

PENGARUH VARIABEL CELAH UDARA TERHADAP FLUKS MAGNET PADA GENERATOR PERMANEN MAGNETIK AXIAL FLUKS

Syafriyudin¹, M. Suyanto², Prastyono Eko. P³

¹²³Jurusan Teknik Elektro Universitas AKPRIND Indonesia

Email:dien@akprind.ac.id,myanto@akprind.ac.id dan prasetyono@akprind.ac.id

Masuk: 28 Februari 2024, Revisi masuk:25 Maret 2024, Diterima: 28 Maret 2024

ABSTRACT

Generators that use permanent magnets do not require initial excitation to produce voltage. where the generator design is an axial flux type using a ceramic type permanent magnet (NdFeB), and uses two flanking stator rotors. For electricity use, the AC voltage is changed to DC voltage using a rectifier for charging the accumulator. The air gap in an axial flux generator is the distance between the rotor and stator. The air gap is also a place for the magnetic field to move through the coils in the stator which ultimately produces a magnetic flux value which will influence the amount of induced voltage produced. The faster the rotation produced, the greater the voltage produced, but the frequency value will also increase, so that this generator is only limited to 400 rpm rotation, at a frequency value of 50 Hz, producing an effective voltage of ± 22 V with an air gap distance (δ) is 2 mm, the frequency measurement has an error of 10-20 Hz and an error percentage of 5-10%, with the results of the induced current measurement having the same voltage.

Keywords: axial generator, air gap, permanent magnet.

INTISARI

Generator yang menggunakan magnet permanen tidak memerlukan eksitasi awal dalam menghasilkan tegangan. dimana desain generator adalah tipe aksial fluks menggunakan magnet permanen tipe keramik (NdFeB), serta menggunakan dua rotor stator mengapit. Untuk penggunaan listrik, tegangan AC berubah menjadi tegangan DC menggunakan penyearah untuk pengisian akumulator. Celah udara pada generator aksial fluks adalah jarak antara rotor dan stator. Celah udara juga menjadi tempat perpindahan medan magnet melewati kumparan pada stator yang akhirnya menghasilkan nilai fluks magnet yang akan mempengaruhi besaran tegangan induksi yang dihasilkan. Semakin cepat putaran yang dihasilkan, maka akan semakin besar tegangan yang dihasilkan, akan tetapi nilai frekuensi juga akan meningkat, sehingga generator ini hanya dibatasi dengan putaran 400 rpm, pada nilai frekuensi 50 hz., menghasilkan tegangan efektif ± 22 V dengan jarak celah udara (δ) sebesar 2 mm, pengukuran frekuensi memiliki kesalahan sebesar 10-20 Hz dan persentase kesalahan sebesar 5-10 %, dengan hasil pengukuran arus induksi yang memiliki besar tegangan yang sama.

Kata kunci: generator aksial, celah udara, magnet permanen.

Kata-kata kunci: generator aksial, celah udara, magnet permanen.

PENDAHULUAN

Generator magnet permanen aksial fluks semakin banyak digunakan dalam berbagai aplikasi. Bagian utama generator magnet permanen fluks aksial adalah rotor dan stator, rotor memiliki magnet permanen untuk menghasilkan kerapatan fluks aksial, generator magnet permanen aksial fluks semakin banyak digunakan Karena mempunyai efisiensi tinggi, berat, ukuran kecil, dan andal. Bagian utama generator magnet permanen fluks aksial adalah rotor dan stator. bagian rotor memiliki magnet permanen untuk menghasilkan kerapatan

fluks aksial. Rancangan yang sederhana adalah stator tunggal – rotor tunggal. Bentuknya juga banyak tersedia seperti rotor ganda-stator-tunggal, rotor ganda-stator tunggal, dan desain multi stator-multi rotor.

Pada generator aksial, *air gap* menentukan banyaknya fluks magnetik yang melewati kumparan stator, sehingga menentukan tingkat performa atau daya induksi yang dihasilkan generator tersebut. Konstruksi generator yang dibuat sedemikian rupa seperti ditunjukkan pada Gambar 1, dimana *air gap* tidak berubah

atau konstan selama rotor berputar, Pada generator fluks radial, fluks magnet yang dihasilkan mengarah secara radial (menyebar) dan tegak lurus terhadap poros (*shaft*). Fluks-fluks magnetik yang dihasilkan akan memotong kumparan stator yang disusun di sisi luar rotor. Generator fluks aksial menghasilkan fluks magnetik yang arahnya sejajar (aksial) dengan poros. Efek *air gap* terhadap performa generator listrik tipe fluks aksial berbasis magnet permanen NdFeB dimana peningkatan remanensi magnet berbanding lurus terhadap peningkatan *output* tegangan. Sebaliknya, peningkatan ukuran *air gap* menurunkan tegangan *output* secara linier.

