

## ANALISIS PENGARUH AIR GAP (CELAH UDARA) TERHADAP UNJUK KERJA GENERATOR AXIAL FLUX DOUBLE SIDE ROTOR 1 FASA DENGAN KUTUB BERLAWANAN (N-S)

Qoidatul Khikmah<sup>1\*)</sup>, Widyono Hadi<sup>2</sup>, Widya Cahyadi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember

<sup>2</sup>Dosen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember

<sup>\*)</sup>E-mail: qoidatulhikmah18@gmail.com

### Abstrak

Energi terbarukan skala kecil sebagai sumber energi listrik alternatif membutuhkan generator *axial flux permanent magnet* (AFPM) yang dapat bekerja pada putaran rendah. Beberapa penelitian telah dilakukan tentang generator *axial flux* seperti rancang bangun maupun analisis parameter yang mempengaruhi performa generator, salah satunya yaitu celah udara. Pada penelitian sebelumnya mengenai celah udara hanya dilakukan dengan metode simulasi pada *software* seperti FEMM (*Finite Element Method Magnetic*) dan FEM (*Finite Element Method*). Pada penelitian ini diberikan variasi celah udara sebesar 8 mm, 9 mm, dan 10 mm untuk mengetahui pengaruhnya terhadap luaran generator *axial flux double side rotor* 1 fasa yang menggunakan magnet *Neodymium Iron Boron* (NdFeB) dan disusun secara kutub berlawanan (N-S). Dengan memberikan beban 3 LED seri pada kecepatan putar 3000 rpm, saat celah udara 8 mm diperoleh frekuensi 450.4 Hz, tegangan *output* 7.468 V, arus *output* 14.961 mA, daya *output*  $1.117 \times 10^{-1}$  W dan torsi rotor  $3.558 \times 10^{-4}$  Nm. Pada celah udara 9 mm diperoleh frekuensi 450,4 Hz, tegangan *output* 7.279 V, arus *output* 7.444 mA, daya *output*  $5.148 \times 10^{-2}$  W dan torsi rotor  $1.726 \times 10^{-4}$  Nm. Sedangkan pada celah udara 10 mm diperoleh frekuensi 450.4 Hz, tegangan *output* 6.826 V, arus *output* 1.298 mA, daya *output*  $8.860 \times 10^{-3}$  W dan torsi rotor  $2.822 \times 10^{-5}$  Nm.

*Kata kunci: celah udara, generator axial flux permanent magnet (AFPM), double side rotor.*

### Abstract

*Small-scale renewable energy as an alternative source of electrical energy requires an axial flux permanent magnet (AFPM) generator that can work at low speed rotations. Several studies have been conducted on axial flux generators such as in design and research of parameters that affect generator performance. One of which is the air gap. Previous research on air gaps was using simulation methods in software such as FEMM (Finite Element Method Magnetic) and FEM (Finite Element Method). This research was giving variations of air gap of 8 mm, 9 mm, and 10 mm to determine their effect on the output of 1 phase axial flux generator double side rotor using Neodymium Iron Boron (NdFeB) magnets and arranged in opposite poles (N-S). At a rotational speed of 3000 rpm with 3 LEDs series as a load, in the air gap of 8 mm obtained a frequency of 450.4 Hz, an output voltage of 7,468 V, an output current of 14,961 mA, an output power of  $1.117 \times 10^{-1}$  W and torque rotor of  $3.558 \times 10^{-4}$  Nm. In the 9 mm air gap test is obtained a frequency of 450.4 Hz, an output voltage of 7,279 V, an output current of 7,444 mA, an output power of  $5.148 \times 10^{-2}$  W and a rotor torque of  $1.726 \times 10^{-4}$  Nm. Testing generator at 10 mm air gap is obtained a frequency of 450.4 Hz, an output voltage of 6,826 V, an output current of 1,298 mA, an output power of  $8.860 \times 10^{-3}$  W and a rotor torque of  $2.822 \times 10^{-5}$  Nm.*

*Keywords: air gap, permanent magnet axial flux generator (AFPM), double side rotor*

### 1. Pendahuluan

Pemanfaatan sumber energi terbarukan salah satunya adalah dengan mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Generator adalah peralatan listrik yang dapat mengkonversikan energi mekanik menjadi energi listrik berdasarkan pada hukum *Faraday* [1].

Energi terbarukan seperti tenaga angin dan air sebagai sumber energi listrik alternatif skala kecil hanya mampu membangkitkan energi mekanik yang rendah, sehingga membutuhkan generator jenis *axial flux permanent magnet* (AFPM) yang dapat bekerja pada putaran rendah [2]. Pada putaran rendah, generator dengan konstruksi *double side rotor* lebih efisien dibandingkan dengan *generator double side stator*. Selain itu, kelebihan dari

generator *double side rotor* adalah rotor akan lebih mudah dibuat dengan jumlah kutub tertentu untuk mendapatkan kecepatan rendah sesuai yang diperlukan [3].

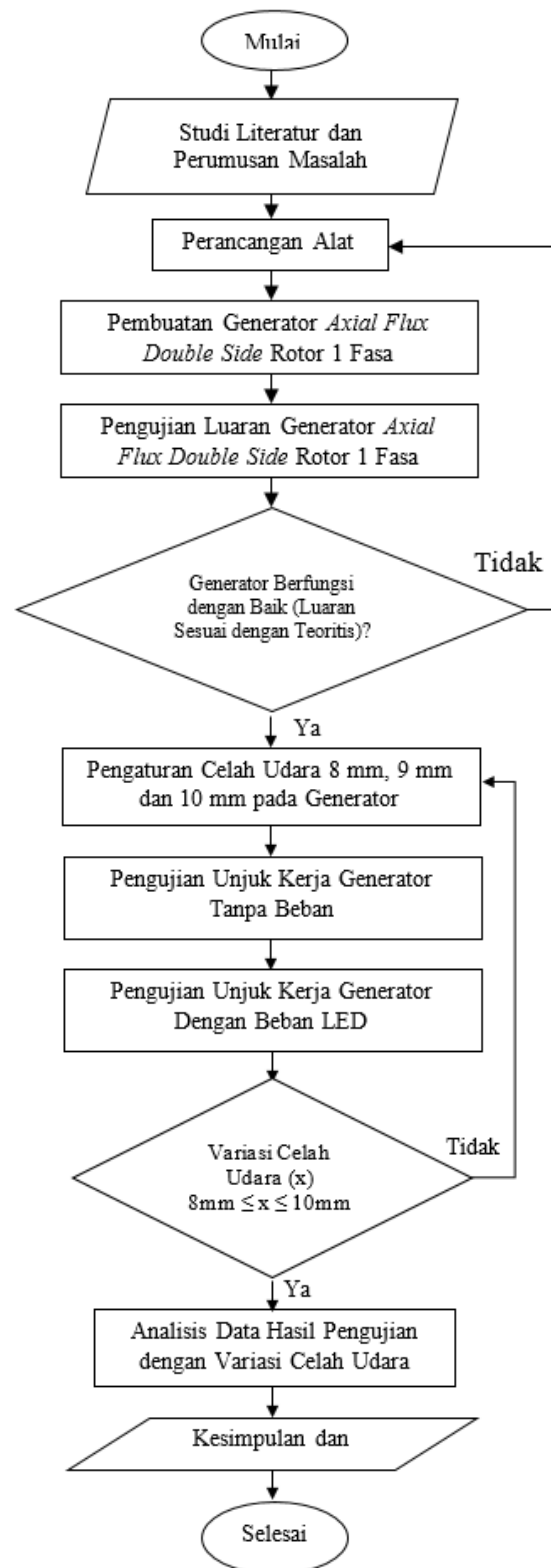
Beberapa penelitian telah dilakukan tentang generator *axial flux*, seperti rancang bangun dan analisis parameter yang mempengaruhi performa generator, salah satunya yaitu celah udara. Sebagaimana penelitian yang dilakukan oleh H. Prasetijo and S. Waluyo pada tahun 2016 yang berjudul “Optimasi Lebar Celah Udara Generator *Axial Magnet Permanen Putaran Rendah 1 Fasa*”, yaitu dengan mendesain generator magnet permanen aksial 1 fasa bertipe *double sided stator* pada celah udara tertentu untuk mendapatkan *output* tegangan dan daya optimal. Namun, penelitian ini dilakukan dengan cara simulasi untuk mendapatkan kerapatan fluks pada kumparan stator menggunakan aplikasi FEMM (*finite element Method Magnetic*) [4].

