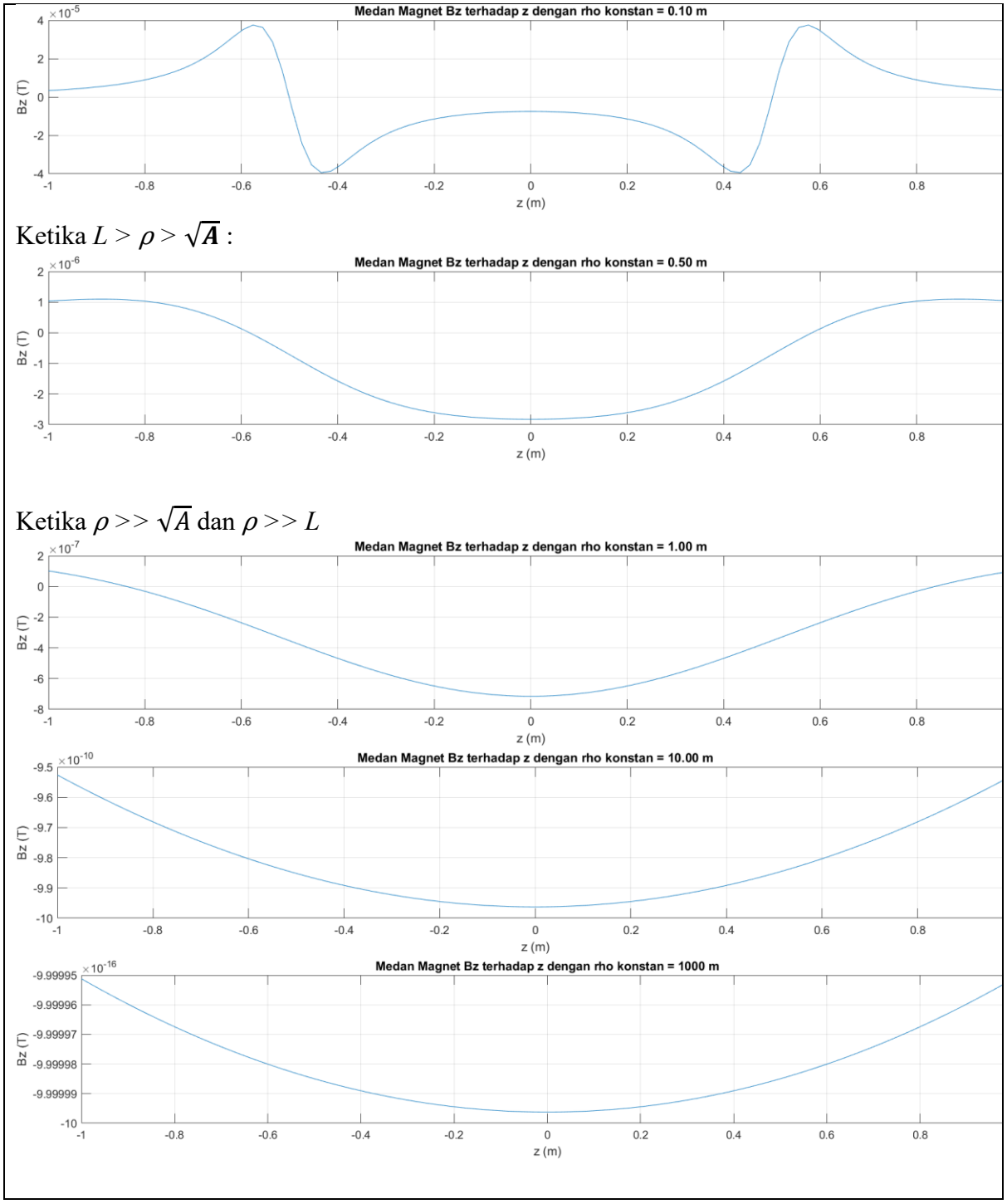
Sumber : Data olahan

Simulasi dilanjutkan dengan memvariasikan pada nilai konstan. Beberapa kasus berikut dianalisis. Pertama-tama, jarak radial yang digunakan $\rho << \sqrt{A}$ dengan A = 0.01 m^2 sehingga $\sqrt{A}$ = 0.1 m dan *L* = 1 m. Lalu, digunakan jarak radial $L > \rho > \sqrt{A}$ serta $\rho >> \sqrt{A}$ dan $\rho >> L$.