Hal ini disebabkan oleh adanya penurunan magnetik flux density secara eksponensial (Achmad Maulana dkk, 2017). Hubungan antara ukuran celah udara dan kinerja keluaran generator adalah dengan mengubah ukuran celah udara dan mengamati keluarannya. generator dengan Jenis torsi generator AFPM tanpa inti dapat dihubungkan secara paralel untuk mendapatkan tegangan lebih atau secara seri untuk mendapatkan arus lebih besar dan dapat digunakan untuk menghitung kerapatan fluks magnet permanen pada ukuran celah udara yang berbeda, tegangan keluaran generator dan sudut fasa antara masing-masing pasangan fasa dapat dikontrol dengan mengontrol ukuran celah udara, ketika kecepatan poros ditetapkan (Sedat Nazlibilek, Esmail S., dkk, 2017). Desain generator magnet permanen fluks aksial (AFPM) yang digunakan untuk aplikasi drone penggerak listrik hibrida. Tujuan desain generator AFPM adalah kepadatan daya yang tinggi, yang didefinisikan sebagai daya keluaran per berat generator, dan efisiensi yang tinggi. Untuk memenuhi persyaratan aplikasi target dan mempertimbangkan masalah praktis dalam proses pembuatan, struktur generator AFPM yang terdiri dari stator tunggal rotor ganda (DR-SS) (Ji-Young lee, dkk, 2021)

Generator Fluks aksial adalah generator permanen magnet yang paling cocok digunakan pada generator karena sudah banyak digunakan di dunia ini karena memiliki torsi yang tinggi dan rugi-rugi yang lebih sedikit dibandingkan magnet permanen fluks aksial konvensional (Nur Afiqah Mostaman, dkk, 2023). Generator magnet permanen fluks aksial (AFPM) dapat

diaplikasikan untuk kecepatan rendah dan tinggi, desain baru generator AFPM multi-stator multi-rotor (MSMR) tanpa inti penuh dengan susunan magnet konvensional dan Halbach yang dikombinasikan dengan rotor tanpa besi (epoksi). Untuk topologi MSMR mesin AFPM, dan untuk menjaga distribusi fluks magnet yang sama, digunakan magnet di kedua sisi rotor tengah. mengganti rotor besi tengah dengan rotor epoksi tunggal dapat mengurangi bobot mesin, sehingga meningkatkan kepadatan daya dan mengurangi kebocoran fluks pada sisi luar mesin (Asiful Habib, dkk, 2020)

Penggunaan pengontrol beban elektronik (ELC) yang berfungsi untuk menjaga tegangan keluaran magnet permanen fluks aksial (AFPM) tetap konstan ketika beban utama generator AFPM bervariasi, setiap perubahan tegangan keluarannya dirasakan oleh sensor tegangan. Output dari sensor tegangan dimasukkan ke dalam mikrokontroler, yang kemudian memproses sinyal sensor untuk memberikan perintah kepada driver switching. Penggerak switching menghasilkan pulsa untuk konverter arus bolak-balik (ac) untuk mengontrol daya yang diserap oleh dummy (I Made Wiwit Kastawan, dkk, 2020).

Setiap generator yang dijaga konstan seperti panjang aksial celah udara, volume magnet permanen, panjang aksial total generator, diameter luar dan dalam inti stator dan jumlah belitan stator. Selain dimensinya dijaga tetap, masing-masing generator juga disimulasikan dengan besaran arus jangkar (I_a) yang sama sehingga menghasilkan besaran tegangan reaksi jangkar yang sama. Dalam pemilihan generator yang paling memenuhi syarat, terdapat beberapa batasan untuk setiap parameter antara lain kerapatan fluks magnet tidak melebihi 2 T, V_t harus 15 V, V_R harus $\pm 10\%$ sesuai standar EN 50160, THD harus 8% sesuai standar EN 50160. standar EN 61000-2-2 (Ketut Wirtayasa, dkk, 2022).

Mesin magnet permanen menonjol ganda dengan struktur stator ganda diusulkan. Motor dirancang dengan dua stator dengan sudut 45° pada struktur kutub 4/6 motor kutub menonjol ganda. Motor memiliki keunggulan kepadatan daya tinggi, denyut kecil dan efisiensi tinggi. Fluks celah udara dihitung dengan metode rangkaian magnet sederhana. Distribusi medan magnet tanpa beban, kerapatan fluks celah udara dan Fluks magnet permanen (Jie Shen, Lei Mei, 2019)

Jarak optimum (celah udara fiktif) antara magnet permanen pada mesin magnet permanen fluks aksial tanpa biji dengan rotor ganda dan stator tunggal. Kerapatan fluks magnet permanen mengikuti jalur fluks rata-rata antara magnet yang berlawanan. Besar kecilnya fluks bocor tergantung pada jarak aksial antar magnet, jarak antara magnet yang berdekatan dan besi belakang piringan rotor. Jika celah udara fiktif (jarak antara magnet permanen yang berlawanan) terlalu besar, jalur fluks akan menutup melalui magnet yang berdekatan dan bukan magnet yang berlawanan (Franjo Ranjić, Peter Vrtič, 2018). Transformasi induktor magnet permanen menjadi induktor lilitan melalui alat CAD memerlukan banyak kontrol, dimensi kumparan yang tetap dengan memperhitungkan induksi pada celah udara generator fluks aksial dan jumlah kutub. Berdasarkan parameter ini, upaya telah dilakukan untuk mengukur kumparan tunggal yang sesuai dengan magnet permanen varian referensi (D. Lahouel, D. Hedjazi, R. Abdessemed, 2019). Analisis elemen hingga kerapatan fluks magnet antara magnet permanen yang dipasang pada cakram rotor di mana ketebalan celah udara fiktif ditetapkan sebagai variabel untuk menentukan jarak maksimum [Mehmet Recep Minaz, Mehmet Çelebi, 2020] Perancangan generator radial fluks dilakukan dengan meletakkan magnet permanen neodimium N52 dengan dimensi 6 cm x 1 cm x 0,5 cm. Stator diperoleh dari mesin tipe JY2B – 2.

