



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

SKRIPSI

Oleh:

Qoidatul Khikmah

NIM. 161910201038

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK ELEKTRO
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2020**



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

SKRIPSI

Oleh:

Qoidatul Khikmah

NIM. 161910201038

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK ELEKTRO
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2020**

PERSEMBAHAN

Dengan mengucap puji dan syukur kehadirat Allah SWT serta limpahan kasih dan karunia-Nya yang telah memberikan kekuatan dan kemudahan bagi saya untuk dapat menyelesaikan pendidikan di jenjang Perguruan Tinggi Strata 1 dengan terselesaikannya penulisan skripsi ini. Sholawat dan salam selalu dipanjatkan kepada Rasulullah Muhammad SAW. Dengan tulus ikhlas dan penuh kerendahan hati skripsi ini saya persembahkan kepada :

1. Allah SWT yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang;
2. Nabi besar Muhammad SAW, yang menjadi suri tauladan bagi seluruh umat;
3. Kedua orang tua tercinta, Bapak Misnoto dan Ibunda Muhoisun. Terima kasih atas pengorbanan dan usaha dalam membesarkan saya, segala cinta dan kasih sayang untuk saya, dorongan, nasehat, kepercayaan dan air mata yang menetes dalam setiap untaian doa yang senantiasa mengiringi langkah perjuangan dan keberhasilan saya. *I love you.*
4. Kakak dan adik saya, Nunik Maulidiah dan Dewi Khumairoh yang meramaikan hari-hari perjuangan dan menjadi salah satu motivasi dan semangat saya untuk meraih keberhasilan.
5. Diri sendiri yang telah berjuang dan bertahan sampai sejauh ini, yang terkadang mencoba untuk tetap tegar dalam semua keadaan sulit. Kamu hebat dan telah lebih besar dari gunung hingga kapanpun!
6. Bapak Ir. Widyono Hadi, M.T. selaku Dosen Pembimbing Utama dan Bapak Widya Cahyadi, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu dan fikiran serta perhatiannya guna memberikan bimbingan dan arahan demi terselesainya skripsi ini.
7. Bapak Alfredo Bayu Satriya, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing akademik yang telah membimbing, membantu dan menjadi inspirasi saya dalam menanamkan rasa disiplin serta tanggung jawab selama menjadi mahasiswa.
8. Guru-guru pengajar TK Dharma Wanita Penataan, SDN Penataan, SMPN 2 Gondangwetan, SMAN 1 Gondangwetan dan dosen-dosen pengajar Teknik

Elektro Universitas Jember. Terima kasih atas doa, semangat dan semua ilmu yang telah diberikan.

9. Keluarga besar asisten Laboratorium Listrik Dasar, Fahrul Isman, Candrika Kumaratunga, Diki Ari Wijaya, Yuni Endah, Safri Nahela, yang telah menemani hari-hari saya belajar dan berproses selama menjadi bagian dari keluarga kecil ini. Fajrin, Fauzan, Zulfikar, Monita, Mas Rijal, Mbak Alysa, Mas Danang dan lainnya yang tak bisa saya sebutkan satu persatu. Terima Kasih atas semua bimbingan dan kenangannya.
10. Para sahabat saya, Nur Hidayati, Yusril Ihza Mahendra, Khoirul Syadad, Nur Iklima, Diajeng Dhevita Sari, Diajeng Paramitha Asri, dan Bambang Suro Karyo yang senantiasa menjadi sandaran dikala sedih, menjadi penyemangat dikala lelah, dan selalu menjadi sumber tawa saya.
11. Almamaterku Universitas Jember yang aku cintai dan banggakan
12. Keluarga INDUKTRO 16 yang telah memberikan berjuta cerita. Saya bersyukur menjadi bagian dari kalian calon orang-orang hebat.
13. Pandu Putra Pratama, telah menjadi orang yang saya syukuri kehadirannya di hari-hari perjuangan. Terima kasih telah menjadi kekuatan dan semangat saya untuk berjuang bersama.
14. Member kontrakan Andi Wahyudi, Hanif Abdi Hakim Hani, Anugrah Prasetyo S., Hebri Esteringga, Adi Tri Setya R. Terima kasih telah menjadi partner yang menyenangkan dalam mengerjakan tugas, *travelling*, makan-makan dan lain-lain.
15. Keluarga UKM Einstein sebagai wadah saya dalam mengembangkan wawasan, *public speaking* dan tentunya *tim work* yang solid.
16. KKN 195 Mimbaan *squad*. Terima kasih atas kenangan manisnya, doa dan *support* yang kalian berikan di awal hingga akhir pengerjaan skripsi ini.
17. Ibu Kusuma Danartini yang telah seperti ibu kedua saya. Terima kasih telah memberi *support*, dukungan dan semangat yang sangat besar untuk saya meraih keberhasilan. Semoga Ibu selalu diberi kesehatan.
18. Setya Budi, yang telah menjadi *partner* kerja praktik terbaik dan terima kasih atas dorongan semangatnya.

