

Analisis Perbandingan *Concentrated Winding* Dan *Toroidal Winding* Pada Generator *Axial Flux Permanent Magnet* (AFPM) Tiga Fasa Menggunakan Inti Besi Pada Stator

Raja Harahap¹⁾, Charly P.H. Silaban²⁾, Riswan Dinzi³⁾, Ferry R.A. Bukit⁴⁾

Konsentrasi Teknik Energi Listrik, Departemen Teknik Elektro

Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara

Jl. Almamater, Kampus USU Medan 20155 INDONESIA

harahaprj@yahoo.com; silabancharlyph@gmail.com ;

dinziriswan@gmail.com; ferrybukit@usu.ac.id

Abstrak

Kebutuhan energi listrik terus meningkat seiring dengan pertumbuhan industri dan masyarakat dunia. Energi terbarukan menjadi salah satu alternatif untuk menanggulangi peningkatan penggunaan energi listrik tersebut. Belakangan ini perkembangan generator dalam memproduksi energi listrik sudah sangat beragam salah satunya menggunakan generator Axial Flux Permanent Magnet (AFPM) yang biasanya dirancang untuk memanfaatkan energi terbarukan dengan kecepatan rendah seperti air dan angin. Generator AFPM pada umumnya menggunakan stator tanpa inti dengan konfigurasi belitan concentrated. Pada pembahasan skripsi ini dibandingkan dua buah stator dengan menggunakan inti besi yaitu konfigurasi Concentrated Winding dan konfigurasi Toroidal Winding. Generator yang digunakan memiliki spesifikasi rotor dan stator yang sama. Generator yang dirancang dengan tegangan 110 volt frekuensi 50 Hz, dan daya perhitungan sekitar 100 watt. Dari hasil pengujian generator AFPM tiga fasa dengan menjaga konstan frekuensi sebesar 50 Hz pada konfigurasi Concentrated Winding dihasilkan tegangan pengujian tanpa beban sekitar 106,5 volt, tegangan pengujian berbeban sekitar 45,6 volt, dan daya 87,15 watt dengan efisiensi generator 72,61 %. Sementara pada konfigurasi Toroidal Winding dihasilkan tegangan pengujian tanpa beban sekitar 110,6 volt, tegangan pengujian saat berbeban sekitar 42,4 volt, dan daya 77,16 watt dengan efisiensi generator 70,51 %. Berdasarkan hasil tersebut disimpulkan bahwa konfigurasi Concentrated Winding lebih baik daripada konfigurasi Toroidal Winding.

Kata Kunci : *Generator Fluks Aksial, Rotor, Stator, Concentrated Winding, Toroidal Winding.*

I. PENDAHULUAN

Pembangkit energi listrik terbarukan merupakan pilihan terbaik untuk memenuhi kebutuhan energi listrik dunia mengingat mahal dan langkanya energi minyak bumi yang selama ini selalu menjadi pilihan utama pada sistem pembangkitan energi listrik [1]. Kebutuhan energi dipenuhi dengan fasilitas ekonomi dan teknologi yang masih menggunakan sumber energi yang tidak terbarukan seperti bahan bakar fosil yang mengakibatkan pasokan listrik ikut menurun. Untuk menanggulangi hal ini maka banyak penelitian yang mengkaji energi alternatif untuk mengurangi penggunaan bahan bakar fosil dengan pemanfaatan sumber energi lain seperti air, angin, gelombang laut yang membutuhkan generator putaran rendah untuk dapat menghasilkan listrik [2].

Kebanyakan generator pada pembangkit saat ini menggunakan putaran tinggi, sedangkan energi terbarukan seperti air dan angin hanya dapat menggerakkan generator dengan putaran rendah karena debit air yang rendah dan kecepatan angin yang tidak stabil. Sehingga perlu dirancang bangun serta diuji generator Axial Flux Permanent Magnet (AFPM) tiga fasa dengan putaran rendah.

Generator ini menggunakan magnet permanen pada rotornya sehingga dapat

menghasilkan energi listrik ketika berputar. Desain AFPM lebih sederhana dan lebih mudah pembuatannya dibandingkan dengan generator konvensional. Posisi rotor dan statornya tegak lurus terhadap porosnya sehingga dinamakan generator tipe aksial [3].

Pada penelitian V. Kaliyev 2017, yang membahas tentang *Axial Flux Permanent Magnet Machine* tanpa inti stator untuk generator angin kecepatan rendah didapat hasil bahwa stator magnetik menghasilkan tegangan 6 V pada 1000 rpm dan stator non magnetik menghasilkan tegangan 4,2 V pada rpm yang sama dalam keadaan *open circuit voltage* [4].

Menurut F. Jin dkk 2019, dengan menggunakan simulasi *Finite Element Method* (FEM) pada optimasi model *toroidal winding* magnet permanen generator sinkron didapatkan hasil 167 V pada kecepatan 750 rpm. Struktur lilitan yang digunakan pada stator adalah *two pole three phase* [5].