Pengujian dengan penambahan kapasitor menyebabkan kenaikan tegangan. Pada pembebanan resistif 10 sampai 45 Watt, generator mengalami penurunan tegangan dari 58,1 Volt sampai 41,7 Volt.

Semakin meningkat nilai daya beban menyebabkan penurunan nilai tegangan terminal sedangkan nilai arus berbanding lurus dengan daya beban (Manggala Fredson Bully, Syafriyudin, Muhammad Suyanto, 2022), Penerapan perangkat lunak Elemen Hingga Analisis (FEA) digunakan untuk menghitung kerapatan fluks magnet permanen pada ukuran celah udara yang berbeda dengan menggunakan software (ANSOFT Maxwell) nya untuk mengetahui hubungan antara ukuran celah udara dan kinerja keluaran generator dengan mengubah ukuran celah udara (Sedat Nazlibilek, Esmail S. Eb. Mohammed, 2017).

Penelitian ini melakukan proses perancangan dan uji performa generator tipe aksial fluks satu fasa menggunakan magnet permanen NdFeB, karena jenis Magnet permanen NdFeB merupakan magnet remanensi medan magnetik yang paling baik. Analisa unjuk kerja generator dilakukan dengan variasi *air gap* dan kecepatan putar rotor. Generator fluks aksial dirancang menggunakan satu buah stator dan dua buah rotor yang saling berpasangan. Pada bagian stator tersusun kumparan sebagai penghantar arus listrik, sedangkan pada bagian rotor masing-masing tersusun sebanyak 12 buah magnet permanen NdFeB.

METODE PENELITIAN.

Prinsip kerja dari generator fluks aksial sebenarnya tidak jauh berbeda dengan prinsip kerja generator konvensional yang memiliki fluks radial. Hanya saja pada generator fluks aksial memiliki medan magnet tetap yang berasal dari magnet permanen di rotornya sehingga tidak memerlukan penguatan arus searah pada rotornya. Medan magnet dari rotor tersebut yang akan menembus bidang kumparan stator sehingga fluks pada stator. Besar nilai fluks akan berubah-ubah karena adanya perubahan θ . Sudut θ berubah karena medan magnet yang bergerak menembus stator dan menghasilkan sudut tembus terhadap bidang normal stator yang berubah – ubah. Perubahan fluks terhadap waktu akan menghasilkan ggl induksi. Gaya gerak listrik induksi (ggl) adalah timbulnya gaya

gerak listrik di dalam kumparan yang mencakup sejumlah fluks garis gaya medan magnetik, bilamana banyaknya fluks garis gaya itu divariasi. Dengan kata lain, akan timbul gaya gerak listrik di dalam kumparan apabila kumparan itu berada di dalam medan magnet yang kuat medannya berubah-ubah terhadap waktu.

Konsep gaya gerak listrik pertama kali dikemukakan oleh Michael Faraday, yang melakukan penelitian untuk menentukan faktor yang memengaruhi besarnya ggl yang diinduksi. Dia menemukan bahwa induksi sangat bergantung pada waktu, yaitu semakin cepat terjadinya perubahan medan magnetik, ggl yang diinduksi semakin besar, dapat dinyatakan bahwa jika fluks yang melalui loop kawat penghantar dengan N lilitan berubah sebesar $\Delta\Phi_B$ dalam waktu Δt . Yang dikenal dengan Hukum Induksi Faraday, yang berbunyi:

“gaya gerak listrik (ggl) induksi yang timbul antara ujung-ujung suatu loop penghantar berbanding lurus dengan laju perubahan fluks magnetik yang dilingkupi oleh loop penghantar tersebut”. Tanda negatif pada persamaan diatas menunjukkan arah ggl induksi. Apabila perubahan fluks ($\Delta\Phi$) terjadi dalam waktu singkat ($\Delta t \rightarrow 0$), maka ggl induksi menjadi:

$$\varepsilon = - N \frac{d\Phi_B}{dt} \dots\dots\dots (1)$$

Dengan:

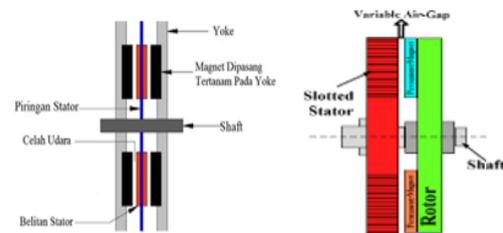
- ε = ggl induksi (volt)
- N = banyaknya lilitan kumparan
- $\Delta\Phi_B$ = perubahan fluks magnetik (weber)
- Δt = selang waktu (s)

Rancangan Rotor dan Celah Udara

Perencanaan generator fluks aksial yang dapat menghasilkan tegangan generator 100 volt, dengan kecepatan putaran 200 Rpm pada frekuensi 50 Hz tegangan output akan naik sesuai dengan kecepatan putaran generator, Tegangan keluaran generator fluks aksial dipengaruhi oleh beberapa parameter antara lain: kecepatan putaran, jenis magnet, ukuran volume magnet, bentuk dan ukuran kumparan, banyaknya lilitan dalam satu kumparan dan celah udara atau celah udara

antara rotor dan stator (Syafriyudin, dkk, 2019).