Pada penelitian ini akan dilakukan dengan memberikan variasi celah udara pada sebuah generator *axial flux* konstruksi *double side rotor* sebagai pembangkit listrik bolak-balik (AC) 1 fasa yang menggunakan magnet permanen berjenis *Neodymium Iron Boron (NdFeB)* dan akan disusun secara kutub berlawanan (N-S). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh celah udara terhadap unjuk kerja generator, khususnya konstruksi *double side rotor*. Analisis pengaruh perubahan celah udara terhadap unjuk kerja generator berfokus pada parameter tegangan, arus, frekuensi dan daya output.

## 2. Metode

### 2.1. Tahapan Penelitian

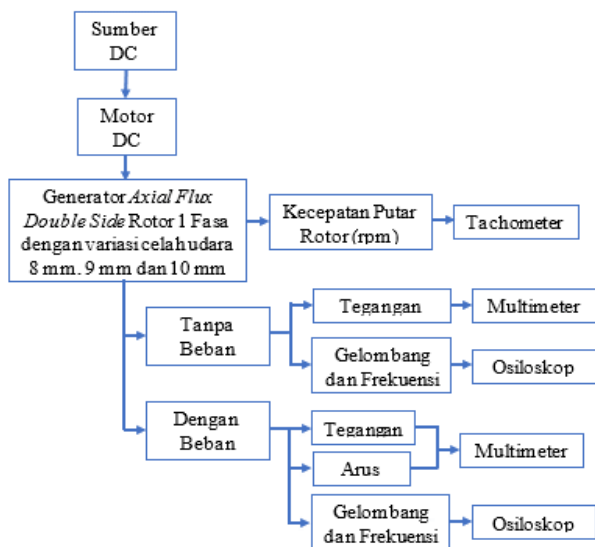
Tahapan penelitian ditunjukkan di Gambar 1, dimulai dengan studi literatur dan perumusan masalah. Tahap berikutnya adalah perancangan alat dengan menentukan spesifikasi generator yang akan dibuat. Dalam tahap ini juga dilakukan perancangan desain alat dalam dua dimensi maupun tiga dimensi. Tahap selanjutnya yaitu membuat Generator *Axial Flux Double Side Rotor 1 Fasa* sekaligus melakukan pengujian luaran generator guna memastikan bahwa generator bekerja dengan baik. Setelah generator berfungsi dengan baik, maka dilakukan pengaturan variasi celah udara 8 mm, 9 mm dan 10 mm, dengan masing-masing celah tersebut dilakukan pengujian dan pengambilan data pada dua kondisi yaitu tanpa menggunakan beban dan dengan menggunakan beban LED. Selanjutnya dilakukan analisis terhadap data yang diperoleh untuk mengetahui unjuk kerja dari generator tipe *axial flux* pada celah udara yang berbeda. Tahap terakhir adalah penarikan kesimpulan dan memberikan saran guna memperbaiki kekurangan dan pengembangan pada penelitian selanjutnya.



Gambar 1. Flowchart tahapan penelitian

## 2.2. Blok Diagram

Blok diagram system ditunjukkan di gambar 2. Energi mekanik yang digunakan untuk memutar rotor dari generator *axial flux double side* rotor yaitu sebuah motor DC. Generator *axial flux* ini memiliki konstruksi stator tunggal yang berada diantara dua rotor (*double side rotor*). Selanjutnya, dilakukan pengukuran menggunakan tachometer untuk mendapatkan kecepatan putar rotor generator dalam satuan radian per menit (rpm). Pengujian generator dilakukan pada kondisi tanpa beban dan dengan beban. Pengukuran arus dan tegangan menggunakan multimeter, sedangkan untuk mengetahui frekuensi gelombang luaran generator menggunakan osiloskop.



Gambar 2. Blok diagram sistem

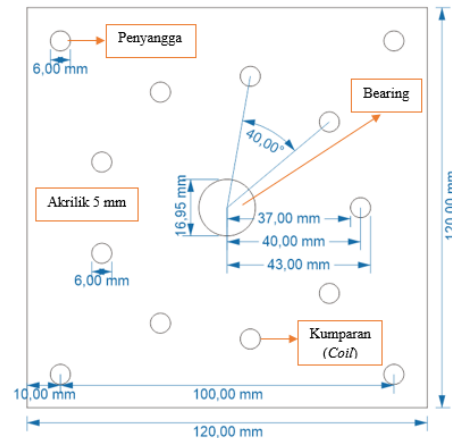
## 2.3. Desain Alat

### 2.3.1. Desain Stator

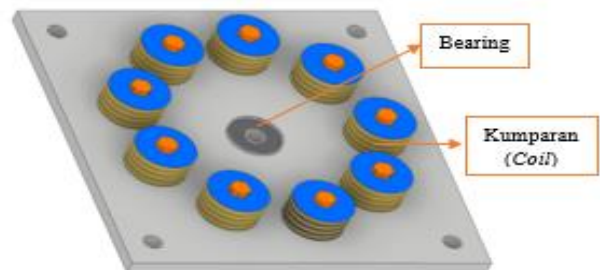
Generator *axial flux double rotor* 1 fasa yang akan dibuat, menggunakan satu buah *side stator* yang terdiri dari 9 buah kumparan. Kumparan tersebut disusun secara melingkar dengan jarak sudut antar kumparan sebesar  $40^\circ$  untuk menghasilkan gelombang output dengan sudut fasa yang sesuai. Dengan demikian, generator *axial flux double side rotor* 1 fasa ini memungkinkan untuk digunakan sebagai generator 3 fasa dengan masing-masing fasa memiliki 3 buah kumparan yang memiliki beda fasa sebesar  $120^\circ$ . Gambar 3 dan 4 merupakan desain dua dimensi (2D) kerangka stator dan tiga dimensi (3D) stator yang akan dibuat.