Dari penelitian tersebut, akan dibandingkan dua buah stator dengan menggunakan inti besi yaitu konfigurasi *Concentrated Winding* dan konfigurasi *Toroidal Winding*. Generator AFPM yang dirancang dapat menghasilkan tegangan 110 volt dengan frekuensi 50 Hz dan daya 100 watt. Jumlah kutub yang digunakan adalah 12 kutub dimana tegangan, arus, daya dan frekuensi yang

dihasilkan dijadikan indikator untuk tingkat performa generator.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Konsep Umum

Prinsip kerja generator dalam mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik adalah berdasarkan hukum Faraday. Hasil penelitian Faraday menunjukkan bahwa seutas kawat atau kumparan konduktor berada dalam medan magnet yang berubah terhadap waktu, maka pada ujung-ujung kawat atau konduktor tersebut akan timbul tegangan atau gaya gerak listrik (ggl) induksi).

2.2 Prinsip Kerja Generator AFPM

Prinsip kerja generator AFPM sesungguhnya tidak jauh berbeda dengan prinsip kerja generator konvensional pada umumnya. Penggunaan magnet permanen menghasilkan medan magnet yang tetap sehingga tidak memerlukan pencatutan arus searah untuk menghasilkan medan magnet. Sedangkan fluks aksial diperoleh dari magnet permanen yang telah diberikan perlakuan khusus sehingga arah garis-garis gaya magnet keluar dari kutub magnet secara aksial atau vertikal. Prinsip generator AFPM secara sederhana dapat dijelaskan bahwa tegangan akan diinduksikan pada konduktor, apabila konduktor tersebut bergerak pada medan magnet sehingga memotong garis-garis gaya magnet [3].

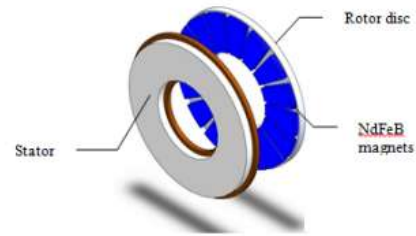
Karena pada rotor menggunakan magnet permanen, maka medan magnet yang dihasilkan adalah konstan pada fungsi waktu. Dengan demikian, untuk setiap periode waktunya, nilai fluks magnetis yang timbul pada stator akan juga bernilai konstan. Namun, ketika sistem generator mendapat energi mekanik dari luar yang disebut sebagai penggerak utama, akan terjadi perubahan pada sudut perpotongan antara garis gaya medan magnet rotor dengan bidang normal kumparan jangkar. Hal ini akan menyebabkan perubahan nilai fluks magnetik di stator terhadap waktu dan akan menghasilkan tegangan induksi.

2.3 Jenis-Jenis Generator AFPM

Beberapa jenis generator AFPM berdasarkan jumlah dan cara penempatan piringan stator maupun rotornya. Beberapa jenis generator AFPM tersebut adalah *single sided*, *double sided* dan *multi disc* [11].

2.3.1 Single Sided

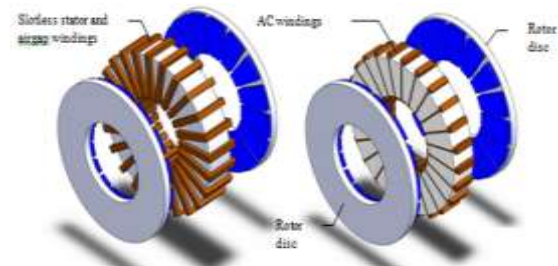
Generator AFPM tipe *single sided* memiliki satu piringan rotor dan satu piringan stator yang saling berhadapan. *Single sided* ditunjukkan pada Gambar 1



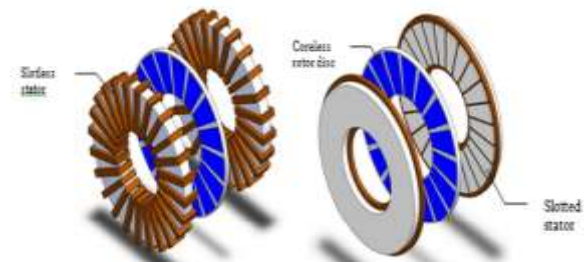
Gambar 1. *Single Sided* [11]

2.3.2 Double Sided

Generator AFPM tipe *double sided* terbagi atas dua jenis yaitu generator AFPM tipe *double sided internal rotor* dan generator AFPM tipe *double sided internal stator*. Generator AFPM tipe *double sided internal rotor* memiliki sebuah piringan rotor yang diapit oleh dua buah piringan stator sementara generator AFPM tipe *double sided internal stator* memiliki sebuah piringan stator yang diapit oleh dua buah piringan rotor.



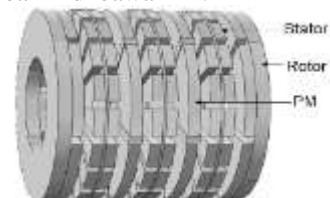
Gambar 2. *Double Sided Internal Stator*



Gambar 3. *Double Sided Internal Rotor* [11]

2.3.3 Multi Disc.

Adapun generator AFPM *multi disc* memiliki beberapa buah piringan stator dan rotor. Hal ini dimaksudkan untuk meningkatkan kapasitas daya pada generator. Namun ukuran dari generator ini akan menjadi lebih besar dan konstruksinya pun menjadi lebih rumit. Konstruksi dari generator AFPM *multi disc* ini dapat dilihat pada Gambar 4 di bawah ini.