Ketika $\rho << \sqrt{A}$:



Ketika $\rho = \sqrt{A}$:



Ketika $L > \rho > \sqrt{A}$:

Ketika $\rho >> \sqrt{A}$ dan $\rho >> L$

Gambar 6. Hasil simulasi dengan variasi nilai ρ

Sumber : Data olahan

Dari hasil Gambar 6, ketika ρ sangat kecil, terjadi *medan bocor* atau *fringe field* yang signifikan, yang penting diperhatikan dalam aplikasi praktis karena dapat memengaruhi komponen di sekitar solenoida. Untuk $\rho << \sqrt{A}$, berlaku asumsi solenoida ideal tak berhingga, yaitu medan eksternal mendekati nol di seluruh rentang $-L/2 < z < L/2$ maupun di luar panjang solenoida ($z < -L/2$, $z > L/2$). Efek medan bocor tetap muncul di sekitar batas $z = \pm L/2$. Untuk kondisi $L > \rho > \sqrt{A}$ dan $|z| < L/2$, distribusi medan sesuai dengan pendekatan Pathak (2016):

$$B_z(\vec{r}) \approx -\frac{2\mu_0 nIA}{\pi L^2}\left[1 + 12\left(\frac{z}{L}\right)^2 + O\left(\left(\frac{z}{L}\right)^4\right)\right]$$

Sedangkan pada $\rho >> L$, medan solenoida dapat diasumsikan sebagai medan dari momen dipol magnetik seperti yang dijelaskan oleh Farley dan Price (2001):

$$B_z = -\frac{\mu_0 m}{4\pi\rho^3} = -\frac{\mu_0 InLA}{4\pi\rho^3}$$

Pada jarak yang cukup jauh dari sumbu solenoida, solenoida dapat dipandang sebagai magnet dengan momen dipol yang menghasilkan medan luar sebesar:

$$B_{ext} \sim \frac{\mu_0 nIA}{L^2}$$

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi numerik dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa distribusi medan magnet pada solenoida berhingga menunjukkan perilaku yang kompleks, khususnya di wilayah dekat ujung dan luar solenoida. Medan aksial relatif seragam di bagian tengah solenoida, namun mengalami penurunan tajam di sekitar ujungnya akibat efek medan bocor. Sementara itu, medan radial di luar solenoida mengalami penurunan secara eksponensial terhadap jarak dari sumbu, memperkuat karakteristik sebagai medan dipol magnetik. Simulasi ini memberikan validasi awal yang mendukung model teoritis yang digunakan, meskipun diperlukan verifikasi lebih lanjut melalui eksperimen. Hasil penelitian ini diharapkan dapat dimanfaatkan sebagai acuan dalam pengembangan desain perangkat elektromagnetik maupun untuk mendukung kegiatan eksperimen dalam eksperimen untuk pendidikan fisika dan rekayasa.

DAFTAR PUSTAKA

Achmady, S., Qadriah, L., & Auzan, A. (2022). *Rancang bangun magnetic solenoid door lock dengan speech recognition menggunakan nodemcu berbasis android*.

Bahalwan, A. F., Darmawan, D., & Suhendi, A. (2019). Optimasi Parameter Koil Untuk Meningkatkan Kuat Medan Magnet Pada Sumber Medan Magnet Berbasis Solenoida. *EProceedings of Engineering*, *6*(2).

Bistak, P., Huba, M., Drahos, P., Belai, I., & Vrancic, D. (2024). Magnetic Levitation Remote Control Laboratory Based on Matlab and Websockets∗∗This work has been supported by the Grant APVV-21-0125 financed by the Slovak Research and Development Agency; the Grant KEGA 021STU-4-2024 financed by the Cultural and Educational Grant Agency of the Slovak Republic; and the Research Program P2-0001 and research project L2-3166 financed by the Slovenian Research and Innovation Agency. *IFAC-PapersOnLine*, *58*(9), 235–240. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.07.402

Fadila, A. R. (2024). *Pengaruh paparan medan magnet untuk menghambat pertumbuhan Bakteri Escherichia Coli dan dampaknya terhadap kandungan protein, karbohidrat dan kalsium pada susu kedelai*. Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim.