Rancangan ukuran rotor dapat disesuaikan dengan ukuran stator, dimana magnet permanen saling berhadapan di tengah - tengah sisi depan dan belakang kumparan. Bahan yang digunakan sebagai tatakan penyangga rotor yaitu besi (Fe), sehingga magnet dapat diletakan pada tatakan penyangga tanpa harus menanam magnet permanen tersebut. Celah udara (*air gap*) pada generator axial merupakan jarak antara rotor dan stator. Celah udara (*air gap*) juga menjadi tempat perpindahan medan magnet melewati kumparan pada stator sehingga menghasilkan nilai fluks magnet yang mempengaruhi tegangan induksi pada kumparan (Gambar 1).



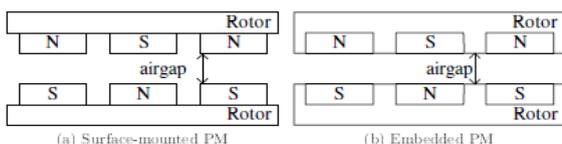
Gambar 1. Variabel *air gap*

Jenis magnet permanen yang akan digunakan dalam perancangan rotor tersebut adalah jenis magnet permanen neodymium iron-boron (Gambar 2). Magnet permanen jenis ini memiliki nilai medan magnet dan kerapatan fluks magnet yang lebih besar dibandingkan jenis magnet permanen lainnya yaitu sebesar 1,2 tesla. Penggunaan jenis magnet permanen neodymium-iron boron (NdFeB) bertujuan untuk memperoleh nilai fluks magnet yang maksimal sehingga memperoleh tegangan induksi yang maksimal. Penentuan ukuran magnet permanen yang digunakan berdasarkan kemampuan peneliti dalam memperoleh magnet permanen tersebut.



Gambar 2 Magnet permanen neodymium-iron boron/

Rancangan rotor menggunakan 12 pasang kutub di setiap sisi bagian rotor tersebut, perencanaan jumlah kumparan dan magnet permanen yang maksimum akan memperbesar nilai frekuensi dan tegangan induksi yang dihasilkan. Kombinasi pemasangan antara kutub magnet dilakukan sesuai dengan tipe NS yang bertujuan untuk memperbesar nilai kerapatan fluks magnet diantara kedua rotor (Gambar 3).



Gambar 3. Prinsip Kerja Generator Sinkron Axial

Rotor

Rotor terdiri dari 2 komponen utama yaitu magnet permanen dan tatakan penyangga magnet permanen (yoke). Rotor pada generator axial tidak memerlukan arus eksitasi dari luar dikarenakan medan magnet yang dihasilkan berasal dari magnet permanen. *Neodymium-iron-boron* menjadi jenis magnet yang paling baik dibandingkan dengan jenis lainnya. Terdapat dua cara penempatan magnet permanen pada tatakan penyangga, yaitu *surface mounted* dan *embedded*. Rotor dibuat menggunakan *acrylic* karena lebih mudah untuk membuat bentuknya dengan menggunakan bantuan *cutting laser*. Rotor adalah tempat magnet permanen disusun, rotor pada axial fluks generator memiliki dua buah (Gambar 4).



Gambar 4. Rotor generator axial fluks.

Proses Perancangan

Perancangan dimulai dengan membuat kumparan dengan jumlah lilitan sebanyak 400 gulungan, dan jumlah kumparan sebanyak 30 buah. Selanjutnya membuat cetakan stator. Memberikan lapisan anti lengket pada cetakan stator. Memberikan lapisan serat kaca. Menaruh

kumparan pada cetakan stator. Membuat campuran resin *polyester*, katalis, MMA (anti gelembung), *silicon rubber*, dan menuangkan pada cetakan stator dan diberi lapisan serat kaca lagi dibagian atasnya, lalu ditutup dengan plastik dan kayu, lalu dipress dengan mur dan baut. Membuat rotor dengan bahan akrilik dengan ketebalan 0,3 cm, lalu di cutting dengan laser dengan diameter 36 cm dan membuat dudukan magnet. Magnet di lem dengan *plastic steel*. Setelah stator kering, stator dilepas dari cetakannya. Kemudian stator dan rotor di rakit dan dibuatkan dudukannya menggunakan aluminium batang. Setelah semua kumparan susun pada cetakan dan disolder sesuai skematik, kumparan siap untuk diberi campuran resin dan di-press (Gambar 5).



Gambar 5. Kumparan siap diberi campuran resin (kiri), kumparan yang sudah diberi campuran resin dan di-press (kanan).