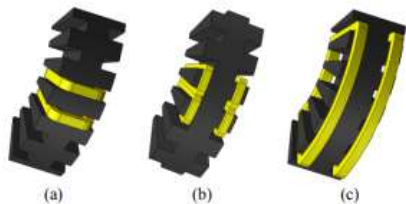


Gambar 4. *Multi Disc* [12]

2.4 Konfigurasi Belitan

Pada umumnya konfigurasi belitan yang sering kita jumpai adalah *concentrated winding* dan *distributed winding*. Namun belakangan ini penelitian untuk bentuk-bentuk belitan yang lain mulai banyak diteliti menggunakan simulasi seperti FEA (*Finite Element Analysis*).

Pada penelitian Tianjie Jou dkk 2017 [13], telah dibandingkan konfigurasi belitan *toroidal winding*, *concentrated winding* dan *lap winding*.



Sketch of three optional winding configurations. (a) toroidal winding. (b) dual side concentrated winding. (c) dual side, single layer lap winding.

Gambar 5. Perbandingan Toroidal Winding, Concentrated Winding, dan Lap Winding

2.4.1 Concentrated Winding

Concentrated winding adalah suatu jenis belitan yang semua sisi kumparannya dikelompokkan pada satu slot. *Concentrated winding*, yang juga disebut belitan tidak tumpang tindih (*non overlapping*) telah banyak digunakan pada mesin magnet permanen dalam rentang daya kW ataupun di atasnya. Dalam belitan ini, koil tidak didistribusikan walaupun dipusatkan pada satu slot tertentu. Artinya, jumlah kutub armatur sama dengan jumlah slot armatur. *Concentrated winding* dapat menyebabkan ggl maksimum, tetapi sifat ggl nya tidak persis sinusoidal.

2.4.2 Toroidal Winding

Toroida adalah solenoida yang dilengkungkan sehingga sumbunya berbentuk lingkaran. Medan magnetik dalam toroida tidak homogen seperti solenoida. Dengan teknologi belitan inti toroidal, kumparan atau belitan listrik dibuat dengan menggulung konduktor listrik (misalnya: kawat tembaga) melalui cincin melingkar dan mendistribusikannya secara merata pada keliling.

2.5 Rugi-Rugi Daya dan Efisiensi Generator

Suhu kerja dari suatu generator sangat erat hubungannya dengan usia, karena keausan dari isolasinya merupakan fungsi waktu dan suhu. Keausan merupakan gejala kimiawi yang melibatkan adanya oksidasi lambat dan pengerapan yang menyebabkan terjadinya penyusutan mekanis dan kekuatan listrik.

Pertimbangan terhadap rugi – rugi mesin merupakan hal yang sangat penting, karena rugi – rugi dapat menentukan :

- a) Rugi – rugi dapat menentukan efisiensi mesin dan cukup berpengaruh terhadap biayapemakaiannya.

- a. Rugi – rugi menentukan pemanasan mesin sehingga menentukan keluaran daya atau ukuran yang dapat diperoleh tanpa mempercepat keausanisolasi.
- b. Jatuhnya tegangan atau komponen arus yang bersangkutan dengan rugi- rugi yang dihasilkan harus diperhitungkan dengan semetinya dalam penampilmesin.

Rugi-rugi yang terdapat pada generator sinkron dibagi menjadi beberapa bagian diantaranya:

1. Rugi-rugi tembaga

Rugi listrik dikenal juga dengan rugi tembaga. Rugi – rugi tembaga ditemukan pada semua belitan pada mesin, dihitung berdasarkan pada tahanan dari lilitan pada suhu 75⁰ C.

2. Rugi-rugi besi

Rugi besi disebut juga rugi magnetik yang terdiri dari histerisis dan rugi arus pusar atau arus eddy yang timbul dari perubahan kerapatan fluks pada besi mesin.

Tabel 1. Nilai Koefisien Steinmetz Histerisis [15]

Bahan	h (Joule/m ³),
Sheet steel	502
Silicon steel	191
Hard cast steel	7040
Cast steel	750 – 3000
Cast iron	2700 – 4000

3. Rugi-rugi gesek dan angin (Mekanik)

Rugi gesek yang terjadi pada pergesekan sikat dan sumbu. Rugi ini dapat diukur dengan menentukan masukan pada mesin yang bekerja pada kecepatan yang semestinya tetapi tidak diberi beban. Rugi angin (*windage loss*) atau disebut juga rugi buta (*stray loss*) akibat adanya celah udara antara bagian rotor dan bagianstator. Besar rugi gesek dan angin sangat kecil dan sering diabaikan. Rugi-rugi gesek dan angin sekitar 10%-20% dari rugi total pada beban penuh.

4. Rugi-rugi Nyasar

Rugi-rugi nyasar (*stray losses*) adalah rugi-rugi akibat pembagian arus yang tidak seragam pada tembaga dan rugi-rugi inti tambahan dan bernilai kecil, sehingga tidak terlalu mempengaruhi efisiensi.

III. METODE PENELITIAN

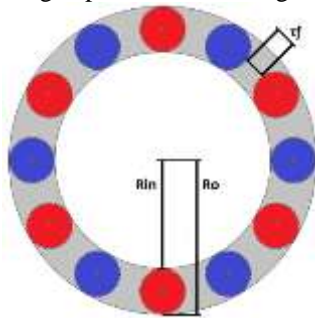
3.1 Perancangan Generator

Sebelum membandingkan dua bentuk belitan, langkah pertama yang dilakukan adalah merancang generator dengan konfigurasi *Concentrated Winding* sebagai acuan untuk

membandingkan dengan konfigurasi *Toroidal Winding*.