19. Fahrul Isman, Faris Azizi, Septian Andi N, dan Pandu Putra Pratama yang selalu menemani di Laboratorium saat penelitian dan pengerjaan skripsi ini. Berkat mereka penelitian terasa tidak membosankan.
20. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu dalam persembahan ini, saya sampaikan terima kasih banyak atas segalanya.



MOTO

*“Work hard. Do your best. Keep your word. Never get too big for your britches.
Trust in God. Have no fear, and never forget a friend”*

(Harry S. Truman)

*“Sesungguhnya Allah tidak mengubah keadaan sesuatu kaum sehingga mereka
mengubah keadaan yang ada pada diri mereka sendiri.”*

(QS Ar-Ra’d: 11).

*Dreams never hurt anybody if he keeps working right behind the dream to make
as much of it come real as he can*

(F. H. Woolworth)

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Qoidatul Khikmah

NIM : 161910201038

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Analisis Pengaruh *Air Gap* (Celah Udara) Terhadap Unjuk Kerja Generator *Axial Flux Double Side Rotor* 1 Fasa dengan Kutub Berlawanan (N-S)” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi mana pun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab penuh atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 14 Juli 2020

Yang menyatakan,

Qoidatul Khikmah

NIM. 161910201038

SKRIPSI

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

Oleh:

Qoidatul Khikmah

NIM. 161910201038

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Ir. Widyono Hadi, M.T.

Dosen Pembimbing Anggota : Widya Cahyadi, S.T., M.T.

PENGESAHAN

Skripsi yang berjudul “Analisis Pengaruh *Air Gap* (Celah Udara) Terhadap Unjuk Kerja Generator *Axial Flux Double Side* Rotor 1 Fasa dengan Kutub Berlawanan (N-S)” karya Qoidatul Khikmah telah diuji dan disahkan pada :

Hari, tanggal : Selasa, 14 Juli 2020

Tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Tim Penguji:

Ketua

Anggota I

Ir. Widyono Hadi, M.T.

Widya Cahyadi, S.T., M.T.

NIP. 196104141989021001

NIP. 198511102014041001

Anggota II

Anggota III

Dr. Triwahju Hardianto, S.T., M.T.

Dedy Wahyu Herdiyanto, S.T, M.T

NIP. 197008261997021001

NIP 760017097

Mengesahkan,

Dekan Fakultas Teknik

Universitas Jember

Dr. Triwahju Hardianto, S.T., M.T.

NIP. 197008261997021001

RINGKASAN

Analisis Pengaruh *Air Gap* (Celah Udara) Terhadap Unjuk Kerja Generator *Axial Flux Double Side Rotor* 1 Fasa dengan Kutub Berlawanan (N-S).
Qoidatul Khikmah; 161910201038; 2020; 71 halaman; Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Jember.

Generator adalah peralatan listrik yang banyak digunakan pada energi terbarukan untuk dapat mengkonversikan energi mekanik menjadi energi listrik berdasarkan pada hukum *Faraday*. 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 bekerja pada putaran rendah. Beberapa studi telah dilakukan tentang generator *axial flux* antara lain dalam rancang bangun, pengaruh jumlah lilitan kumparan, dan jumlah magnet terhadap kinerja generator. Selain parameter tersebut, celah udara juga merupakan parameter yang dapat mempengaruhi kinerja generator.

Penelitian ini dilakukan dengan memberikan variasi celah udara sebesar 8 mm, 9 mm, dan 10 mm pada generator *axial flux* konstruksi *double side rotor* sebagai pembangkit listrik bolak-balik (AC) 1 fasa menggunakan magnet permanen *Neodymium Iron Boron* (NdFeB) dan disusun secara kutub berlawanan (N-S). Generator ini menggunakan 9 buah *coil* (kumparan) dengan masing-masing terdiri dari 300 lilitan dan menggunakan jumlah *pole* magnet sebanyak 18 *pole* dengan masing-masing rotor terdiri dari 9 *pole*. Untuk mengetahui pengaruh celah udara terhadap unjuk kerja generator diberikan *input* berupa kecepatan putar rotor yang bervariasi pada kondisi tanpa beban dan dengan beban untuk masing-masing celah. Sedangkan untuk mengetahui pengaruh variasi beban dilakukan dengan memberikan beban pada generator berupa 3 buah LED yang terhubung secara seri, kemudian 2 paralel (3 LED seri) dan 3 paralel (3 LED seri).

