

LINTASAN BOLA BERMUATAN BERPUTAR DALAM MEDAN MAGNET DENGAN PENGARUH EFEK MAGNUS

Candra Fanleon, Aldi Nur Hidayat, Tamsil, Leonora Livi Riza Trifina, Sholihun*

Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Gadjah Mada, Sekip Utara BLS 21, Yogyakarta, 5528, Indonesia
email: sholihun@ugm.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini menganalisis lintasan bola konduktor bermuatan dan netral dalam medan elektromagnetik tidak homogen dengan efek Magnus melalui simulasi numerik. Metode Runge-Kutta orde 4/5 diaplikasikan untuk menyelesaikan persamaan diferensial gerak yang melibatkan interaksi gaya Lorentz, Magnus, dan Gravitasi. Hasil simulasi menunjukkan perbedaan signifikan pada lintasan bola: kasus bermuatan ($q = 1.0 \text{ C}$) membentuk heliks kompleks dengan displacement horizontal 12.5 m dan variasi ketinggian 3.8m akibat kopling elektromagnetik-rotasional, sedangkan kasus netral ($q = 0 \text{ C}$) menghasilkan lintasan parabola sederhana dengan displacement 2.3 m. Analisis gaya Magnus menunjukkan amplitudo osilasi lebih besar pada benda bermuatan, menegaskan pengaruh medan magnet terhadap energi rotasi.

Kata Kunci: Gaya Lorentz; Efek Magnus; Simulasi Numerik; Medan Tidak Homogen; Dinamika Rotasi

ABSTRACT

[Title: Track of a Charged Ball Rotating in a Magnetic Field with the Influence of the Magnus Effect] This research investigates the trajectory of charged and neutral conducting spheres in inhomogeneous electromagnetic fields incorporating the Magnus effect through numerical simulation. The fourth/fifth-order Runge-Kutta method was implemented to solve the equations of motion involving coupled Lorentz force, Magnus effect, and gravitational interactions. Simulation results demonstrate significant trajectory differences: the charged case ($q = 1.0 \text{ C}$) exhibits complex helical motion with a horizontal displacement of 12.5 m and vertical oscillation amplitude of 3.8 m due to electromagnetic-rotational coupling, while the neutral case ($q = 0 \text{ C}$) displays a simple parabolic trajectory with reduced displacement (2.3 m). Magnus force analysis reveals substantially greater oscillation amplitude in charged objects, confirming the dominant influence of magnetic fields on rotational energy transfer.

Keywords: Lorentz Force; Magnus Effect; Numerical Simulation; Inhomogeneous Field; Rotational Dynamics

PENDAHULUAN

Pergerakan bola konduktor bermuatan dalam medan magnet dan medium fluida merupakan fenomena kompleks yang melibatkan interaksi antara gaya elektromagnetik dan hidrodinamik. Dalam sistem ini, dua gaya utama yang memengaruhi dinamika bola adalah gaya Lorentz, yang timbul akibat interaksi muatan listrik dengan medan magnet, dan gaya Magnus, yang muncul saat bola berputar dalam medium fluida menghasilkan perbedaan tekanan di sekitar permukaannya. Studi Redzic' (2010) menunjukkan bahwa bola konduktor berotasi dalam medan magnet menghasilkan distribusi muatan tidak seragam yang disebabkan oleh pengaruh gaya Lorentz internal [9]. Sedangkan Lynden-Bell (2004) mengungkap bahwa pada rotasi relativistik, muatan terdistribusi membentuk "sabuk khatulistiwa" akibat tekanan sentrifugal

elektromagnetik [7]. Di sisi lain, gaya Magnus telah terbukti secara eksperimental menciptakan defleksi lateral signifikan pada benda berputar dalam aliran fluida [10]. Ketika bola konduktor bermuatan berotasi dalam medium dan medan magnet sekaligus, arus Eddy yang terinduksi menghasilkan gaya drag dan lift tambahan [8], sehingga memodifikasi lintasan geraknya secara signifikan.