3.1.1 Perancangan Rotor

Kumparan Rotor merupakan bagian yang berputar pada generator. Pada perancangan ini menggunakan *double side internal stator* atau dua buah rotor yang terhubung oleh satu poros. Rotor yang akan dirancang berbentuk silinder. Pada Gambar 6 ditampilkan desain rotor yang akan dirancang dengan polaritas antar magnet N-S.



Gambar 6. Desain Rotor dan Penempatan Magnet
Spesifikasi magnet permanent jenis

Neodymium yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 2

Tabel 2. Spesifikasi Magnet

Spesifikasi	Keterangan
Jenis	Neodymium
Ukuran	20x10 mm
Jumlah kutub per rotor	12 buah
Densitas fluks (Br)	0,54 T

Dikarenakan magnet yang digunakan berbentuk lingkaran maka untuk menentukan luasan area magnet digunakan Persamaan (2)

$$A_{mg} = \frac{1}{4} \pi (d_{mg})^2 \dots \dots \dots (2)$$

Dengan:

- A_{mg} = Luas magnet (m^2)
- d_{mg} = Diameter magnet (m)

Untuk menentukan densitas fluks magnet maksimum digunakan Persamaan (3)

$$B_{max} = Br \left(\frac{l_m}{l_m + \delta} \right) \dots \dots \dots (3)$$

Dengan:

- B_{max} = Densitas fluks magnet maksimum (T)
- Br = Densitas fluks magnet (T)
- l_m = Tebal magnet (cm)
- δ = Celah udara (mm)

Sehingga fluks magnetik maksimum yang dihasilkan rotor dapat menggunakan Persamaan (4)

$$\Phi_{max} = A_{mg} \cdot B_{max} \dots \dots \dots (4)$$

Dimana:

- Φ_{max} = Fluks magnetic (Wb)

A_{mg} = Luas magnet (m^2)

B_{max} = Densitas fluks magnet maksimum (T)

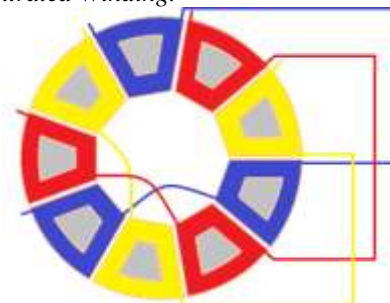
3.1.2 Perancangan Stator

Stator merupakan bagian yang diam pada generator. Pada perancangan ini stator berfungsi sebagai kumparan jangkar yang menghasilkan tegangan keluaran generator. Stator yang dirancang berbentuk bulat.



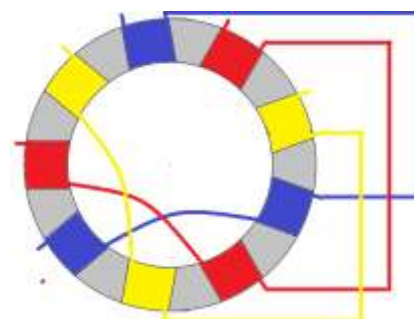
Gambar 7. Rancangan Desain Stator

Stator yang digunakan pada *Concentrated Winding* dan *Toroidal Winding* adalah sama. Pada *Concentrated Winding* terdapat dua sisi slot kumparan agar dapat memanfaatkan fluks magnetik dari kedua rotor. Namun kumparan pada sisi yang satu dengan sisi yang lain akan diserikan sehingga kedua sisi tersebut akan tetap menghasilkan 9 buah kumparan. Gambar 8 memperlihatkan desain stator dengan konfigurasi *Concentrated Winding*.



Gambar 8. Desain Konfigurasi Concentrated Winding

Sementara pada *Toroidal Winding* lebih sederhana dimana tiap kumparan sudah tersedia slot kumparan sebanyak 9 buah yang langsung dapat memanfaatkan fluks magnetik dari kedua rotor. Gambar 9 memperlihatkan desain stator dengan konfigurasi *Toroidal Winding*.



Gambar 9. Desain Konfigurasi Toroidal Winding

Untuk menentukan banyaknya jumlah lilitan per fasa, maka digunakan Persamaan (5)

$$N = \frac{E_{rms}}{4,44.f.\Phi_{maks}} \dots\dots\dots(5)$$

Dengan:

- N = Jumlah lilitan
- E_{rms} = Tegangan terinduksi (V)
- f = Frekuensi (Hz)
- Φ_{maks} = Fluks maksimum magnet (Wb)

Untuk menentukan nilai arus pada belitan stator tiap fasa dapat digunakan Persamaan (6)

$$I = \frac{P_{out}}{m.V.\cos \varphi} \dots\dots\dots(6)$$

Dengan:

- I = Arus tiap fasa (A)
- P_{out} = Daya keluaran (W)
- m = Jumlah fasa
- V = Tegangan (V)
- cos φ = Faktor daya

Untuk menghitung luas penampang konduktor/kawat tembaga pada stator dapat digunakan Persamaan (7)

$$S = \frac{I}{a.J} \dots\dots\dots(7)$$

Dengan:

- S = Luas penampang kawat tembaga (mm²)
- I = Arus tiap fasa (A)
- a = Jumlah kawat paralel
- J = Kerapatan arus pada konduktor stator (A/m²)