Pada pengujian celah udara 8 mm, pengujian pertama yaitu pada kondisi tanpa beban dimana saat kecepatan putar rotor 2500 rpm diperoleh nilai frekuensi

gelombang *output* yaitu 375,3 Hz dan tegangan *open circuit* (*Voc*) sebesar 7,316 V, sedangkan saat kecepatan putar 3000 rpm diperoleh frekuensi sebesar 450,4 Hz dan *Voc* sebesar 8,496 V. Pada variasi beban pertama, yaitu beban 3 LED terhubung seri dimana saat kecepatan putar 3000 rpm diperoleh tegangan *output* sebesar 7,468 V, arus *output* sebesar 14,961 mA, daya *output* sebesar $1,117 \times 10^{-1}$ W dan torsi rotor sebesar $3,558 \times 10^{-4}$ Nm. Pada beban 2 paralel (3 LED seri) diperoleh tegangan dan arus *output* sebesar 7,245 V dan 17,142 mA. Sedangkan saat beban 3 paralel (3 LED seri) diperoleh tegangan dan arus *output* sebesar 7,183 V dan 17,193 mA.

Pada pengujian celah udara 9 mm, pada kondisi tanpa beban saat kecepatan putar rotor 2500 rpm diperoleh nilai frekuensi sebesar 375,3 Hz dan *Voc* sebesar 6,480 V, sedangkan saat kecepatan putar 3000 rpm diperoleh frekuensi sebesar 450,4 Hz dan *Voc* sebesar 7,669 V. Pada beban 3 LED terhubung seri dimana saat kecepatan putar 3000 rpm diperoleh tegangan *output* sebesar 7,279 V, arus *output* sebesar 7,444 mA, daya *output* sebesar $5,418 \times 10^{-2}$ W dan torsi rotor sebesar $1,726 \times 10^{-4}$ Nm. Pada beban 2 paralel (3 LED seri) diperoleh tegangan dan arus *output* sebesar 7,153 V dan 9,006 mA. Sedangkan saat beban 3 paralel (3 LED seri) diperoleh tegangan dan arus *output* sebesar 7,102 V dan 9,624 mA.

Pada pengujian celah udara 10 mm, pada kondisi tanpa beban saat kecepatan putar rotor 2500 rpm diperoleh nilai frekuensi yaitu 375,3 Hz dan *Voc* sebesar 5,843 V, sedangkan saat kecepatan 3000 rpm diperoleh frekuensi sebesar 450,4 Hz dan *Voc* sebesar 6,976 V. Pada beban 3 LED terhubung seri dimana saat kecepatan putar 3000 rpm diperoleh tegangan *output* sebesar 6,826 V, arus *output* sebesar 1,298 mA, daya *output* sebesar $8,860 \times 10^{-3}$ W dan torsi rotor sebesar $2,822 \times 10^{-5}$ Nm. Pada beban 2 paralel (3 LED seri) diperoleh tegangan dan arus *output* sebesar 6,779 V dan 1,768 mA. Sedangkan saat beban 3 paralel (3 LED seri) diperoleh tegangan dan arus *output* sebesar 6,774 V dan 1,931 mA.

Dari penelitian ini disimpulkan bahwa tegangan dan arus *output* serta frekuensi semakin besar sebanding dengan semakin besarnya kecepatan putar rotor yang diberikan. Pada variasi *air gap* (celah udara) yang diberikan pada

generator *axial flux double side* rotor 1 fasa diketahui bahwa jarak celah udara tidak mempengaruhi besar frekuensi luaran generator. Namun, semakin kecil jarak celah udara yang digunakan maka tegangan *output* tanpa beban, tegangan *output* dengan beban, arus *output*, daya *output* dan torsi putar rotor yang dihasilkan semakin besar pada kecepatan putar rotor yang sama.



SUMMARY

Analysis Of The Effect Of Air Gap To The Performance An Axial Flux Generator Double Side Rotor 1 Phase With Opposites Pole (N-S). Qoidatul Khikmah; 161910201038; 2020; 71 pages; Departement of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Jember.

Generator is one of the electrical equipment, that is mostly used in renewable energy to be able to convert mechanical energy into electrical energy based on Faraday's law. Renewable energy such as wind power and water as a source of small-scale alternative electrical energy is only able to generate low mechanical energy, thus requiring a type of axial flux permanent magnet (AFPM) generator that works at low rotations. Several studies have been carried out on the axial flux generator, among others in the design, the effect of the number of coil windings, and the amount of magnetism to the generator performance. Air gap is also a parameter that can affect generator performance.

