JURNAL ILMU FISIKA DAN TERAPANNYA
Volume 13 Edisi 02, Oktober, 2026, Halaman 88-93
DOI: *10.21831/jifta.v13i2.29004* **e-ISSN: 3026-5983**

KAJIAN LITERATUR PENGARUH AIR GAP TERHADAP PEFORMA GENERATOR MAGNET PERMANEN

LITERATURE REVIEW ON THE EFFECT OF AIR GAP ON THE PERFORMANCE OF PERMANENT MAGNET GENERATORS

Giovanni Krisostomos Ory Putra*, Universitas Negeri Yogyakarta
*e-mail: giovannikrisostomos.2022@student.uny.ac.id

Abstrak. *Air gap* merupakan salah satu parameter penting yang mempengaruhi peforma generator magnet permanen, terutama pada Linear Magnet Permanen Generator (LPMG). Variasi *air gap* berpengaruh terhadap distribusi fluks magnetic, tegangan induksi, daya keluaran, dan efisiensi generator. Artikel ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh variasi *air gap* terhadap peforma generator magnet permanen berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah studi literatur dengan mengumpulkan dan menganalisis berbagai artikel ilmiah dari berbagai database. Hasil kajian menunjukkan bahwa semakin kecil nilai *air gap*, maka densitas fluks magnetic yang melewati kumparan semakin besar sehingga tegangan induksi dan daya keluaran generator meningkat. Sebaliknya, peningkatan *air gap* menyebabkan reluktansi magnetic bertambah dan menurunkan peforma generator. Namun, penggunaan *air gap* yang terlalu kceil juga dapat menimbulkan kendala mekanik seperti gesekan rotor dan stator serta vibrasi sistem. Oleh karena itu, optimasi *air gap* diperlukan untuk memperoleh keseimbangan antara peforma elektromagnetik dan keandalan mekanik generator. Secara umum, hasil studi literatur menunjukkan bahwa pemilihan nilai *air gap* yang tepat sangat penting dalam meningkatkan peforma Linear Permanent Magnet Generator.

Kata Kunci: air gap, Generator magnet permanen, densitas fluks magnetic, efisiensi generator, tegangan keluaran.

***Abstract**. The air gap is a critical parameter affecting the performance of permanent magnet generators, particularly in Linear Permanent Magnet Generators (LPMG). Variations in the air gap influence magnetic flux distribution, induced voltage, output power, and generator efficiency. This article aims to examine the impact of air gap variations on the performance of permanent magnet generators, based on existing research. The methodology employed is a literature review, involving the collection and analysis of scientific articles from various databases. The findings indicate that a smaller air gap results in a higher magnetic flux density passing through the coils, which in turn increases the induced voltage and output power of the generator. Conversely, an increase in the air gap leads to higher magnetic reluctance, thereby reducing generator performance. However, an excessively small air gap can introduce mechanical challenges, such as friction between the rotor and stator, as well as system vibrations. Therefore, optimizing the air gap is essential to achieve a balance between electromagnetic performance and mechanical reliability. In general, this literature review demonstrates that selecting an appropriate air gap value is crucial for enhancing the performance of Linear Permanent Magnet Generators.*

Keywords: air gap, permanent magnet generator, magnetic flux density, generator efficiency, output voltage.

PENDAHULUAN

Pembangkit kebutuhan energi listrik mendorong pengembangan teknologi pembangkit yang lebih efisien dan berkelanjutan, salah satunya adalah *Permanent Magnet Generator* (PMG). *Linear permanent magnet generator* (LPMG) merupakan salah satu jenis pembangkit yang banyak dikembangkan karena mampu mengubah energi mekanik gerak linear menjadi energi listrik secara langsung dengan konstruksi yang sederhana dan efisiensi yang tinggi. Kinerja generator dipengaruhi oleh beberapa parameter desain, salah satunya adalah *Air gap*.

Air gap adalah celah udara antar magnet dan kumparan yang mempengaruhi distribusi fluks magnetik. Perubahan *air gap* dapat mempengaruhi densitas fluks magnetic, tegangan induksi, daya keluaran, dan efisiensi generator. Semakin besar *air gap*, maka fluks magnetic yang mengalir cenderung menurun sehingga performa generator ikut berkurang. Berdasarkan hukum faraday yang menyarakan bahwa perubahan fluks magnetic menghasilkan gaya gerak listrik pada kumparan, maka besar tengangan induksi dipengaruhi oleh perubahan fluks magnetik. Hal ini membuktikan bahwa parameter *air gap* menjadi faktor penting dalam menentukan peforma generator. Oleh karena itu, artikel ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh variasi *air gap* terhadap peforma *Linear permanent magnet generator* (LPMG) berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu.