Maka, untuk menentukan diameter konduktor dapat menggunakan Persamaan (8)

$$d = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} \dots\dots\dots(8)$$

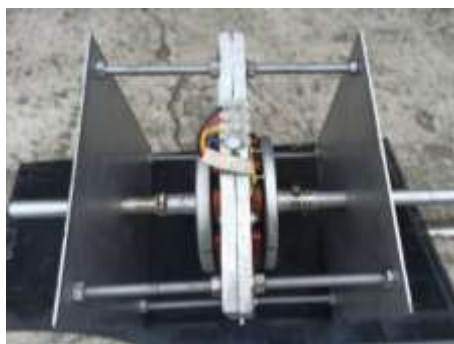
Dengan:

- d = Diameter konduktor (mm)
- S = Luas penampang kawat tembaga (mm²)

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Perancangan Generator

Generator terdiri dari dua bagian utama yaitu rotor dan stator. Pada Gambar 10 dan 11 ditampilkan hasil perancangan generator.



Gambar 10. Rancangan Generator Double Side Internal Stator



Gambar 11. Generator Tampak Samping

4.2 Perhitungan

4.2.1 Perhitungan Desain Rotor

Rotor yang dirancang menggunakan bahan kimia campuran antara resin dan katalis sebagai tempat dudukan magnet. Jumlah magnet yang digunakan sebanyak 12 buah per rotor. Gambar 12 memperlihatkan bentuk rotor yang sudah dibuat.



Gambar 12. Rotor

Spesifikasi rotor tersebut dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

1. Menghitung jumlah kutub pada rotor.

Untuk menentukan jumlah kutub pada rotor maka dapat digunakan Persamaan (1)

Dengan:

- Kecepatan putar (n) = 500 rpm
- Frekuensi (f) = 50 Hz

Maka, jumlah kutub pada rotor adalah:

$$n = \frac{120.f}{p}$$

$$p = \frac{120.50}{500}$$

$$p = 12$$

2. Menentukan ukuran rotor.

Jarak antar magnet ditentukan 1 cm, maka ketika disimulasikan pada software AutoCAD 2017 diperoleh diameter luar rotor (Dout) sebesar 13,46 cm atau radius luar magnet (Ro) sebesar 6,73 cm dan diameter dalam rotor (Din) sebesar 9,46 cm atau radius dalam magnet (Rin) sebesar 4,73 cm. Untuk diketahui bahwa diameter luar dan diameter dalam suatu rotor sama dengan diameter luar dan diameter dalam stator.

3. Menghitung luasan area magnet.

Untuk menghitung luas area permukaan magnet maka dapat menggunakan Persamaan (2)

Dengan:

Diameter magnet (d_{mg}) = 2 cm (pada Tabel 2)

Maka, luas area permukaan magnet adalah:

$$A_{mg} = \frac{1}{4} \pi (d_{mg})^2$$

$$A_{mg} = \frac{1}{4} \pi (2)^2$$

$$A_{mg} = 3,14 \text{ cm}^2 = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

4. Menghitung densitas fluks magnet maksimum.

Nilai kerapatan fluks maksimum yang dihasilkan magnet dapat menggunakan Persamaan (3)

Dengan:

Tebal magnet (l_m) = 1 cm (pada Tabel 2)

Jarak air gap (δ) = 0,1 cm

Maka, nilai kerapatan fluks maksimum yang dihasilkan magnet adalah:

$$B_{max} = B_r \left(\frac{l_m}{l_m + \delta} \right)$$

$$B_{max} = 0,54 \left(\frac{1}{1 + 0,1} \right)$$

$$B_{max} = 0,49 \text{ Tesla}$$

5. Menghitung fluks maksimum yang dihasilkan rotor.

Jumlah medan magnet maksimum yang melewati suatu kumparan dapat menggunakan Persamaan (4)

$$\Phi_{max} = A_{mg} \cdot B_{max}$$

$$\Phi_{max} = 3,14 \cdot 10^{-4} \cdot 0,49 = 1,53 \cdot 10^{-4} \text{ Wb}$$

4.2.2 Perhitungan Desain Stator

Stator yang dirancang menggunakan inti besi sebagai tempat duduk kumparan. Pada stator ini terdapat 9 buah slot koil atau per fasanya 3 buah slot koil. Jumlah lilitan pada stator adalah 1860 lilit per fasa. Gambar 13, 14, dan 15 memperlihatkan stator yang sudah dikerjakan.



Gambar 13. Stator Sebelum Dililit Kawat Tembaga



(14)

(15)

Gambar 14. Stator Concentrated Winding

Gambar 15. Stator Toroidal Winding

Spesifikasi stator tersebut dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

1. Menentukan jumlah koil.

Jika jumlah kutub ada 12 pasang maka jumlah koil pada stator adalah 9 atau tiap fasa terdapat 3 koil.