Farley R. H., J. and P. (2011). A simple argument for the magnetic field outside a solenoid. *American Journal of Physics*, *69*(7), 751–754. https://doi.org/10.1119/1.1341254

Griffiths, D. J. (2017). *Introduction to electrodynamics* (4 (ed.)). Pearson.

Handayani, N., Haryanto, F., Baidillah, M. R., & Taruno, W. P. (2017). Simulasi Rekonstruksi Citra Pada Sensor Brain ECVT (Electrical Capacitance Volume Tomography) dengan Metode ILBP (Iterative Linear Back Projection). *Indonesian Journal Of Applied Physics*, *6*(02), 107–116.

Herawan, M. R. F., Hamdani, D., & Hariyanto, N. (2020). Pemodelan dan Simulasi Medan Listrik pada Jaringan Distribusi 20 kV Double Feeder Konstruksi 3B. *Rekayasa Hijau: Jurnal Teknologi Ramah Lingkungan*, *4*(3), 109–132.

Kastawan, I. M. iwit, & Hidayat, R. (2024). Simulasi Distribusi Fluks dan Tegangan Generator Magnet Permanen Satu-Fasa Hasil Modifikasi Motor Induksi Rotor Sangkar Satu-Fasa. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, *12*(3), 784.

Kumar R. P., R. and S. (2020). Design and analysis of electromechanical solenoid for automotive starter motor. *2020 International Conference on Power Electronics & IoT Applications in Renewable Energy and Its Control (PARC)*, 40–44. https://doi.org/10.1109/PARC49193.2020.236593

Lusiyana S. F. and Fadli, R., A. and A. (2014). Uji sifat magnetik pasir pantai melalui penentuan permeabilitas relatif menggunakan Logger Pro. *Jurnal Ilmiah Pendidikan Fisika Al-Biruni*, *3*(1), 59–68. https://doi.org/10.24042/jipfalbiruni.v3i1.62

Mungan, C. E. (2012). Magnetic field outside an ideal solenoid. *The Physics Teacher*, *39*(4), 228–230. https://doi.org/10.1119/1.1377283

Nadi H., E. and Z. (2024). Design and analysis of a detuned series-series IPT system with solenoid coil structure for drone charging applications. *2024 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 1–6. https://doi.org/10.1109/ITEC60706.2024.10598984

Nurhakim, A. A., Rasyid, R. I. A., & Waluyo, W. (2021). Model Distribusi Potensial Listrik dan Medan Listrik pada Isolator Porselen Tegangan Menengah 20 kV Berbasis FEM. *Edu Elektrika Journal*, *10*(2), 42–46.

Oh, H., Hwang, J., Pickett, L. M., & Han, D. (2022). Machine-learning based prediction of injection rate and solenoid voltage characteristics in GDI injectors. *Fuel*, *311*, 122569. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122569

Pathak, A. (2016). An elementary argument for the magnetic field outside a solenoid. *European Journal of Physics*, *37*(5), 55201. https://doi.org/10.1088/0143-0807/37/5/055201

Reuter, J. (2016). Flatness Based Control Of A Dual Coil Solenoid Valve. *IFAC Proceedings Volumes*, *39*(16), 48–54. https://doi.org/https://doi.org/10.3182/20060912-3-DE-2911.00012

Roy, D. (2015). *Dependence of magnetic field outside a finite long solenoid on the length of the solenoid*. School of Physical Sciences, National Institute of Science Education and Research.

Sudharma Sudarti R. D., K. D. and H. (2023). *Distribusi medan magnet pada solenoid*.

Supardiyono R., B. and S. (2023). *Perhitungan medan magnet solenoid multi lapis*. PTAPB-

BATAN.