Pada masing-masing kumparan terdiri dari 300 lilitan kawat *email* berdiameter 0.4 mm. Berdasarkan kemampuan hantar arus kawat email pada *American Wire Gauge* (AWG) diketahui bahwa pada diameter kawat email sebesar  $\pm 0,4$  mm dengan AWG nomor 26 dan nilai resistansi per meter sebesar  $0,134 \Omega/m$  memiliki

kemampuan menghantarkan arus maksimum sebesar 0,361 A, merupakan arus yang relatif besar untuk generator skala kecil [5]. Kumparan dililitkan pada sebuah *spull* mesin jahit berbahan plastik. Kumparan diletakkan pada sebuah akrilik sebagai kerangka stator dengan tebal 5 mm secara melingkar.



Gambar 3. Desain dua dimensi (2D) kerangka stator



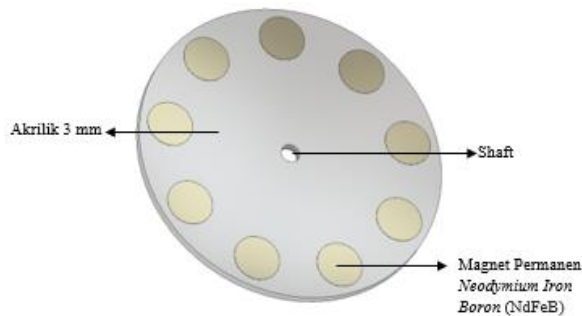
Gambar 4. Desain tiga dimensi (3D) stator

### 2.3.2. Desain Rotor

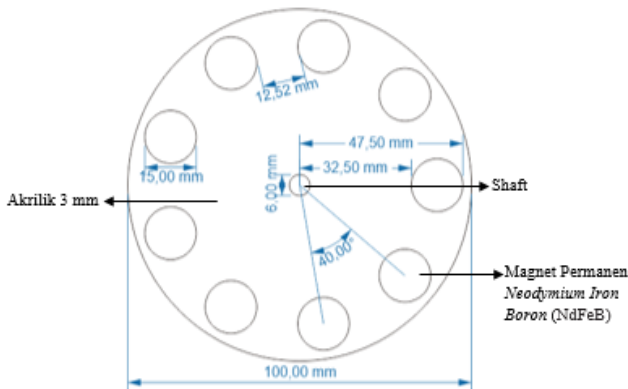
Berdasarkan hubungan jumlah kumparan dengan jumlah *pole*, maka dengan jumlah kumparan 9 buah diperoleh jumlah *pole* yang digunakan adalah 18 *pole*. Dengan konstruksi *double rotor*, maka untuk masing-masing rotor memiliki 9 *pole* [6]. Magnet permanen silinder yang digunakan adalah jenis *Neodymium Iron Boron* (NdFeB) berdiameter 15 mm dan tebal 3 mm. Penggunaan magnet dengan ukuran tersebut menyesuaikan ketersediaan magnet permanen silinder di pasaran. Gambar 5 menunjukkan desain rotor.

Seperti pada desain rotor di atas, rotor diletakkan pada sebuah kerangka akrilik tebal 3 mm secara melingkar dan setiap magnet memiliki jarak sudut sebesar  $40^\circ$ , seperti ditunjukkan di Gambar 6. Sama halnya dengan stator, jarak sudut yang sama bertujuan untuk menghasilkan gelombang output dengan sudut fasa yang sesuai. Adapun

kutub magnet disusun dengan saling berlawanan dengan kutub magnet disebelahnya [7].



Gambar 5. Desain tiga dimensi (3D) rotor

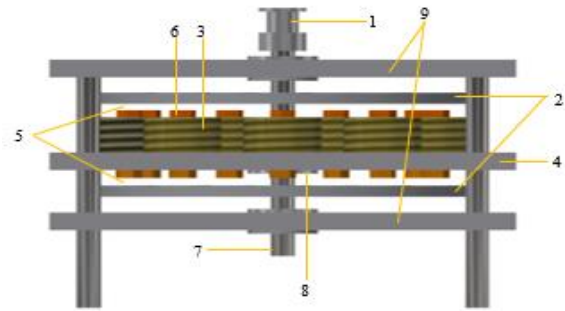


Gambar 6. Desain dua dimensi (2D) kerangka rotor

### 2.3.3. Desain Generator Axial Flux Double Side Rotor 1 Fasa

Stator dan rotor dirakit membentuk sebuah generator *axial flux* dengan dua buah rotor yang diletakkan diantara satu stator, seperti di Gambar 7. Konstruksi *double side* ini sering disebut sebagai celah ganda [8]. Jarak titik tengah rotor dengan titik tengah magnet sebesar 40 mm, begitu pula dengan titik tengah stator dengan titik tengah kumparan. Dengan demikian, titik tengah magnet akan sejajar dengan titik tengah kumparan. Hal ini dapat menyebabkan penyebaran fluks magnet akan lebih maksimal.

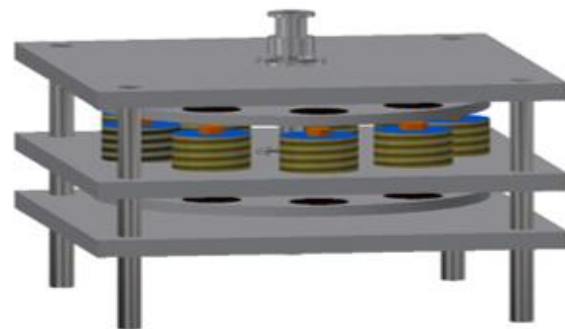
Pemodelan generator *double side rotor* seperti pada Gambar 8 mengacu pada penelitian So-Young Sung pada tahun 2012 [9]. Dimana stator yang berisi kumparan diletakkan diantara dua rotor yang berisi magnet permanen pada celah udara tertentu dengan kutub pada magnet yang berhadapan antara dua rotor saling berlawanan (N-S) secara vertikal untuk menghasilkan fluks *axial*.