2. Menghitung jumlah lilitan.

Jumlah lilitan stator sangat menentukan besarnya tegangan yang akan dibangkitkan suatu generator, untuk menentukan banyaknya jumlah lilitan stator per fasa dapat menggunakan Persamaan (5)

Dengan:

Frekuensi (f) = 50 Hz (Persamaan 2.3)

Fluks maksimum magnet (Φ_{maks}) = $1,53 \cdot 10^{-4}$

Wb (Persamaan 4)

$$E_{rms} = V_{L-N} = \frac{V_{L-L}}{\sqrt{3}} = \frac{110}{\sqrt{3}} = 63,508 \text{ volt}$$

$$V_{L-L} = \sqrt{3} \cdot V_{L-N} = \sqrt{3} \cdot 63,508 = 110 \text{ volt}$$

Sehingga banyaknya jumlah lilitan stator tiap fasa adalah:

$$N = \frac{E_{rms}}{4,44 \cdot f \cdot \Phi_{maks}} = \frac{63,508}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,53 \cdot 10^{-4}}$$

$$N = 1858 = 1860 \text{ lilit per fasa}$$

3. Menentukan diameter konduktor/kawat tembaga.

Besarnya arus tiap fasa pada stator ditentukan pada Persamaan (6)

Dengan:

Daya keluaran (P_{out}) = 100 watt

Jumlah fasa (m) = 3

Tegangan fasa ke netral = 63,508 volt

Faktor daya ($\cos \varphi$) = 0,8 [3]

Maka, arus tiap fasa pada stator adalah:

$$I = \frac{P_{out}}{m \cdot V \cdot \cos \varphi} = \frac{100}{3 \cdot 63,508 \cdot 0,8}$$

$$I = 0,65 \text{ ampere}$$

Kerapatan arus pada kawat tembaga di stator dapat diasumsikan $J = 4,5 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ (biasa digunakan untuk mesin AC sampai dengan kapasitas 100 kW). Untuk menghitung luas penampang ditentukan oleh Persamaan (7) Dengan:

$$\text{Jumlah kawat paralel } (a) = 1$$

Maka luas penampang kawat tembaga adalah:

$$S = \frac{I}{a \cdot J}$$

$$S = \frac{0,65}{1 \cdot 4,5 \times 10^6}$$

$$S = 0,144 \text{ mm}^2$$

Sehingga untuk mendapatkan diameter konduktor yang diinginkan digunakan Persamaan (8)

$$d = \sqrt{\frac{4S}{\pi}}$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \times 0,144}{\pi}}$$

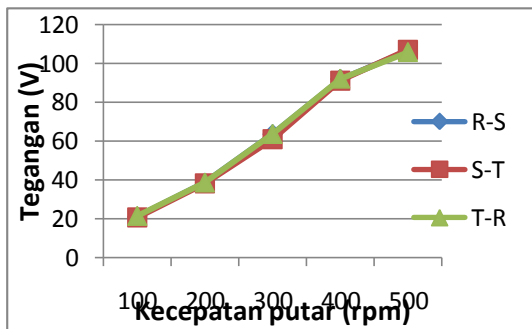
$$d = 0,42 = 0,45 \text{ mm (dipilih)}$$

Maka diameter yang dipilih adalah 0,45 mm.

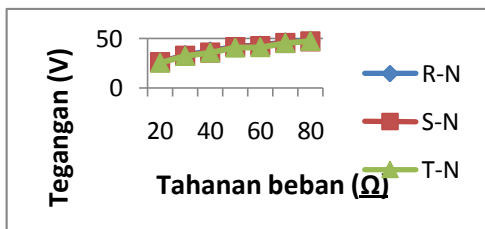
4.3 Pengujian

4.3.1 Pengujian Generator Konfigurasi Concentrated Winding

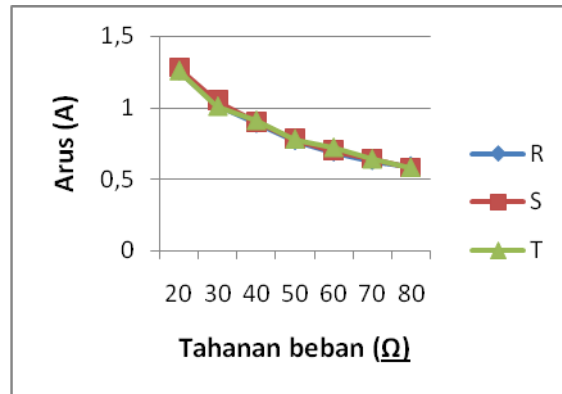
Pengujian dilakukan tanpa beban dan berbeban resistif yaitu tahanan geser dengan menjaga konstan kecepatan putar 500 rpm. Hasil pengujian ditunjukkan pada gambar berikut.



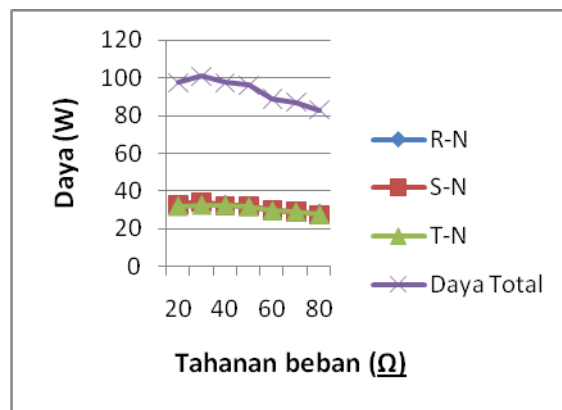
Gambar 16. Grafik Hubungan Pengaruh Putaran Terhadap Tegangan Fasa ke Fasa Tanpa Beban Konfigurasi Concentrated Winding