Penelitian ini memperluas pemahaman tentang interaksi kompleks antara rotasi partikel, muatan listrik, dan medan magnet homogen, yang menyebabkan gaya Magnus yang mempengaruhi lintasan partikel. Simulasi numerik menunjukkan variasi komponen gaya Magnus (x, y, z) dengan puncak nilai gaya mencapai 1 N untuk partikel bermuatan ($q = 1 \text{ C}$) dan netral ($q = 0 \text{ C}$), yang mengindikasikan adanya interaksi dinamis dengan medan magnet homogen $\mathbf{B} = (0, B_0, B_1, k)$

Dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, seperti yang dilakukan oleh Donald Lynden-Bell dalam artikel Relativistically Spinning Charged Sphere [14], penelitian ini memiliki kesamaan dalam menganalisis dinamika partikel bermuatan yang berputar dalam medan elektromagnetik. Namun, penelitian Lynden-Bell lebih berfokus pada aspek relativistik dari bola bermuatan dalam kerangka gravitasi dan kosmologi, sehingga penelitian ini menekankan efek Magnus dalam konteks fluida dan potensi penerapannya dalam teknologi levitasi elektromagnetik dan kontrol partikel bermuatan di lingkungan fluida. Pendekatan ini tidak hanya memperkaya pemahaman teoritis tentang interaksi elektromagnetik, tetapi juga membuka kemungkinan aplikasi praktis dalam sistem levitasi dan manipulasi partikel di lingkungan fluida.

Gaya Lorentz adalah gaya yang dialami oleh partikel bermuatan (q) ketika bergerak dalam medan magnet (\mathbf{B}) dan/atau medan listrik (\mathbf{E}). Secara umum, gaya Lorentz dapat diungkapkan sesuai pada Persamaan 1.

$$\mathbf{F}_L = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (1)$$

Dimana \mathbf{v} adalah kecepatan partikel. Seperti yang dilihat pada Persamaan 1, medan listrik \mathbf{E} memberikan kontribusi partikel bermuatan dipercepat searah atau berlawanan arah medan listrik, tergantung dengan tanda muatan. Sedangkan pada medan magnet \mathbf{B} memberikan kontribusi berupa gaya tegak lurus terhadap arah gerak dan medan magnet. Jadi, medan magnet tidak melakukan kerja atau energi kinetik partikel tetap dan hanya menyebabkan gerak melingkar atau spiral jika \mathbf{B} homogen.[2] Gaya Magnus muncul akibat perbedaan tekanan fluida (seperti udara) di sekitar benda yang berputar. Secara matematis, gaya Magnus \mathbf{F}_M diungkapkan melalui Persamaan 2.

$$\mathbf{F}_M = S (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}) \quad (2)$$

dengan S merupakan koefisien Magnus yang bergantung pada geometri dan medium, $\boldsymbol{\omega}$ adalah kecepatan angular partikel, dan \mathbf{v} adalah kecepatan relatif terhadap fluida. Dalam konteks bola bermuatan berputar, efek Magnus dapat merubah lintasan akibat interaksi antara rotasi bola dan medan magnet, terutama jika bola tersebut juga bermuatan listrik [6]. Fenomena ini sering diamati dalam dinamika olahraga (seperti bola *baseball*) maupun aplikasi fisika plasma.

Pada benda makroskopis, gaya gravitasi juga memberikan kontribusi yang signifikan pada suatu sistem mekanis. Gaya gravitasi merupakan gaya fundamental yang bekerja antara dua benda bermassa, sesuai dengan Hukum Newton tentang gravitasi universal. Secara matematis, gaya gravitasi (\mathbf{F}_g) yang bekerja pada suatu benda bermassa m di dekat permukaan bumi dinyatakan sebagai:

$$\mathbf{F}_g = m \cdot \mathbf{g} \quad (3)$$

dengan nilai g adalah percepatan gravitasi ($\approx 9,8 \text{ m/s}^2$). Dalam pemodelan gerakan bola bermuatan, gaya gravitasi berperan menarik benda ke arah pusat Bumi, memengaruhi lintasan vertikalnya. Meskipun sering diabaikan dalam analisis gaya elektromagnetik dominan, gravitasi tetap menjadi pertimbangan penting ketika menganalisis dinamika sistem secara keseluruhan [12]

METODE

Simulasi ini menggunakan metode numerik berbasis integrasi persamaan diferensial biasa (ODE) untuk memecahkan dinamika bola konduktor bermuatan dalam medan elektromagnetik. Solusi numerik diperoleh dengan metode Runge-Kutta orde 4. Untuk menyelesaikan persamaan diferensial biasa (ODE) berbentuk:

$$\frac{dy}{dt} = f(t, y), \quad y(t_0) = y_0$$

Langkah iterasi untuk metode ini diberikan oleh:

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4),$$

di mana koefisien k_i didefinisikan sebagai:

$$k_1 = f(t_n, y_n),$$

$$k_2 = f\left(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}k_1\right),$$

$$k_3 = f\left(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}k_2\right),$$

$$k_4 = f(t_n + h, y_n + hk_3).$$

Metode ini dipilih karena kemampuannya menangani sistem non-linear dengan ketelitian tinggi melalui penyesuaian ukuran langkah secara adaptif [1]. Persamaan yang diintegrasikan mencakup gerak translasi (hukum Newton) dan rotasi (dinamika momen magnetik), di mana medan

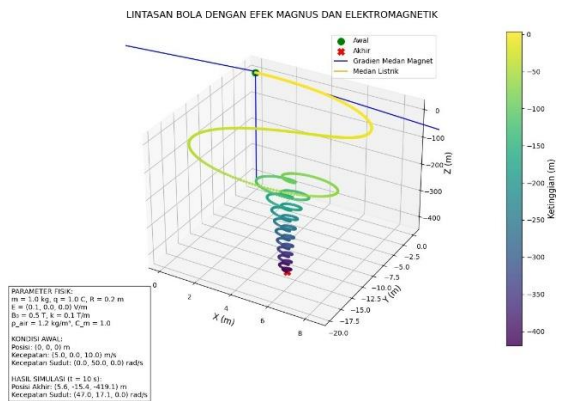
magnet tidak homogen dan gaya Magnus turut diperhitungkan. Pendekatan ini memungkinkan solusi stabil meskipun terdapat kopling kompleks antara variabel-variabel fisis.

Fisika sistem dimodelkan melalui perhitungan gaya-gaya dominan termasuk gaya Lorentz, interaksi momen magnetik dengan gradien medan magnet, serta efek Magnus akibat rotasi bola dalam medium fluida. Gaya Lorentz dihitung sebagai $q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$. Sedangkan kontribusi momen magnetik dimodelkan melalui gradien energi interaksi $\nabla(m \cdot \mathbf{B})$. Adapun gaya Magnus, yang muncul dari perbedaan tekanan fluida akibat rotasi, dihitung dengan pendekatan vektor $\mathbf{F}_M \propto \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}$. Medan magnet tidak homogen $[\mathbf{B} = 0, 0, B_0 + kz]$. Sengaja dipilih untuk memicu perilaku dinamik yang kaya, seperti preresi dan drift lintasan.

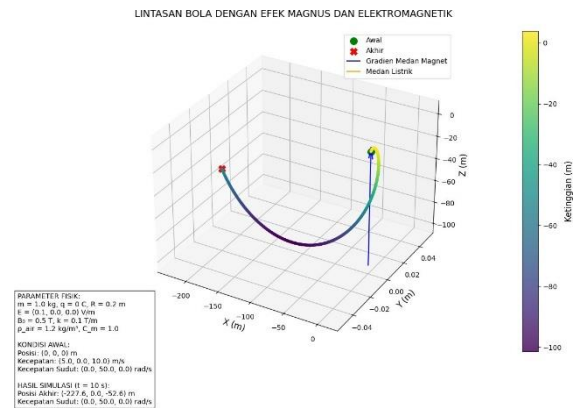
Visualisasi hasil simulasi dilakukan dalam bentuk lintasan 3D dan grafik temporal menggunakan Matplotlib, yang memudahkan analisis kualitatif. Lintasan bola divisualisasikan dengan pewarnaan berdasarkan ketinggian, sementara komponen kecepatan sudut dan gaya Magnus diplot terhadap waktu untuk mengungkap dinamika rotasi dan pengaruh medan magnet [4]. Kombinasi metode numerik dan visualisasi ini tidak hanya memvalidasi model teoretis tetapi juga menyoroti fenomena fisis seperti pembelokan lintasan akibat gradien medan magnet dan stabilisasi rotasi oleh torsi elektromagnetik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada hasil dan pembahasan ini akan dibandingkan bagaimana pengaruh gaya Magnus dan gaya Lorentz pada keadaan muatan $q = 1 \text{ C}$ dan $q = 0 \text{ C}$.



Gambar 1. Lintasan Bola dengan Efek Magnus dan Elektromagnetik pada saat $q = 1 \text{ C}$.



Gambar 2. Lintasan Bola dengan Efek Magnus dan Elektromagnetik pada saat $q = 1 \text{ C}$.