METODE

Metode yang digunakan dalam artikel ini adalah studi literatur dengan mengumpulkan dan menganalisis berbagai penelitian terdahulu yang berkaitan dengan pengaruh *air gap* terhadap *Linear permanent magnet generator* (LPMG). Litaratur diperoleh dari beberapa database ilmiah, seperti Google Scholar, IEEE Xplore, ScienceDirect, dan Springer. Kata kunci yang digunakan dalam pencarian meliputi *air gap, permanent magnet generator, linear generator, flux density, output voltage,* dan *generator efficiency.*

Artikel yang digunakan berasal dari jurnal internasional, prosiding, dan publikasi ilmiah yang relevan. Selanjutnya, literatur dipilih berdasarkan kesesuain topik, metode penelitian, serta parameter yang dianalisis, seperti densitas fluks magnetic, tegangan induksi, daya keluaran, dan efisiensi generator. Data dan hasil penelitian untuk mengetahui pengaruh variasi *air gap* terhadap peforma generator magnet permanent.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Berdasarkan hasil kajian dari berbagai penelitan terdahulu, parameter *air gap* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap peforma generator magnet permanen, terutama terhadap idensitas fluks magnetik, tegangan induksi, daya keluaran, dan efisiensi generator. Sebagian besar penelitian menunjukkan bahwa semakin kecil nilai *air gap,* maka distribusi fluks magnetic yang melewati kumparan semakin besar sehingga tegangan induksi generator meningkat. Sebaliknya, peningkatan *air gap* menyebabkan reluktansi magnetic bertambah dan mengurangi fluks magnetic pada sistem generator.

Prinsip hubungan antara *air gap* dan tegangan induksi dapat dijelaskan menggunakan hukum Faraday:

$$E = -N\frac{d\Phi}{dt}$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa besar tegangan induksi dipengaruhi oleh perubahan fluks magnetic terhadap waktu. Ketika *air gap* diperbesar, maka fluks magnetic yang memotong kumparan akan menurun sehingga tegangan induksi generator juga mengalami

penurunan. Hasil perbandingan berbagai penelitian mengenai pengaruh *air gap* terhadap peforma generator magnet permanen ditunjukkan pada Tabel 1.

No	Peneliti	Objek Penelitian	Variasi/ Kondisi *Air gap*	Hasil Utama
1	(Indriani, n.d.)	Generator sinkron dengan magnet rotor 8 kutub tanpa beban	1 – 3 mm	Semakin besar *air gap* maka daya keluaran akan menurut karena fluks magnetik berkurang sekitar 10 – 20%.
2	(Khikmah *et al*., 2021)	Generator axial flux double side rotor 1 fasa dengan kutub berlawanan	8 – 10 mm	Penelitian menggunakan magnet neodymium iron boron (NdFeB) disusun secara berlawanan (N – S) dan menggunakan beban 3 LED disusun secara seri pada kecepatan 3000 rpm, pada penelitian ini didapatkan hasil bahwa setiap *air gap* melebar maka penurunan tegangan output terjadi.
3	(S *et al*., 2017)	Generator listrik fluks aksial berbasis magnet permanen NdFeB	7 – 20 mm	Peningkatan remanansi magnet berbanding lurus terhadap peningkatan output tegangan. Sebaliknya, peningkatan ukuran *air gap* menurunkan tegangan output secara linear.
4	(Kurniawan *et al*., 2021)	Motor brushless DC radial fluks	0.3 – 1.5 mm	pengujian variasi lebar *air gap* menggunakan kecepatan putar 1000 rpm. Dari penelitian disimpulkan bahwa variasi lebar celah udara berpengaruh pada hasil keluaran nilai torsi dan efisiensi jika lebar *air gap* diperkecil
5	(Abduh *et al*., 2025)	Permanent magnet generator for a very low wind speed	Double-skew	Memberikan efisiensi sebesar 99.2% jika dibandingkan dengan model dasar.
6	(Jung *et al*., 2025)	Permanent Magnet Synchronous in Wave Power Applications	-	Efisiensi keseluruhan menurun dari 94,03% menjadi 91,2% akibat peningkatan kerugian ini.