Keterangan :

- |                          |                      |
|--------------------------|----------------------|
| 1. Pulley                | 6. Inti Kumparan     |
| 2. Rotor                 | 7. Shaft             |
| 3. Kumparan (Coil)       | 8. Bearing           |
| 4. Stator                | 9. Akrilik Penyangga |
| 5. Celah Udara (Air Gap) |                      |

Gambar 7. Desain Tiga Dimensi (3D) Generator Axial Flux Double Side Rotor 1 Fasa Tampak Samping



Gambar 8. Desain Tiga Dimensi (3D) Generator Axial Flux Double Side Rotor 1 Fasa

## 2.4. Metode Pengumpulan Data

### 2.4.1. Pengujian

Pengumpulan data dilakukan pada variasi celah udara 8 mm, 9 mm dan 10 mm untuk kondisi:

1. Pengujian tanpa beban  
 Pengujian ini dilakukan pada kecepatan putar 500 rpm, 1000 rpm, 1500 rpm, 2000 rpm, 2500 rpm dan 3000 rpm untuk memperoleh nilai frekuensi dan tegangan *open circuit* (Voc).
2. Pengujian dengan beban  
 Pengujian ini dilakukan dengan memberikan beban berupa LED yang dikombinasikan hubungan seri dan paralel untuk masing-masing variasi celah udara. Pada pengujian ini akan didapatkan nilai arus dan tegangan *output* sehingga diperoleh daya luaran generator dan torsi putar rotor.

### 2.4.2. Perhitungan

Perhitungan beberapa parameter dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut:

1. Frekuensi luaran Generator *Axial Flux* [10].

$$f = \frac{np}{120} \quad (1)$$

dimana:

$n$  : kecepatan putar rotor (rpm)

$p$  : jumlah *pole* magnet

$f$  : frekuensi (Hz)

2. Fluks Permanen Magnet [11].

$$\Phi_{max} = A_{magn} B_{max} \quad (2)$$

$$A_{magnet} = \pi r_{magnet}^2 \quad (3)$$

dimana:

$\Phi_{max}$  : fluks maksimum magnet (Wb)

$A_{magn}$  : luasan medan magnet (m<sup>2</sup>)

$B_{max}$  : kerapatan medan magnet maksimum (T)

$A_{magnet}$  : luasan medan magnet (m<sup>2</sup>)

$r_{magnet}$  : jari-jari magnet (m)

Kerapatan medan magnet maksimum yang melalui celah udara dapat diketahui dengan persamaan berikut [12] :

$$B_{max} = B_r \frac{lm}{lm + \delta} \quad (4)$$

dimana:

$B_r$  : densitas fluks magnet (T)

$lm$  : tinggi/tebal magnet (m)

$\delta$  : lebar celah udara (m)

3. Tegangan Luarannya Generator *Axial Flux*.

Garis gaya listrik diinduksikan dalam kumparan dengan persamaan:

$$E_a = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph} \quad (5)$$

dimana:

$E_a$  : tegangan efektif induksi generator (V)

$N$  : jumlah lilitan

$Ns$  : jumlah kumparan

$Nph$  : jumlah fasa

Berdasarkan rangkaian ekivalen generator saat terhubung beban, tegangan luaran generator diberikan pada persamaan [13]:

$$V = E_a - I \cdot Z \quad (6)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad (7)$$

$$X_L = 2\pi fL \quad (8)$$

dimana:

$V$  : tegangan efektif *output* generator (V)

$I$  : arus *output* generator (A)

$Z$  : impedansi ( $\Omega$ )

$R$  : resistansi ( $\Omega$ )

$X_L$  : reaktansi induktif ( $\Omega$ )

$L$  : induktansi (H)

4. Daya Keluaran Generator *Axial Flux* 1 Fasa.

$$P_o = V \cdot I \quad (9)$$

dimana:

$P_o$  : daya *output* generator (W)

5. Torsi pada Rotor Generator [14].

$$\tau = \frac{P_o}{2\pi \frac{n}{60}} \quad (10)$$

dimana :

$\tau$  : Torsi (Nm)

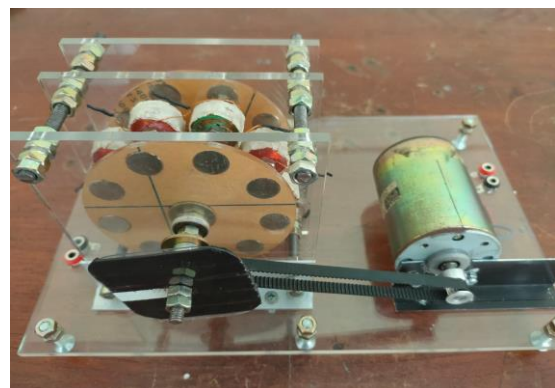
6. Menghitung *Error* Persen Tegangan *Output*

$$\%V_{out} = \left| \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil ukur}}{\text{Hasil perhitungan}} \right| \times 100\% \quad (11)$$

## 3. Hasil dan Pembahasan

Gambar 9 menunjukkan generator *axial flux double side rotor* 1 fasa yang telah dibuat dan digunakan pada penelitian ini. Berdasarkan hasil pengujian menggunakan Teslameter didapatkan densitas fluks magnet *Neodymium Iron Boron* Magnet (NdFeB) berdiameter 15 mm dengan tebal 3 mm adalah sebesar 2 mT.

Selain itu, dilakukan pengukuran resistansi dan induktansi pada kumparan (*coil*) menggunakan LCRmeter, seperti pada Gambar 10. Pada kawat email berdiameter 0,4 mm dengan luas penampang sebesar  $1.256 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup> didapatkan nilai resistansi jangkar ( $R_a$ ) sebesar 20,5  $\Omega$  sedangkan nilai induktansi jangkar ( $X_a$ ) sebesar 8.82 mH.



**Gambar 9.** Generator *axial flux double side rotor* 1 fasa dengan kutub berlawanan (N-S) menggunakan magnet *Neodymium Iron Boron* (NdFeB)



Gambar 10. Pengukuran densitas fluks magnet *Neodymium Iron Boron* (NdFeB)

### 3.1. Pengujian Generator *Axial Flux Double Side Rotor* 1 Fasa dengan Variasi Celah Udara (*Air Gap*)

#### 3.1.1. Pengujian Pada Celah Udara 8 mm

Data hasil pengujian generator tanpa beban pada celah 8 mm disajikan di Tabel 1. Berdasarkan Tabel 1, diketahui bahwa frekuensi dan tegangan *open circuit* tanpa beban generator mengalami kenaikan seiring dengan semakin besarnya kecepatan putar pada rotor. Pada saat kondisi tanpa beban, tegangan *output* sama dengan tegangan induksi yang dibangkitkan generator.