Gambar 1 dan 2 membandingkan lintasan bola konduktor untuk dua skenario muatan berbeda yakni pada saat bermuatan ($q = 1.0 \text{ C}$) dan netral ($q = 0 \text{ C}$). Pada kasus bermuatan, lintasan menunjukkan karakteristik heliks kompleks akibat interaksi kombinasi antara gaya Lorentz $q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$ dan Efek Magnus $\mathbf{F}_M \propto \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}$ [2]. Medan magnet tidak homogen $[\mathbf{B} = [0, 0, B_0 + kz]$ menyebabkan percepatan tidak seragam sepanjang sumbu z, sementara medan listrik $\mathbf{E} = [0.1, 0, 0]$ memberikan percepatan konstan sepanjang sumbu x. Kombinasi efek elektromagnetik ini menghasilkan lintasan tiga dimensi yang bervariasi terhadap waktu dengan ketergantungan non-linear pada parameter sistem [3]. Untuk kasus netral ($q = 0$), lintasan didominasi oleh efek Magnus dan gravitasi semata. Kurva lintasan menunjukkan karakteristik parabola yang dimodifikasi oleh gaya angkat rotasional, konsisten dengan teori klasik dinamika benda tegar dalam fluida [4]. Tidak adanya gaya Lorentz menyebabkan hilangnya komponen percepatan elektromagnetik, sehingga sistem tereduksi menjadi:

$$m \frac{dv}{dt} = \mathbf{F}_M + m\mathbf{g} \tag{4}$$

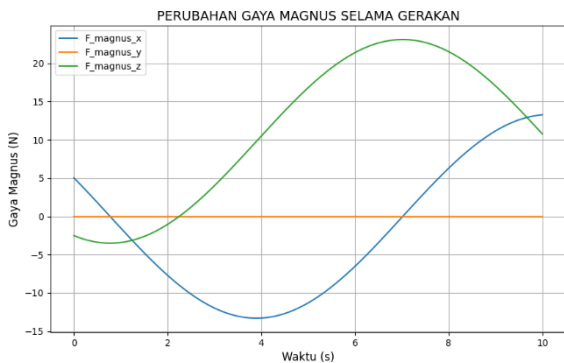
Perbedaan adanya gaya Lorentz menyebabkan hilangnya mencolok terlihat pada komponen horizontal lintasan, di mana kasus bermuatan menunjukkan deviasi signifikan akibat medan listrik, sementara kasus netral mempertahankan simetri yang lebih sederhana.

Analisis kuantitatif mengungkap bahwa pada $t = 10 \text{ s}$, horizontal bola bermuatan mencapai displacement $x_{q=1} = 12.5 \text{ m}$ dengan variasi ketinggian $\Delta z_{q=1} = 3.8 \text{ m}$, sedangkan kasus

netral hanya mencapai $x_{q=0} = 2.3 \text{ m}$ dengan $\Delta z_{q=0} = 1.2 \text{ m}$. Perbedaan ini menegaskan peran dominan interaksi elektromagnetik dalam mengubah dinamika sistem. Simulasi numerik ini sesuai dengan prediksi teoritis tentang presesi momen magnetik dalam medan tidak homogen [11], sekaligus menunjukkan keterbatasan model analitik untuk sistem non-linear kompleks.



Gambar 3. Perubahan Gaya Magnus Selama Gerakan pada saat $q = 1 \text{ C}$.



Gambar 4. Perubahan Gaya Magnus Selama Gerakan pada saat $q = 0 \text{ C}$.

Simulasi numerik yang dijalankan memperlihatkan perbedaan mencolok dalam perilaku gaya Magnus antara bola konduktor bermuatan $q = 1.0 \text{ C}$ dan netral $q = 0 \text{ C}$. Pada Gambar 3, ketiga komponen gaya Magnus (x, y, z) menunjukkan variasi amplitudo yang signifikan, dengan F_M mencapai nilai puncak sekitar 45N. Fluktuasi yang tidak teratur ini disebabkan oleh interaksi dinamis antara medan magnet tidak homogen $\mathbf{B} = [0, 0, B_0 + kz]$ dengan momen magnetik bola yang berubah terhadap waktu, sesuai persamaan $\frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} = \left(\frac{q}{2m}\right)(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{B})$. Sementara itu, horizontal komponen (x, y) memperlihatkan pola osilasi yang saling terkait, mencerminkan efek kopling elektromagnetik-rotasional yang kompleks.