Pembuatan Stator

Stator dibuat dari kumparan kawat tembaga email. Dan dilapisi oleh campuran resin *polyester*, katalis, MMA (anti gelembung), *silicon rubber*. Silicon rubber digunakan sebagai campuran resin karena memiliki sifat *hydro foam* yang nantinya hasil stator tidak mudah menyerap air, agar tidak mudah terjadi arus hubung singkat.

PEMBAHASAN.

Fluks magnetik berkaitan dengan jumlah garis medan magnet yang melewati luasan yang diketahui. Dalam hal ini, fluks magnet (Φ_m) didefinisikan sebagai perkalian medan magnetik B dengan luasan A yang dibatasi oleh rangkaiannya. Jika garis - garis medan magnet melewati suatu luasan yang terdiri atas sebuah kumparan dengan jumlah N lilitan, maka besar fluks magnet yang dihasilkan yaitu sebesar :

$$\Phi_m = N.B.A \dots\dots\dots (2)$$

Dimana :

- Φ_m = Fluks magnet (weber)
- N = Jumlah lilitan pada kumparan
- A = Luas penampang (meter)

Perhitungan fluks magnet yang terdiri dari beberapa kumparan dan magnet permanen yang saling terhubung sebagai berikut :

$$B_{max} = B_r \cdot \frac{t_m}{t_m + \delta} \dots\dots\dots (3)$$

Dimana :

- B_{max} = Medan magnet maksimal (tesla)
- B_r = Madan magnet relatif (tesla)
- l_m = Tinggi magnet (meter)
- δ = Panjang celah udara (meter)

$$A_{magnet} = \frac{\pi (ro^2 - ri^2) - T^f (ro - ri) N_m}{N_m} \dots\dots (4)$$

Dimana :

- A_{magnet} = Luasan medan magnet (m²)
- π = Konstanta (3.14)
- ro = Radius luar magnet (meter)
- ri = Radius dalam magnet (meter)
- f = Jarak antar magnet (meter)
- N_m = Jumlah magnet

$$\Phi_{max} = A_{magnet} \cdot B_{max} \dots\dots\dots (5)$$

Dimana :

- Φ_{max} = Nilai fluks maksimal yang akan diinduksikan (Wb)
- A_{magnet} = Luasan medan magnet (meter²)
- B_{max} = Medan magnet maksimal (tesla)

Perancangan pengukuran pada generator axial adalah seperti tertampil pada Tabel 1.

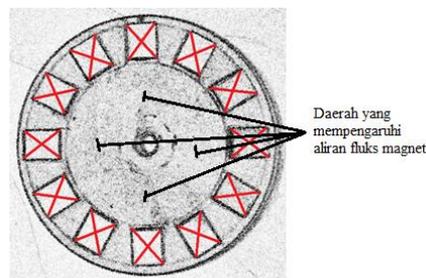
Tabel 1. Perencanaan Pengukuran Pada Generator Axial

Keterangan	Lambang	Ukuran-Satuan
Dimensi Magnet	Panjang Lebar Tinggi	30 mm 10 mm 4 mm
Kerapatan Fluks Magnet	Br	1.2 T
Radius Luar Magnet	Ro	9.38 cm
Radius Dalam Magnet	Ri	6.38cm
Tabel Magnet	Lm	4 cm
Jarak Celah Udara	Δ	1,2,3,4,5 mm
Jarak Antar Magnet	Tf	2.02 cm
Jumlah Kutub	Nph	12
Jumlah Kumparan	Ns	30
Jumlah Lilitan Dalam Satu Kumparan	N	200

Perbandingan Nilai Tegangan Induksi

Perhitungan kesalahan dilakukan dengan menggunakan 2 metode yang sama dengan perhitungan kesalahan pada nilai frekuensi. Dalam hal ini, terdapat perbedaan nilai antara perhitungan dan pengukuran nilai tegangan efektif. Hal ini disebabkan oleh nilai rugi – rugi fluks magnet yang tidak tetap pada setiap kumparan. Ketidaktetapan nilai rugi – rugi fluks magnet disebabkan oleh posisi magnet dan kumparan yang tidak simetris.

Ditinjau dari nilai tegangan efektif yang dihasilkan oleh generator axial dapat dikatakan sangat kecil walaupun kecepatan rotasi yang diterapkan pada generator axial terbilang sangat rendah. Penyebab kecilnya tegangan induksi yang dihasilkan oleh generator axial dapat diperkirakan berdasarkan analisis. Nilai rugi – rugi fluks magnetik yang dihasilkan cukup besar. Hal ini diperkirakan perancangan luas bidang magnet permanen dengan kumparan tidak sebanding sehingga aliran fluks magnet tidak maksimal. Perancangan rotor pada generator axial juga diperkirakan memiliki daerah yang dapat mempengaruhi aliran fluks magnet. Daerah tersebut terletak pada yoke rotor yang terbuat dari besi. Oleh sebab itu, aliran fluks magnet pada kumparan semakin tidak maksimal (Gambar 6).



Gambar 6. Perbandingan luasan magnet permanen dengan yoke rotor.