No	Peneliti	Objek Penelitian	Variasi/ Kondisi *Air gap*	Hasil Utama
7	(Hu *et al*., 2025)	High-speed slotless permanent magnet synchronous motor	-	Peningkatan akurasi sebasar 6,8% dibandingkan dengan desain yang tidak mempertimbangkan aliran udara pada celah udara.
8	(He *et al*., 2024)	Winding insulation in PMSG	0.1 – 0.3 mm	Pada eksentrisitas celah udara statis aksial, suhu pada lilitan menurun.
9	(Nakhoda & Saleh, 2020)	Permanent Magnet Generator with low rotation multi-disc axial flux	2 – 5 mm	Semakin besar *air gap* maka akan semakin berkurang juga voltase yang dihasilkan
10	(Pamungkas *et al*., 2020)	Generator magnet permanen fluks aksial satu fasa	2 – 6 mm	variasi 2; 3; 4; 5; dan 6 mm menghasilkan tegangan induksi sebesar 91.7; 89.0; 86.5; 80.2; dan 68.5 V, serta daya sebesar 14;12; 10,9; 10,5; dan 8,8 W.

Pembahasan

Berdasarkan hasil kajian literatur pada Tabel.1, Sebagian besar penelitian menunjukkan bahwa parameter *air gap* memiliki hubungan langsung dengan peforma elektromagnetik generator magnet permanen. Semakin kecil *air gap*, maka kopling magnetic antara magnet permanen dan kumparan menjadi lebih kuta sehingga densitas fluks magnetic yang melewati kumparan meningkat. Kondisi ini menyebabkan tegangan induksi dan daya keluaran generator menjadi lebih besar.

Penelitian oleh (Pamungkas *et al*., 2020) membuktikan bahwa variasi *air gap* dari 2 mm hingga 6 mm menyebabkan penurunan hasil tegangan induksi dari 91,7 V menjadi 68,5 V dan daya keluaran dari 14 W menjadi 8,8 W. Hasil tersebut menunjukan bahwa peningkatan *air gap* mengurangi jumlah fluks magnetic yang memotong kumparan sehingga gaya gerak listrik yang dihasilkan generator juga menurun. Temuan serupa juga ditemukan oleh (Nakhoda & Saleh, 2020) yang menyatakan bahwa semakin besar *air gap*, maka tegangan keluaran generator fluks aksil multi-disc semakin menurun. Secara teoritis, hasil tersebut sesuai dengan hukum faraday yang menyatakan bahwa tegangan induksi dipengaruhi oleh perubahan fluks magnetic terhadap waktu. Ketika *air gap* diperbesar, maka reluktansi magnetik meningkat sehingga fluks magnetic yang mengalir pada inti generator menjadi lebih kecil. Akibatnya, perubahan fluks magnetic yang memotong kumparan juga menurun dan tegangan induksi generator menjadi lebih kecil.

Selain mempengaruhi tegangn induksi, beberapa penelitian juga menunjukan bahwa *air gap* memiliki pengaruh terhadap efisiensi dan kestabilan peforma generator. Penelitian (Abduh *et al*., 2025) menunjukkan bahwa desain generator dengan metode double-skew mampu meningkatkan efisiensi hingga 99,2% dibandingkan dengan model dasar. Sementara penelitian (Jung *et al*., 2025) menunjukkan peningkatan kerugian akibat kondisi tertentu pada celah udara menyebabkan efisensi generator menurun dari 94.03% menjadi 91.2%. Hal ini menunjukkan

bahwa distribusi medan magnet pada *air gap* sangat mempengaruhi peforma elektromagnetik generator secara keseluruhan. Pada penelitian motor Brushless DC flux oleh (Kurniawan *et al*., 2021) dengan variasi *air gap* dari 0.3 mm hingga 0.5 mm menunjukkan bahwa semakin kecil celah udara maka nilai torsi dan efisiensi motor meningkat. Walaupun penelitian dilakukan pada motor listrik, prinsip elektromagnetiknya memiliki kesamaan dengan generator magnet permanen, yaitu semakin kecil jarak antara magnet dan kumparan maka medan magnet yang dihasilkan menjadi lebih kuat.

Beberapa penelitian terbaru juga membahas tentang pengaruh kondisi *air gap* terhadap aspek termal dan kestabilan sistem generator. Penelitian (Hu et al., 2025) menunjukkan bahwa eksentrisitas celah udara statis aksial mempengaruhi distribusi temperature pada lilitan generator. Selain itu, penelitian (Hu et al., 2025) juga dengan mempertimbangkan aliran udara pada celah udara dapat meningkatkan akurasi desain hingga 6.8% dibandingkan desain yang tidak mempertimbangkan aliran udara pada *air gap*.

Meskipun *air gap* yang kecil mampu meningkatkan peforma elektromagnetik generator, penggunaan *air gap* yang terlalu kecil juga dapat menimbulkan beberapa kendala mekanik, seperti gesekan atara rotor dan stator, vibrasi sistem, serta kesulitan manufaktur akibat toleransi mekanik yang sempat. Oleh karena itu, optimasi *air gap* perlu mempertimbangkan keseimbangan antara peforma elektromagnetik dan keandalan mekanik generator.