Gambar 17. Grafik Hubungan Pengaruh Variasi Tahanan Beban Terhadap Tegangan Pada Kondisi Berbeban Konfigurasi Concentrated Winding



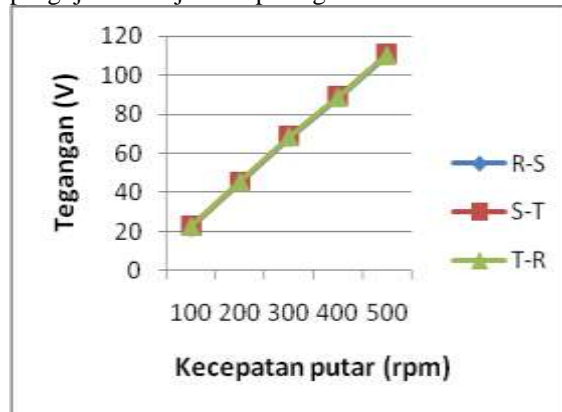
Gambar 18. Grafik Hubungan Pengaruh Variasi Tahanan Beban Terhadap Arus Pada Kondisi Berbeban Konfigurasi Concentrated Winding



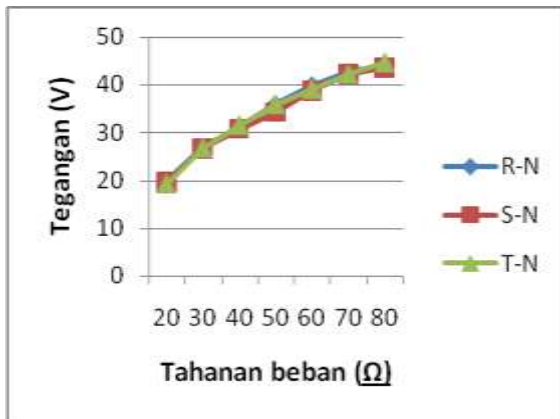
Gambar 19. Grafik Hubungan Pengaruh Variasi Tahanan Beban Terhadap Daya Keluaran Pada Kondisi Berbeban Konfigurasi Concentrated Winding

4.3.2 Pengujian Generator Konfigurasi Toroidal Winding

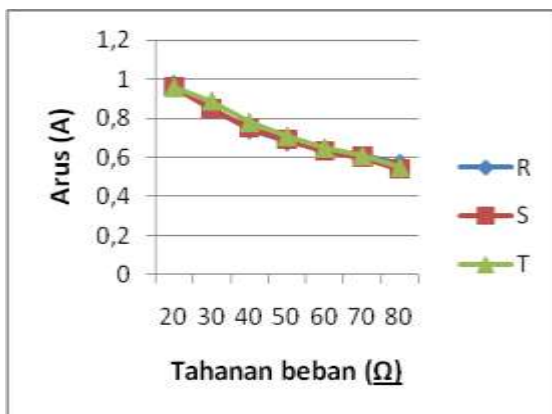
Pengujian dilakukan tanpa beban dan berbeban resistif yaitu tahanan geser dengan menjaga konstan kecepatan putar 500 rpm. Hasil pengujian ditunjukkan pada gambar berikut.



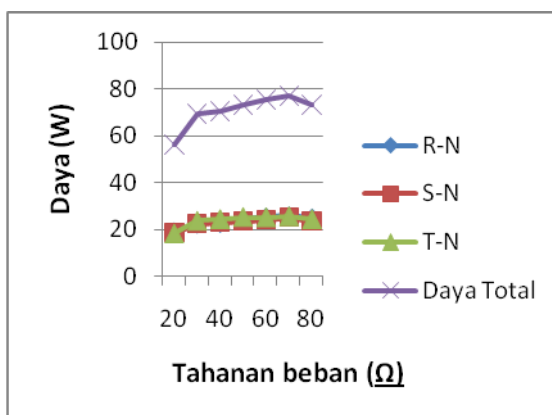
Tabel 20. Data Tegangan Fasa ke Fasa Tanpa Beban Konfigurasi Toroidal Winding



Gambar 21. Grafik Hubungan Pengaruh Variasi Tahanan Beban Terhadap Tegangan Pada Kondisi Berbeban Konfigurasi Toroidal Winding



Gambar 22. Grafik Hubungan Pengaruh Variasi Tahanan Beban Terhadap Arus Pada Kondisi Berbeban Konfigurasi Toroidal Winding



Gambar 23. Grafik Hubungan Pengaruh Variasi Tahanan Beban Terhadap Daya Keluaran Pada Kondisi Berbeban Konfigurasi Toroidal Winding

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari pembahasan mengenai perhitungan, pengujian, analisis, dan perbandingan yang dilakukan, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Generator AFPM tiga fase menggunakan inti besi pada stator dirancang dengan tegangan 110 volt frekuensi 50 Hz, dan daya sekitar 100 watt menghasilkan efisiensi generator konfigurasi *Concentrated Winding* sebesar 72,61 % dan konfigurasi *Toroidal Winding* sebesar 70,51 %.
2. Perbandingan tegangan terinduksi antara pengujian dan perhitungan pada generator AFPM tiga fase yaitu tegangan pengujian sekitar 110,6 volt untuk konfigurasi *Toroidal Winding* lebih mendekati tegangan perhitungan 110 volt dibanding konfigurasi *Concentrated Winding* tegangan pengujian sekitar 106,5 volt.
3. Arus puncak pada generator AFPM tiga fase konfigurasi *Concentrated Winding* sebesar 0,636 A mengakibatkan rugi-rugi tembaga pada stator sebesar 24,67 watt lebih tinggi dibanding arus puncak pada konfigurasi *Toroidal Winding* sebesar 0,606 A mengakibatkan rugi-rugi tembaga pada stator sebesar 24,12 watt.
4. Saat pengujian pengaturan berbeban ferkuensi konstan menghasilkan daya 87,15 watt pada konfigurasi *Concentrated Winding* dan konfigurasi *Toroidal Winding* sebesar 77,16 watt. Berdasarkan hasil tersebut disimpulkan bahwa konfigurasi *Concentrated Winding* lebih baik daripada konfigurasi *Toroidal Winding*.