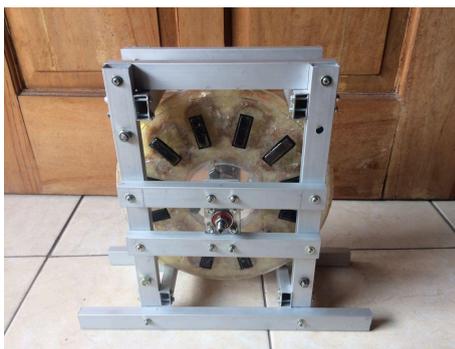
Konstruksi Generator Axial

Perakitan stator dan rotor dilakukan menggunakan batang besi stenlis berbentuk silinder dengan diameter 17 mm dan panjang 200 mm sebagai penghubung diantara keduanya. Pengelasan dilakukan pada rotor dan batang besi sedangkan stator diberi bearing pada tengah stator agar stator tidak ikut berputar pada saat rotor berputar. Untuk kedudukan berdirinya generator dirancang menggunakan besi padat dengan ukuran yang disesuaikan.

Kedudukan ini juga bertujuan untuk menahan stator agar tidak ikut berputar pada saat generator dioperasikan (Gambar 7).

Perhitungan Arus Keluaran Generator

Generator yang dibuat menggunakan kawat tembaga email dengan ukuran diameter 0,5mm. Berdasarkan Tabel Kuat hantar arus kawat tembaga email untuk ukuran diameter 0,5mm adalah 0,577 A.



Gambar 7. konstruksi generator axial fluks

Analisa Perhitungan dan Pengukuran Frekuensi

Perhitungan nilai frekuensi dapat dilakukan menggunakan persamaan (6) sesuai dengan penjabaran landasan teori. Adapun salah satu perhitungan nilai frekuensi pada kecepatan rotasi rotor 500 rpm sebagai berikut :

$$f = \frac{nP}{120} \dots\dots\dots(6)$$

Setelah melakukan perhitungan pada setiap skala kecepatan rotasi rotor, dilakukan pengukuran nilai frekuensi menggunakan osiloskop sebanyak 6 kali pengukuran. Hasil dari 6 kali pengukuran tersebut dirata – ratakan sehingga diperoleh nilai frekuensi berdasarkan pengukuran. Hasil Yang diperoleh menggunakan osciloscop dan multimeter dapat dilihat dari tabel 2 dengan membedakan dari jarak Air Gap yang di pasang.

Induksi

Perhitungan nilai tegangan efektif dapat dilakukan menggunakan persamaan (2) sesuai dengan penjabaran landasan teori. Adapun salah satu perhitungan nilai tegangan efektif pada kecepatan rotasi 500 rpm sebagai berikut :

$$B = B_r \frac{lm}{lm + \delta}$$

Hasil data perhitungan Vrms dan Daya untuk variabel air gap adalah seperti tampak pada Tabel 2.

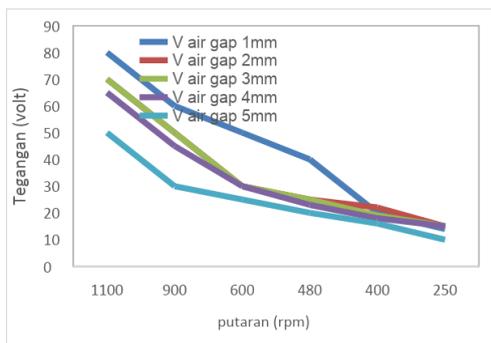
Tabel 2. Data hasil perhitungan Vrms dan Daya untuk variable Air Gap

δ (mm)	β max (tesla)	A magnet (m2)	Φ magnet (tesla)	Vrms (volt)
1	0.96	1.258×10^{-5}	1.2078×10^{-5}	13.40658
2	0.66	1.258×10^{-5}	8.3028×10^{-6}	9.213
3	0.57	1.258×10^{-5}	7.18×10^{-6}	7.9698
4	0.5	1.258×10^{-5}	6.29×10^{-6}	6.9819
5	0.4	1.258×10^{-5}	5.59×10^{-6}	6.2049

Keterangan tabel di atas dapat menjelaskan bahwa perbedaan frekuensi yang dihasilkan oleh generator axial tersebut berdasarkan perhitungan dan berdasarkan percobaan secara langsung di akibatkan oleh beberapa faktor yang dapat mempengaruhi perbedaan tersebut antara lain :

1. Karena ada faktor toleransi pada alat ukur yang digunakan.
2. Karena kurangnya alat ukur yaitu pengukur kekuatan medan magnet, yang tidak bisa disamakan jika hanya melalui data sheet.
3. Karena faktor tatanan kumparan yang tidak presisi dapat mempengaruhi medan magnet. Hal ini dapat dilihat dari gelombang yang dihasilkan pada osiloskop.