Pengujian kedua yaitu pengujian dengan beban. Beban yang digunakan adalah 3 buah LED warna merah terhubung seri, dengan hasil ditunjukkan di Tabel 2. Kemudian dilakukan penambahan jumlah paralel dengan jumlah 3 LED seri di setiap paralelnya, dan hasilnya disajikan di Tabel 3 dan 4.

Tabel 1. Data hasil pengujian tanpa beban pada celah udara 8 mm

Kecepatan (rpm)	Voc (V)	Frekuensi (Hz)
500	1,632	75,07
1000	3,153	150,3
1500	4,597	225,2
2000	5,973	300,4
2500	7,316	375,3
3000	8,496	450,4

Tabel 2. Data pengujian dengan beban 3 LED terhubung seri pada celah udara 8 mm

Kecepatan (rpm)	Frekuensi (Hz)	Tegangan (V)	Arus (mA)
500	75,07	1,630	0,001
1000	150,3	3,152	0,001
1500	225,2	4,558	1,106
2000	300,4	5,795	5,388
2500	375,3	6,843	10,232
3000	450,4	7,468	14,961

Tabel 3. Data pengujian dengan beban 2 paralel (3 LED terhubung seri) pada celah udara 8 mm

Kecepatan (rpm)	Frekuensi (Hz)	Tegangan (V)	Arus (mA)
500	75,07	1,629	0,001
1000	150,3	3,151	0,001
1500	225,2	4,531	1,405
2000	300,4	5,718	6,694
2500	375,3	6,707	12,174
3000	450,4	7,245	17,142

Tabel 4. Data pengujian dengan beban 3 paralel (3 LED terhubung seri) pada celah udara 8 mm

Kecepatan (rpm)	Frekuensi (Hz)	Tegangan (V)	Arus (mA)
500	75,07	1,630	0,001
1000	150,3	3,151	0,001
1500	225,2	4,524	1,869
2000	300,4	5,686	7,378
2500	375,3	6,641	12,980
3000	450,4	7,183	17,193

Berdasarkan data dari Tabel 2-4, dapat dianalisis bahwa pada kecepatan putar yang sama, semakin besar beban yang dihubungkan secara paralel pada generator, maka semakin besar pula arus yang mengalir. Hal ini menyebabkan tegangan *output* yang terukur semakin kecil. Sebagaimana yang disebutkan sebelumnya bahwa akan terjadi drop tegangan yang semakin besar.

Semakin besar kecepatan putar pada generator disertai dengan semakin besar penambahan beban maka drop tegangan akan semakin besar sehingga tegangan *output* semakin kecil namun arus yang mengalir semakin besar.

#### 3.1.2. Pengujian Pada Celah Udara 9 mm

Data hasil pengujian unjuk kerja generator untuk celah udara 9 mm pada kondisi tanpa beban dan dengan beban dirunjukkan pada Tabel 5-8.

Tabel 5. Data pengujian tanpa beban pada celah udara 9 mm

Kecepatan (rpm)	Voc (V)	Frekuensi (Hz)
500	1,500	75,07
1000	2,706	150,3
1500	3,937	225,2
2000	5,228	300,4
2500	6,480	375,3
3000	7,669	450,4

Tabel 6. Data pengujian dengan beban 3 LED terhubung seri pada celah udara 9 mm

Kecepatan (rpm)	Frekuensi (Hz)	Tegangan (V)	Arus (mA)
500	75,07	1,499	0,001
1000	150,3	2,706	0,001
1500	225,2	3,931	0,024
2000	300,4	5,182	1,384
2500	375,3	6,323	3,907
3000	450,4	7,279	7,444

Tabel 7. Data pengujian dengan beban 2 paralel (3 LED terhubung seri) pada celah udara 9 mm

Kecepatan (rpm)	Frekuensi (Hz)	Tegangan (V)	Arus (mA)
500	75,07	1,499	0,001
1000	150,3	2,705	0,001
1500	225,2	3,929	0,042
2000	300,4	5,162	1,888
2500	375,3	6,314	5,013
3000	450,4	7,153	9,006

Tabel 8. Data pengujian dengan beban 3 paralel (3 LED terhubung seri) pada celah udara 9 mm

Kecepatan (rpm)	Frekuensi (Hz)	Tegangan (V)	Arus (mA)
500	75,07	1,499	0,001
1000	150,3	2,705	0,001
1500	225,2	3,927	0,055
2000	300,4	5,156	2,242
2500	375,3	6,230	5,592
3000	450,4	7,102	9,624

### 3.1.3. Pengujian Pada Celah Udara 10 mm

Tabel 9- 12 menunjukkan data hasil pengujian tanpa dan dengan beban pada celah udara 10 mm.

Tabel 9. Data pengujian tanpa beban pada celah udara 10 mm

Kecepatan (rpm)	Voc (V)	Frekuensi (Hz)
500	1,341	75,07
1000	2,457	150,3
1500	3,555	225,2
2000	4,726	300,4
2500	5,843	375,3
3000	6,976	450,4

Tabel 10. Data pengujian dengan beban 3 LED terhubung seri pada celah udara 10 mm

Kecepatan (rpm)	Frekuensi (Hz)	Tegangan (V)	Arus (mA)
500	75,07	1,340	0,001
1000	150,3	2,454	0,001
1500	225,2	3,554	0,001
2000	300,4	4,724	0,003
2500	375,3	5,740	0,233
3000	450,4	6,826	1,298

Tabel 11. Data pengujian dengan beban 2 paralel (3 LED terhubung seri) pada celah udara 10 mm

Kecepatan (rpm)	Frekuensi (Hz)	Tegangan (V)	Arus (mA)
500	75,07	1,340	0,001
1000	150,3	2,453	0,001
1500	225,2	3,553	0,001
2000	300,4	4,723	0,005
2500	375,3	5,734	0,361
3000	450,4	6,779	1,768

Tabel 12. Data pengujian dengan beban 3 paralel (3 LED terhubung seri) pada celah udara 10 mm

Kecepatan (rpm)	Frekuensi (Hz)	Tegangan (V)	Arus (mA)
500	75,07	1,340	0,001
1000	150,3	2,454	0,001
1500	225,2	3,553	0,001
2000	300,4	4,722	0,007
2500	375,3	5,726	0,428
3000	450,4	6,774	1,931

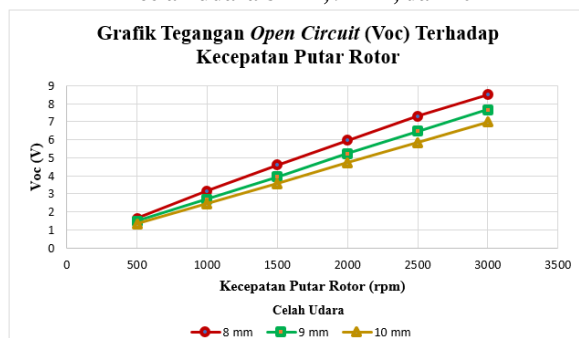
## 3.2. Analisis Pengaruh Air Gap (Celah Udara) Terhadap Unjuk Kerja Generator Axial Flux Double Side Rotor 1 Fasa