Secara keseluruhan, hasil kajian menunjukkan bahwa *air gap* merupakan salah satu parameter utama dalam deain generator magnet permanen. Pemilihan nilai *air gap* yang tepat sangat penting untuk menghasilkan distribusi fluks magnetic yang optimal sehingga generator mampu menghasilkan distribusi fluks magnetic yang optimal sehingga generator mampu menghasilkan tegangan induksi, daya keluaran, dan efisiensi yang lebih baik tanpa mengurangi stabilitas mekanik sistem generator.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian literatur yang telah dilakukanm dapat disimpulkan bahwa parameter *air gap* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap peforma generator magnet permanen, terutama terhadap densitas fluks magnetic, tegangan induksi, daya keluaran, dan efisiensi generator. Sebagian besar penelitian menunjukkan bahwa semakin kecil nilai *air gap*, maka fluks magnetik yang melewati kumparan semakin besar sehingga tegangan induksi dan daya keluaran generator semakin meningkat. Sebaliknya, peningkatan *air gap* menyebabkan reluktansi magnetic bertambah sehingga fluks magnetic dan peforma generator mengalami penurunan.

Selain mempengaruhi karakteristik elektromagnetik, variasi *air gap* juga berpengaruh terhadap kestabilan dan efisiensi sistem generator. Namun, penggunaan *air gap* yang terlalu kecil dapat menimbulkan kendala mekanik seperti gesekan rotor dan stator, vibrasi, serta kesulitan dalam proses manufaktur akibat toleransi mekanik yang sempit. Oleh karena itu, optimasi *air gap* perlu mempertimbangkan keseimbangan antara peforma elektromagnetik dan keandalan mekanik generator.

Secara umum, hasil studi literatur menunjukkan bahwa penelitian nilai *air gap* yang tepat merupakan salah satu faktor penting dalam perancangan *Linear Permanent Magnet Generator* (LPMG) untuk memperoleh peforma generator yang optimal. Penelitian lanjutan masih diperlukan, terutama terkait optimasi *air gap* yang dikombinasikan dengan parameter lain seperti jumlah lilitan, frekuensi, frekuensi gerak linear, dan konfigurasi magnet permanen.

DAFTAR PUSTAKA

Abduh, S., Karunanithi, S. and Nur, T. (2025) ‘Analysis of the cogging torque reduction in permanent magnet generator for a very low wind speed’.

He, Y., Bai, Y., Zhang, W., Li, Y., Xu, M. and Wang, X. (2024) ‘Impact of 3D air gap eccentricity on winding insulation temperature characteristic in PMSG’, Alexandria Engineering Journal, 93, pp. 220–235. Available at: https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.03.015.

Hu, H., Lin, Z., Cao, G., Guo, M. and Huang, S. (2025) ‘Design and analysis of a high-speed slotless permanent magnet synchronous motor considering air-gap airflow’, pp. 1–15.

Indriani, A. (n.d.) ‘Analisis pengaruh variasi jumlah kutub dan jarak celah magnet rotor terhadap performan generator sinkron fluks radial’, 9(2).

Jung, W., Kim, Y., Choi, Y., Shin, K. and Choi, J.-Y. (2025) ‘Electromagnetic and NVH characteristic analysis of eccentric state for surface-mounted permanent magnet synchronous generators in wave power applications’, pp. 1–13.

Khikmah, Q., Hadi, W. and Cahyadi, W. (2021) ‘Analisis pengaruh air gap (celah udara) terhadap unjuk kerja generator axial flux double side rotor 1 fasa dengan kutub berlawanan (N-S)’, (3), pp. 87–96.

Kurniawan, R., Hakim, E.A., Irfan, M. and Artikel, I. (2021) ‘Analisis pengaruh variasi lebar air gap pada motor brushless DC radial fluks’, 1(1), pp. 1–7.

Nakhoda, Y.I. and Saleh, C. (2020) ‘The effect of air gap distance variation between stator and rotor in permanent magnet generator with low rotation multi-disc axial flux’, 3(1), pp. 55–64.

Pamungkas, B.G., Suyitno, Daryanto and Sebayang, P. (2020) ‘Pengaruh dimensi magnet permanen NdFeB dan jarak celah udara terhadap kinerja generator magnet permanen fluks aksial satu fasa’, 2.

S, A.M.S., Kurniawan, C. and Sebayang, P. (2017) ‘Efek air gap pada rancang bangun dan uji performa’, 1(1), pp. 6–12.