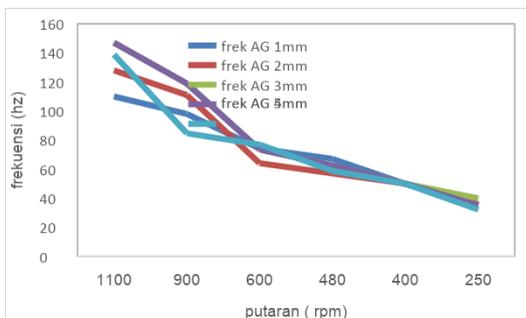
Gambar 5 menunjukkan bahwa semakin tinggi putaran generator maka nilai dari tegangan juga akan naik, akan tetapi nilai yang didapat dibatasi oleh nilai frekuensi sehingga didapat nilai putaran yang ideal adalah 400 rpm pada tegangan 2 volt dengan jarak air gap 2mm. seperti juga terlihat pada gambar 2. dimana nilai frekuensi dipertahankan pada nilai 50 Hz .



Gambar 5. perbandingan putaran generator terhadap tegangan output

Perbandingan Nilai Frekuensi

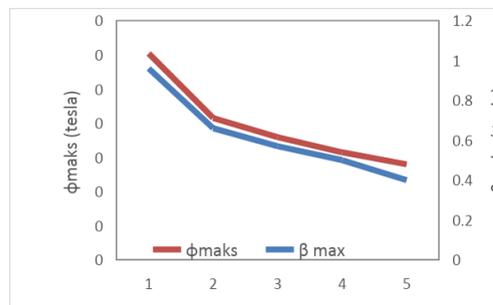
Perbandingan kedua data frekuensi dapat dilakukan dengan menggunakan 2 metode perhitungan kesalahan yaitu persentase kesalahan dan standar deviasi. Kedua metode ini bertujuan untuk melihat keakuratan nilai frekuensi yang didapat sehingga pengelolaan data lebih jelas dan dapat dianalisis. Perhitungan kesalahan standar deviasi dilakukan dengan tujuan melihat keakuratan hasil pengukuran nilai frekuensi yang dilakukan sebanyak beberapa kali pada masing – masing skala kecepatan rotasi rotor. Hasil perbandingan tampak pada Gambar 6..



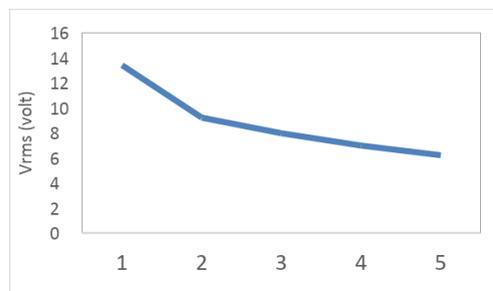
Gambar 6 Perbandingan putaran generator terhadap perubahan nilai frekuensi.

Gambar 7,8 dan 9 memperlihatkan terdapat data yang menunjukkan pengaruh jarak air gap (δ) terhadap nilai fluksi magnet yang dihasilkan dan akan memengaruhi nilai tegangan yang dihasilkan pada rotor (V_{rms}), pada gambar 7 menunjukkan semakin besar jarak air gap (δ), maka nilai fluks maksimum (ϕ_{maks}) dan banyak nya fluks yang dihasilkan oleh medan magnet (β) akan semakin kecil, demikian juga pada

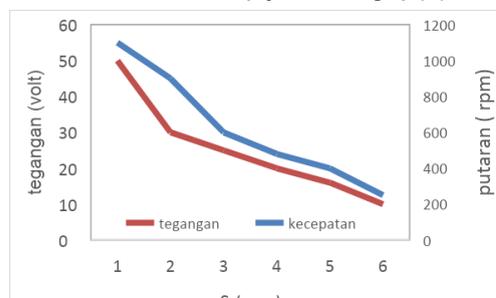
gambar 8 dan 9 menunjukkan penurunan nilai tegangan dan putaran yang dihasilkan karena semakin kecil nya fluks yang dihasilkan.



Gambar 7 perbandingan nilai fluks maksimum terhadap jarak air gap (δ)



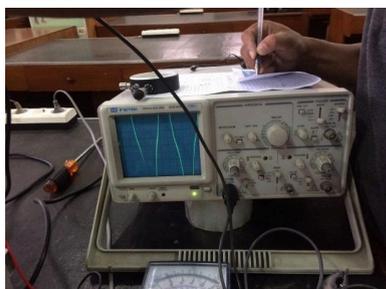
Gambar 8 perbandingan tegangan keluaran terhadap jarak air gap(δ).



gambar 9 perbandingan tegangan pengukuran dan putaran terhadap jarak air gap

Berdasarkan data pada tabel atas, dapat disimpulkan bahwa satu putaran rotor sama dengan +/- 8 Hz frekuensi yang dibangkitkan oleh generator axial. Hal ini sesuai dengan jumlah pasangan kutub magnet permanen pada setiap rotor yaitu sebanyak 12 pasang. Duabelas pasang kutub magnet permanen tersebut menjadi faktor yang mempengaruhi perbedaan nilai

kecepatan rotasi pada rotor dengan nilai frekuensi yang dibangkitkan oleh generator. Hal ini sesuai dengan proses terbentuknya satu gelombang penuh sinusoidal pada generator (Gambar 10).



Gambar 10. Bentuk gelombang yang dihasilkan.

Gambar 10 di atas merupakan salah satu hasil pengukuran frekuensi pada kecepatan rotasi rotor 100 rpm. Jika dilihat dari hasil pengukuran tersebut, bentuk gelombang yang dihasilkan mendekati gelombang sinusoidal (tidak sempurna).