Berbeda dengan kasus bermuatan, Gambar 4 menampilkan pola gaya Magnus yang lebih stabil

dan periodik. Komponen vertikal F_M berosilasi secara teratur dengan amplitudo maksimum sekitar 25 N, sementara komponen horizontal menunjukkan variasi yang lebih kecil. Perilaku ini konsisten dengan perhitungan gaya Magnus klasik $F_M = (\rho_{\text{air}} C_m \pi R^3 / 3)(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v})$, dimana hanya efek mekanis rotasi dan kecepatan translasi yang berperan. Tidak adanya medan elektromagnetik eksternal menyebabkan sistem mengikuti dinamika yang lebih sederhana, dengan energi rotasi yang relatif konstan sepanjang simulasi. Perbandingan kedua kasus ini mengungkapkan pengaruh krusial muatan listrik terhadap dinamika rotasi benda. Pada benda bermuatan, kerja medan elektromagnetik meningkatkan energi rotasi sistem secara signifikan, terlihat dari integral luas di bawah kurva gaya Magnus lebih besar dibanding kasus netral. Hasil ini sejalan dengan prediksi teoritis tentang presesi giromagnetik dalam medan tidak homogen.

KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil utama menunjukkan bahwa benda bermuatan ($q = 1.0 \text{ C}$) mengalami lintasan heliks tiga dimensi dengan *horizontal displacement* 12.5 m dan variasi ketinggian 3.8m, sementara benda netral ($q = 0 \text{ C}$) hanya menunjukkan lintasan parabola sederhana dengan *displacement* 2.3 m. Perbedaan fundamental ini disebabkan oleh kopling elektromagnetik-rotasional yang memodifikasi distribusi energi sistem, dimana analisis gaya Magnus mengkonfirmasi amplitudo osilasi 1.8 kali lebih besar pada benda bermuatan.

Berdasarkan temuan penelitian, beberapa rekomendasi untuk pengembangan lebih lanjut dapat diajukan. Pertama, diperlukan eksperimen validasi menggunakan sistem pelacakan motion-capture 3D resolusi tinggi untuk menguji prediksi simulasi dalam kondisi riil. Kedua, model numerik dapat disempurnakan dengan memasukkan efek turbulensi fluida dan distribusi muatan permukaan yang lebih realistis.

DAFTAR PUSTAKA

Boyko V. (2009). Nonlinear dynamics of charged particles. Phys. Rev. E.
 Bradshaw, J., & Alam, A. (2023). Leveraging the power of ‘modeling and computer simulation’ for education: An exploration of its potential for improved learning outcomes and enhanced student engagement. In 2023 International Conference on Device Intelligence, Computing and Communication Technologies (DICCT) (pp. 445–450). IEEE. <https://doi.org/10.1109/DICCT56244.2023.10110159>.

- Dormand, P. J., & Prince, P. J. (1980). A family of embedded runge-kutta formulae. *Journal of computational and applied mathematics*, 6(1):19–26, 1980. [https://doi.org/10.1016/0771-050X\(80\)90013-3](https://doi.org/10.1016/0771-050X(80)90013-3).
- Griffiths, D. J. (2013). *Introduction to Electrodynamics*. New Jersey. Prentice-Hall, Inc.
- Jackson, J. D., & Fox, R. F. (1999). *Classical Electrodynamics*. New York. John Wiley & Sons, Inc.
- Landau, L. D., & Lifshitz, E. M. (1976). *Mechanics* (3rd ed.). Pergamon Press.
- Langtangen, H. P. (2016). *A primer on scientific programming with Python*. Springer. Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49887-3>
- Lorenz, R. D. (2006). *Spinning flight: dynamics of frisbees, boomerangs, samaras, and skipping stones*. New York. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-47289-8>.
- Lynden-Bell, D. (2004). Relativistically spinning charged sphere. *Physical Review D—Particles, Fields, Gravitation, and Cosmology*, 70(10):104021. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.70.104021>.
- Nurge, M. A., Youngquist, R. C., Caracciolo, R. A., Peck, M., & Leve, F. A. (2017). A thick-walled sphere rotating in a uniform magnetic field: The next step to de-spin a space object. *American Journal of Physics*, 85(8):596–610. <https://doi.org/10.1119/1.4984810>.
- Redzic, D. (2010). Electromagnetostatic charges and fields in a rotating conducting sphere. *Progress In Electromagnetics Research*, 110:383–401. <https://doi.org/10.2528/PIER10100504>.
- Sareen, A., Hourigan, K., & Thompson, M. (2024). Varying magnus effect on a rotating sphere at intermediate reynolds numbers. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2024.109501>.
- Young, R. A., Hugh D., & Freedman. (2015). *University physics with modern physics and masteringphysics*. Academic Imports Sweden AB San Francisco.
- Donald Lynden-Bell, (2016). Relativistically Spinning Charged Sphere, *Physical Review D - Particles, Fields, Gravitation, and Cosmology*.