### 3.2.1. Frekuensi Gelombang Output Generator

Gambar 11 menunjukkan grafik frekuensi gelombang output generator terhadap kecepatan putar rotor pada variasi celah udara 8 mm, 9 mm, dan 10 mm berdasarkan data pengujian yaitu Tabel 1 hingga Tabel 12. Dapat dinyatakan bahwa jarak celah udara tidak mempengaruhi besar frekuensi luaran generator. Besar frekuensi gelombang output generator dipengaruhi oleh kecepatan putar rotor dan jumlah pole yang digunakan generator. Pada setiap pengujian celah udara jumlah pole yang digunakan tetap, maka frekuensi yang dihasilkan juga sama pada kecepatan putar rotor yang sama.



Gambar 11. Grafik frekuensi gelombang output generator terhadap kecepatan putar rotor pada variasi celah udara 8 mm, 9 mm, dan 10 mm



Gambar 12. Grafik tegangan open circuit (Voc) generator terhadap kecepatan putar rotor pada variasi celah udara 8 mm, 9 mm, dan 10 mm

### 3.2.2. Tegangan Output Generator

#### 3.2.2.1. Tegangan Output Generator Tanpa Beban

Berdasarkan data tegangan *output* generator pada kondisi tanpa beban (*Voc*) yaitu Tabel 1, Tabel 5 dan Tabel 9, dilakukan perbandingan tegangan *output*. Dari Gambar 12, diketahui bahwa semakin besar celah udara yang digunakan, maka semakin kecil tegangan *Voc* yang dihasilkan. Hal ini disebabkan oleh semakin dekatnya magnet pada rotor dengan inti besi pada stator, maka medan magnet dari magnet permanen yang diterima oleh inti besi pada *coil* akan semakin besar dan kerapatan medan magnet yang diterima juga semakin besar.

Dengan semakin besar kecepatan putar rotor, maka frekuensi semakin besar yang dapat menyebabkan tegangan *output* semakin besar. Sebagaimana hasil penelitian oleh F. Danang Wijaya, dkk, disebutkan bahwa frekuensi gelombang *output* pada generator *axial flux* sebanding dengan tegangan *output* yang dihasilkan [3].

Secara perhitungan, pada masing-masing celah udara terdapat perbedaan pada nilai fluks magnet. Pada celah udara 8 mm diperoleh nilai  $B_{max}$  sebesar  $5,455 \times 10^{-4}$  T sehingga nilai fluks magnet maksimum ( $\varphi_{max}$ ) sebesar  $1,734 \times 10^{-6}$  Wb. Pada celah udara 9 mm diperoleh nilai  $B_{max}$  sebesar  $5 \times 10^{-4}$  T sehingga nilai  $\varphi_{max}$  sebesar  $1,590 \times 10^{-6}$  Wb. Sedangkan, pada celah udara 10 mm diperoleh nilai  $B_{max}$  sebesar  $4,620 \times 10^{-4}$  T sehingga nilai  $\varphi_{max}$  sebesar  $1,467 \times 10^{-6}$  Wb.

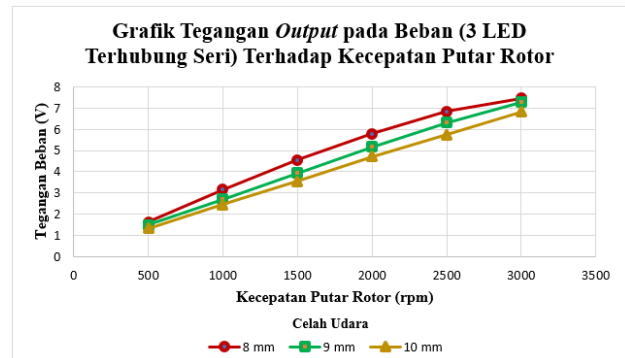
Hasil perhitungan yang telah dilakukan untuk mengetahui keakuratan dari hasil pengukuran yang diperoleh ditunjukkan pada Tabel 13.

Tabel 13. Perhitungan *error* persen tegangan *open circuit* (*Voc*) generator pada variasi celah udara 8 mm, 9 mm, dan 10 mm

Celah Udara (mm)	Kecepatan Putar Rotor (rpm)	Voc Ukur (V)	Voc Hitung (V)	Error Persen Voc (%)
8 mm	500	1,632	1,559	4,66
	1000	3,153	3,119	1,10
	1500	4,597	4,678	1,73
	2000	5,973	6,238	4,24
	2500	7,316	7,797	6,17
	3000	8,496	9,356	9,19
9 mm	500	1,500	1,429	4,94
	1000	2,706	2,859	5,35
	1500	3,937	4,288	8,19
	2000	5,228	5,718	8,57
	2500	6,480	7,147	9,33
	3000	7,669	8,577	10,58
10 mm	500	1,341	1,319	1,63
	1000	2,457	2,639	6,90
	1500	3,555	3,958	10,19
	2000	4,726	5,278	10,46
	2500	5,843	6,597	11,43
	3000	6,976	7,917	11,88

#### 3.2.2.2. Tegangan Output Generator Dengan Beban

Perbandingan data tegangan *output* saat generator terhubung beban 3 buah LED yang dihubungkan secara seri pada celah udara 8 mm, 9 mm, dan 10 mm ditunjukkan pada Gambar 13. Tabel 14 merangkum perbandingan tersebut.



Gambar 13. Grafik tegangan *output* generator dengan beban terhadap kecepatan putar rotor pada variasi celah udara 8 mm, 9 mm, dan 10 mm

Tabel 14. Perhitungan *error* persen tegangan *output* dengan beban pada variasi celah udara 8 mm, 9 mm, dan 10 mm