KESIMPULAN

Pada perancangan generator listrik aksial fluks berbasis magnet permanen ndfeb, yang dibuat dengan variasi celah udara, pada pengujian tegangan out tegangan generator adalah berbanding terbalik secara linier, besarnya magnet remanensi (br) magnet permanen ndfeb yang digunakan pada rotor generator aksial fluks berbanding lurus dengan terhadap output tegangan (rms), peningkatan air gap berkorelasi secara eksponensial terhadap fluks magnetik, jarak celah udara terbaik generator ini adalah 2 mm dimana generator menghasilkan tegangan 22 volt ac pada putaran 400 rpm dengan frekuensi 50 hz.

DAFTAR PUSTAKA

Achmad maulana Soehada S, Candra Kurniawan, Perdamean Sebayang, 2017, *Efek Air Gap Pada Rancang Bangun Dan Uji Performa Generator Listrik Fluks Aksial Berbasis Magnet Permanen Ndfep*, Journal Of

Technical Engineering: Piston, Vol. 1, No. 1, Hal. 6-12, 2017

- Asiful Habib, Hang Seng Che, Nasrudin Abd Rahim, Mahdi Tousizadeh, Erwan Sulaiman, 2020, *A Fully Coreless Multi-Stator Multi-Rotor (Msmr) Afpm Generator With Combination Of Conventional And Halbach Magnet Arrays*, Alexandria Engineering Journal (2020) 59, 589–600
- D. Lahouel, D. Hedjazi, R. Abdessemed, 2019, *Sizing inductors of an axial flux synchronous generator*, International Journal of Applied Power Engineering (IJAPE), Vol.8, No.2, August 2019, pp. 110~119
- Franjo Pranjic, Peter Vrtic, 2018, *Determination of an Optimum Fictitious Air Gap and Rotor Disk Thickness for a Coreless AFPM*, jurnal Tehnički vjesnik 25, 6(2018), 1731-1738
- I Made Wiwit Kastawan, Erwin Yusuf, Rusman,, Mulki Rezka Budi P, 2020, *Output Voltage Control of Axial Flux Permanent Magnet Generator Using Microcontroller-Based Electronic Load Controller*, International Seminar of Science and Applied Technology (ISSAT 2020), atlantis press
- Jie Shen, Lei Mei, 2019, *Design and Simulation Of Two Phase Doubly Salient Permanent Magnet Machine With A Dual Stator Structure*, Immae 2019; Iop Conference Series: Materials Science And Engineering 677 (2019) 052085
- Ji-Young lee, Ji-Heon Lee, Tung Khanh Nguyen, 2021, *Axial-Flux Permanent-Magnet Generator Design for Hybrid Electric Propulsion Drone Applications*, Energies 2021, 14, 8509. Energies journal, MPDI
- Ketut Wirtayasa, Chun-Yu Hsiao, 2022, *Performances comparison of axial-flux permanent-magnet generators for small-scale vertical-axis wind turbine*, Alexandria Engineering Journal (2022) 61, 1201–1215
- Nur Afiqah Mostaman, Erwan Sulaiman, Mahyuzie Jenal, 2023, *Overview of Axial Flux Permanent Magnet*

Generator for Small-Scale Industry,
IOP Conf. Series: Earth and
Environmental Science 1261 (2023)
012004

Manggala Fredson Bully, Syafriyudin
,Muhammad, Suyanto, 2022,
*Perancangan Generator Satu Phase
Magnet Permanen Fluks Radial
Kecepatan Rendah*, Jurnal Polygrid
vol 3 no 1, Politeknik Negri
Samarinda

Mehmet Recep Minaz, Mehmet Çelebi,
2017, *Design and analysis of a new
axial flux coreless PSMG with three
rotors and double stators*, jurnal
elsevier Results in Physics 7
(2017)183-188

Sedat Nazlibilek, Esmail S. Eb. Mohammed,
2017, *Air Gap Effect on the AFPM
Generator (Inner Rotor)
Performance*, *International Journal of
Engineering Research and
Development*, Volume 13, Issue 1
(January 2017), PP.37-43

Syafriyudin, M.Suyanto,Irawadi Buyung,
2019, *Design of Low Speed
Generator 1 Phase Using Permanent
Magnetic Type Neodymium*, Journal
of Physics, Conference Series:
Materials Science and Engineering,
Volume 807(011001

BIODATA PENULIS

Dr. Syafriyudin, ST.,MT, lahir di Jambi 18 mei 1968, berdomisili di Perum puri sumberadi asri blok B no. 59 Jumeneng Mlati Sleman, menyelesaikan S-1 bidang Teknik Elektro Institut teknologi Nasional Malang, tahun 1993, S2 dari Jurusan Teknik Elektro Universitas Gadjah Mada Yogyakarta tahun 2003, dan S3 dari jurusan Teknik Mesin Universitas Diponegoro Semarang tahun 2023. saat ini tercatat sebagai dosen tetap di jurusan Teknik Elektro Universitas AKPRIND Indonesia bidang Energi baru terbarukan dengan jabatan akademik Lektor Kepala.