5.2 Saran

Dari pembahasan mengenai perhitungan, pengujian, analisis, dan perbandingan yang dilakukan, maka diperoleh saran sebagai berikut:

1. Penelitian mengenai generator AFPM ini dapat dikembangkan lebih lanjut. Sebagai contoh mengubah parameter jumlah kutub dan jenis magnet.
2. Pada penelitian selanjutnya, dapat merancang kincir angin atau air yang mampu dikopel pada generator AFPM agar dapat dimanfaatkan secara langsung.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Ainur, 2019, *Rancang Bangun Generator AC Konstruksi Axial Flux Satu Fasa Menggunakan Magnet Neodymium (NdFeB) Silinder dengan Kutub Magnet Berlawanan (U-S)*, Tek. Elektro, Univ. Jember, p. 87.

- [2] J. F. Gieras, R. J. Wang, and M. J. Kamper, 2008, *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*, 2nd ed. Springer Netherlands.
- [3] A. Fajar, 2017, *Rancang Bangun Generator Sinkron Axial Flux Permanent Magnet Axial Flux Permanent Magnet 1500 Watt*, no. December.
- [4] V. Kaliyev, A. Helwig, and T. Ahfock, 2017, *Axial flux PM coreless stator machine development for low speed wind generator*, *Australas. Univ. Power Eng. Conf. AUPEC 2017*, vol. 2017-Novem, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1109/AUPEC.2017.8282397.
- [5] F. Jin, J. Si, Z. Cheng, P. Su, L. Dong, and G. Qi, 2019, *Optimization Design of A Novel Toroidal-Winding Permanent Magnet Synchronous Generator*, *22nd Int. Conf. Electr. Mach. Syst. ICEMS 2019*, 2019, doi: 10.1109/ICEMS.2019.8921858.
- [6] Muljadi, P. Sardjono, and Suprapedi, 2015, Preparation and Characterization of 5 wt.% Epoxy Resin Bonded Magnet ndfeb for micro Generator Application, *Energy Procedia*, vol. 68, pp. 282–287, doi: 10.1016/j.egypro.2015.03.257.
- [7] A. Parviainen, 2005, *Design of Axial-Flux Permanent-Magnet Low-Speed Machines and Performance Comparison Between Radial-Flux and Axial-Flux Machines*.
- [8] I. Petrov, P. Lindh, W. Y. Peng, C. S. Jang, H. P. Yang, and J. Pyrhonen, 2016, *Improvement of axial flux single-rotor single-stator induction machine performance by applying semi-magnetic wedges*, *Proc. - 2016 22nd Int. Conf. Electr. Mach. ICEM 2016*, no. October 2017, pp. 1795–1800, doi: 10.1109/ICELMACH.2016.7732767.
- [9] M. Akbar, 2012, *Rancang Bangun Generator Turbin Axial Tiga Fasa Untuk Kecepatan Angin Rendah*.
- [10] F. G. Rossouw, 2009, *Analysis and Design of Axial Flux Permanent Magnet Wind Generator System for Direct Battery Charging Applications, Africa (Lond.)*, no. March, p. 140.
- [11] M. Aydin and M. K. Guven, 2013, *Design of several permanent magnet synchronous generators for high power traction applications*, *Proc. 2013 IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf. IEMDC 2013*, vol. 90, no. 262, pp. 81–87, 2013, doi: 10.1109/IEMDC.2013.6556196.
- [12] A. Chen, R. Nilssen, and A. Nysveen, 2010, *Performance comparisons among radial-flux, multistage axial-flux, and three-phase transverse-flux PM machines for downhole applications*, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 46, no. 2, pp. 779–789, doi: 10.1109/TIA.2009.2039914.
- [13] T. Zou, D. Li, R. Qu, J. Li, and D. Jiang, 2017, *Analysis of a Dual-Rotor, Toroidal-Winding, Axial-Flux Vernier Permanent Magnet Machine*, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no. 3, pp. 1920–1930, doi: 10.1109/TIA.2017.2657493.
- [14] H. Vansompel, A. Hemeida, and P. Sergeant, 2017, *Stator Heat Extraction System For Axial Flux Yokeless And Segmented Armature Machines*, *2017 IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf. IEMDC 2017*, doi: 10.1109/IEMDC.2017.8001873.
- [15] M. Noer, 2017, *Analisa Pengaruh Pembebanan Terhadap Efisiensi Generator Di Pltg Borang Dengan Menggunakan Software Matlab*, *J. Ampere*, vol. 2, no. 2, p. 103, 2017, doi: 10.31851/ampere.v2i2.1774.