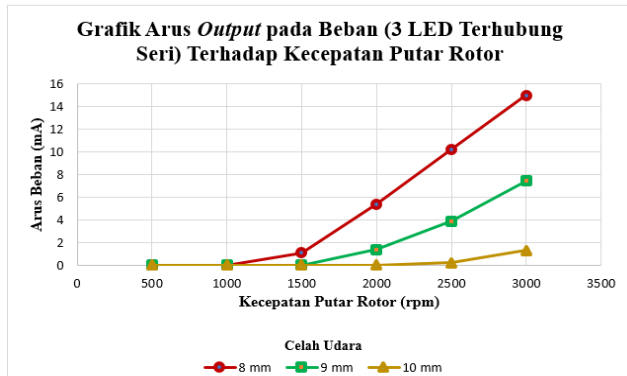
Celah Udara (mm)	Kecepatan Putar Rotor (rpm)	Tegangan Output Ukur (V)	Tegangan Output Hitung (V)	Error Persen Voc (%)
8 mm	500	1,630	1,559	4,53
	1000	3,152	3,119	1,07
	1500	4,558	4,652	2,01
	2000	5,795	6,095	4,93
	2500	6,843	7,498	8,74
	3000	7,468	8,873	15,84
9 mm	500	1,499	1,429	4,87
	1000	2,706	2,859	5,35
	1500	3,931	4,288	8,32
	2000	5,182	5,681	8,79
	2500	6,323	7,033	10,10
	3000	7,279	8,336	12,68
10 mm	500	1,340	1,319	1,56
	1000	2,454	2,639	7,01
	1500	3,554	3,958	10,22
	2000	4,724	5,278	10,49
	2500	5,740	6,591	12,91
	3000	6,826	7,875	13,32

Pada kecepatan putar yang sama, semakin besar jarak celah udara maka tegangan pada beban akan semakin kecil. Perbedaan tersebut terjadi karena besar fluks magnet yang diterima inti besi pada kumparan semakin kecil. Pada kecepatan putar yang sama, drop tegangan yang terjadi pada celah udara 8 mm lebih besar dari celah udara 9 mm dan 10 mm. Drop tegangan yang terjadi dapat diminimalisir dengan menggunakan jenis kawat email



yang memiliki nilai resistansi dan induktansi lebih rendah untuk memperkecil impedansi.

### 3.2.3. Arus Output Generator



Gambar 14. Grafik arus output generator terhadap kecepatan putar rotor pada variasi celah udara 8 mm, 9 mm, dan 10 mm

Gambar 14 menyajikan perbandingan data arus output dengan beban 3 buah LED secara seri pada celah udara 8 mm, 9 mm, dan 10 mm pada Tabel 2, Tabel 6 dan Tabel 10. Berdasarkan grafik tersebut diketahui bahwa semakin kecil celah udara pada generator, maka arus output yang mengalir pada beban akan semakin besar. Sehingga, drop tegangan yang terjadi juga semakin besar. Drop tegangan dipengaruhi oleh arus yang mengalir pada stator dan impedansi kumparan. Impedansi pada kumparan dipengaruhi oleh resistansi dan reaktansi induktif. Reaktansi induktif dipengaruhi oleh besar kecepatan putar rotor. Maka, pada kecepatan putar yang sama untuk variasi celah udara berapapun, nilai impedansi kumparan adalah tetap. Sehingga drop tegangan yang terjadi hanya dipengaruhi oleh arus output generator.

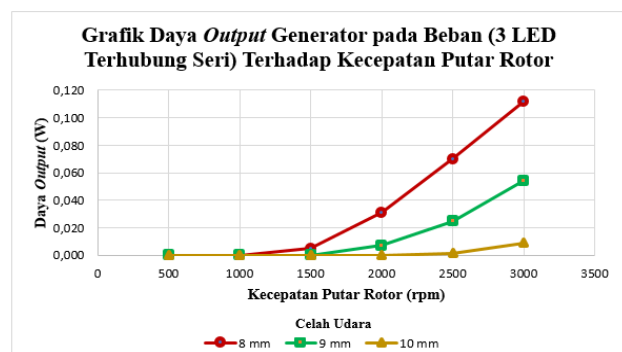
Tabel 15. Daya output generator pada variasi celah udara 8 mm, 9 mm, dan 10 mm

Celah Udara (mm)	Kecepatan Putar Rotor (rpm)	Daya Output (W)
8 mm	500	$1,630 \times 10^{-6}$
	1000	$3,152 \times 10^{-6}$
	1500	$5,041 \times 10^{-3}$
	2000	$3,122 \times 10^{-2}$
	2500	$7,002 \times 10^{-2}$
	3000	$1,117 \times 10^{-1}$
9 mm	500	$1,499 \times 10^{-6}$
	1000	$2,706 \times 10^{-6}$
	1500	$9,434 \times 10^{-5}$
	2000	$7,172 \times 10^{-3}$
	2500	$2,470 \times 10^{-2}$
	3000	$5,418 \times 10^{-2}$
10 mm	500	$1,340 \times 10^{-6}$
	1000	$2,454 \times 10^{-6}$
	1500	$3,554 \times 10^{-6}$
	2000	$1,417 \times 10^{-5}$
	2500	$1,337 \times 10^{-3}$
	3000	$8,860 \times 10^{-3}$

### 3.2.4. Daya Output Generator

Perhitungan daya output untuk masing-masing celah udara 8 mm, 9 mm dan 10 mm pada beban 3 buah LED yang terhubung seri ditunjukkan pada Tabel 15 dan Gambar 15. Semakin kecil jarak celah udara, maka daya output yang dihasilkan semakin besar. Besar daya output pada generator selain dari faktor konstruksi generator yang mempengaruhi besar kecilnya tegangan, juga dipengaruhi oleh beban yang digunakan.

Dari hasil penelitian Prasetijo dan Waluyo [4], berdasarkan hasil perhitungan dan simulasi menggunakan FEMM (*finite element Method Magnetic*), tegangan dan daya output terbesar didapat pada celah udara 2 mm yaitu sebesar 87,25 V dan 322,84 VA. Sedangkan tegangan dan daya output terkecil didapat pada jarak 5 mm dengan tegangan sebesar 62,16 V dan 229,99 VA [4]. Hasil penelitian tersebut selaras dengan hasil penelitian ini, dimana semakin kecil jarak celah udara antara stator dan rotor, maka semakin besar tegangan output, arus output dan daya output yang dihasilkan generator.



Gambar 15. Grafik daya output generator terhadap kecepatan putar rotor pada variasi celah udara 8 mm, 9 mm, dan 10 mm

Berdasarkan kemampuan hantar arus kawat email pada *American Wire Gauge* (AWG) diketahui kawat email memiliki kemampuan menghantarkan arus maksimum sebesar 0,361 A. Sehingga, pada kecepatan putar 3000 rpm untuk celah udara 8 mm generator memiliki kapasitas daya sebesar  $\pm 3,067$  W, pada celah udara 9 mm memiliki kapasitas daya sebesar  $\pm 2,769$  W dan pada celah udara 10 mm memiliki kapasitas daya sebesar  $\pm 2,518$  W.

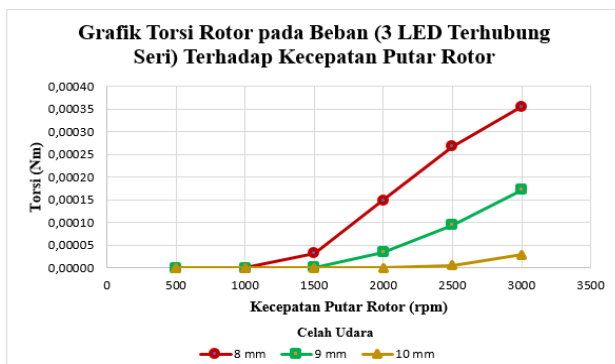
### 3.2.5. Torsi Putar Rotor

Semakin kecil jarak celah udara, maka torsi putar rotor generator semakin besar, seperti ditunjukkan pada Tabel 16 dan Gambar 16. Saat generator diberikan beban, generator akan memenuhi daya pada beban. Untuk dapat memenuhi daya beban yang semakin besar, dengan kecepatan putar yang tetap rotor generator akan memberikan gaya putar atau torsi yang semakin besar. Gaya putar atau torsi yang terlalu besar pada generator

perlu diperhitungkan dengan menyesuaikan penggerak generator yang digunakan. Pada penelitian yang dilakukan oleh Y. Chen, dkk dikatakan bahwa torsi putar rotor pada konstruksi *double side* rotor memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan jenis generator lainnya. Hal ini karena generator jenis *double* rotor memiliki jalur aksial fluks yang lebih panjang dan jumlah kutub magnet yang terhubung ke jaringan yang lebih besar[15].

Tabel 16. Torsi putar rotor generator pada variasi celah udara 8 mm, 9 mm, dan 10 mm

Celah Udara (mm)	Kecepatan Putar Rotor (rpm)	Torsi Putar Rotor (Nm)
8 mm	500	$3,115 \times 10^{-8}$
	1000	$3,011 \times 10^{-8}$
	1500	$3,211 \times 10^{-5}$
	2000	$1,492 \times 10^{-4}$
	2500	$2,676 \times 10^{-4}$
9 mm	3000	$3,558 \times 10^{-4}$
	500	$2,864 \times 10^{-8}$
	1000	$2,585 \times 10^{-8}$
	1500	$6,009 \times 10^{-7}$
	2000	$3,426 \times 10^{-5}$
10 mm	2500	$9,441 \times 10^{-5}$
	3000	$1,726 \times 10^{-4}$
	500	$2,561 \times 10^{-8}$
	1000	$2,345 \times 10^{-8}$
	1500	$2,264 \times 10^{-8}$
10 mm	2000	$6,770 \times 10^{-8}$
	2500	$5,111 \times 10^{-6}$
	3000	$2,822 \times 10^{-5}$



Gambar 16. Grafik torsi rotor generator terhadap kecepatan putar rotor pada variasi celah udara 8 mm, 9 mm, dan 10 mm

#### 4. Kesimpulan

Pada variasi celah udara yang diberikan pada generator *axial flux double side* rotor 1 fasa menggunakan magnet permanen *Neodymium Iron Boron* (NdFeB) dengan kutub berlawanan (N-S) diketahui bahwa jarak celah udara tidak mempengaruhi besar frekuensi luaran generator. Pada celah udara 8 mm, 9 mm, dan 10 mm saat kecepatan putar yang diberikan sebesar 3000 rpm, frekuensi luaran generator yang dihasilkan sama besar yaitu 450,4 Hz. Semakin kecil jarak celah udara yang digunakan maka

tegangan *open circuit* (Voc), tegangan *output* dengan beban, arus *output*, daya *output* yang dihasilkan dan torsi putar pada rotor semakin besar. Dengan parameter generator dan penggerak yang relatif sama, jarak celah udara yang ideal untuk digunakan pada penelitian selanjutnya berkisar antara 5 mm hingga 8 mm jika digunakan untuk membangkitkan luaran berupa tegangan dan arus yang relatif besar dari hasil penelitian ini. Namun, pemilihan besar celah udara yang digunakan pada generator selain memperhatikan besar tegangan, arus dan daya yang ingin dihasilkan juga harus mempertimbangkan kemampuan *prime mover* generator untuk memenuhi besar torsi pada rotor.

#### Referensi

- [1]. A. Fajar, "Rancang Bangun Generator Sinkron Axial Flux Permanent Magnet 1500 Watt," no. December, 2017.
- [2]. M. F. Alqodri, C. E. Rustana, and H. Nasbey, "Rancang Bangun Generator Fluks Aksial Putaran Rendah Magnet Permanen Jenis Neodymium (NdFeB) Untuk Turbin Angin Sumbu Vertikal Tipe Double-Stage Savionus," *Semin. Nas. Fis. SNF 2015*, vol. IV, pp. 135–142, 2015.
- [3]. F. Danang Wijaya, R. A. Nugroho, and Y. Susilo W, *Perancangan Generator Magnet Permanen Fluks Aksial Putaran Rendah*. 2014.
- [4]. H. Prasetijo and S. Waluyo, "Optimasi Lebar Celah Udara Generator Axial Magnet Permanen Putaran Rendah 1 Fase," 2015.
- [5]. Whilst J.S.T. (U.K.) Ltd., *American Wire Gauge (AWG) Cable Conductor Size*. England: J.S.T. (U.K.) Ltd.
- [6]. Andika and A. Hamzah, "Perancangan dan Pembuatan Generator Fluks Radial Tiga Fasa Magnet Permanen Kecepatan Rendah," *Univ. Riau*, vol. 5, no. 1, pp. 1–8, 2018.
- [7]. C. H. Prisandi, "Studi Desain Kumparan Stator Pada Generator Sinkron Magnet Permanen Fluks Aksial Tanpa Inti Stator," *Fak. Tek. Univ. Indonesia*, 2011.
- [8]. F. J. Gieras, R.-J. Wang, and J. M. Kamper, *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*, vol. 2. 2008.
- [9]. S. Y. Sung, J. H. Jeong, Y. S. Park, J. Y. Choi, and S. M. Jang, "Improved analytical modeling of axial flux machine with a double-sided permanent magnet rotor and slotless stator based on an analytical method," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 11, pp. 2945–2948, 2012.
- [10]. United States Department of Energy and Washington, "AC Theory , Circuits , Generators & Motors," pp. 3–92, 1992.
- [11]. S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals-5th ed*. New York, 2012.
- [12]. H. Prasetijo, Ropiudin, B. Dharmawan, "Permanent Magnet Generator as Low Speed Electric Power Plant," *Dinamika Rekayasa*, vol. 8, no. 2, Aug. 2012.
- [13]. UTPL et al., "Part I: Theory , Construction , Principles of Operation," vol. 40, no. 10. 2011.
- [14]. W. A. Ibrahim, W. T. Widodo, and W. T. Supardi, "Sistem Kontrol Torsi pada Motor DC," *IJEIS*, vol. 6, no. 1, pp. 93–104, 2016.
- [15]. Y. Chen, P. Pillay, and A. Khan, "PM wind generator topologies," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 41, no. 6, pp. 1619–1626, Nov. 2005.