This research was giving variations of air gap of 8 mm, 9 mm, and 10 mm on the axial flux generator with double side rotor construction as a 1 phase alternating power (AC) using a permanent magnet of the Neodymium Iron Boron (NdFeB) with polar opposites (N-S). Generator uses 9 pieces of coils with each consisting of 300 turns. The number of magnetic poles as much as 18 poles with each rotor consisting of 9 poles. The input is given rotational speed of the rotor which varies in the no load condition and with the load for each gap to determine the effect of the air gap on the generator performance and giving a load to the generator with 3 LEDs connected in series, then 2 parallel (3 LED series) and 3 parallel (3 LED series) to find out the effect of load variations.

The first test with air gap of 8 mm is in a no-load condition where the rotational speed of 2500 rpm is obtained the value of the output wave frequency is 375.3 Hz and the open circuit voltage (Voc) is 7,316 V. When the rotational speed of 3000 rpm is obtained the frequency of 450.4 Hz and Voc of 8,496 V. The first load variation is the load of 3 LEDs connected in series when the rotational speed

of 3000 rpm obtained 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 the rotor torque of 3.558×10^{-4} Nm. The 2 parallel loads (3 series LEDs) are obtained an output voltage and current of 7.245 V and 17.142 mA. The 3 parallel loads (3 series LEDs) are obtained an output voltage and current of 7.183 V and 17.193 mA.

The second test with 9 mm air gap at no-load conditions when the rotational speed of 2500 rpm obtained frequency values of 375.3 Hz and Voc of 6.480 V. When the rotational speed of 3000 rpm obtained frequencies of 450.4 Hz and Voc of 7.669 V. The load 3 LEDs connected in series when the rotational speed of 3000 rpm are obtained an output voltage of 7,279 V, an output current of 7,444 mA, an output power of $5,418 \times 10^{-2}$ W and a rotor torque of $1,726 \times 10^{-4}$ Nm. The 2 parallel loads (3 series LEDs) are obtained an output voltage and current of 7.153 V and 9,006 mA. The 3 parallel loads (3 series LEDs) are obtained an output voltage and current of 7.102 V and 9.624 mA.

The air gap of 10 mm at no-load conditions when the rotational speed of 2500 rpm obtained frequency values are 375.3 Hz and Voc of 5.843 V. When the speed of 3000 rpm a frequency of 450.4 Hz and Voc of 6.976 V. At load 3 LEDs connected in series when the rotational speed of 3000 rpm obtained 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. The 2 parallel loads (3 series LEDs) are obtained an output voltage and current of 6.779 V and 1,768 mA. The load is 3 parallel (3 series LEDs) are obtained an output voltage and current of 6.774 V and 1.931 mA.

The conclusion of this research is the output voltage, output current and frequency are greater if given greater rotational speed of the rotor. Variation of air gap is given to the 1 phase double side rotor axial flux generator known that the air gap does not affect the frequency of the generator output. However, the smaller air gap is used at the same rotational speed of rotor are obtained greater the output voltage without load, the output voltage with the load, the output current, the output power and the rotating torque of the resulting rotor.

PRAKATA

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat, taufik, serta hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian sekaligus penyusunan skripsi yang berjudul ” **Analisis Pengaruh Air Gap (Celah Udara) Terhadap Unjuk Kerja Generator Axial Flux Double Side Rotor 1 Fasa dengan Kutub Berlawanan (N-S)**”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat dalam penyelesaian pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember. Dalam penulisan skripsi ini tentunya banyak pihak yang telah memberikan bantuan baik moril ataupun materiil. Oleh karena itu penulis menyampaikan terimakasih kepada :

1. Bapak Dr. Triwahju Hardianto, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember;
2. Bapak Bambang Srikaloko S.T., M.T selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Jember;
3. Bapak Ir. Widyono Hadi, M.T. selaku Dosen Pembimbing Utama dan Bapak Widya Cahyadi, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu dan pikiran serta perhatiannya guna memberikan bimbingan dan arahan demi terselesainya skripsi ini;
4. Bapak Dr. Triwahju Hardianto S.T., M.T. selaku dosen penguji utama dan Bapak Dedy Wahyu Herdianto, S.T, M.T. selaku dosen penguji anggota yang telah memberikan kritik dan saran yang membangun sehingga sangat membantu terhadap penyempurnaan skripsi ini;
5. Bapak Alfredo Bayu Satriya, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing akademik yang telah membimbing, membantu dan menjadi inspirasi saya dalam menanamkan rasa disiplin serta tanggung jawab selama menjadi mahasiswa;
6. Kedua orang tua tercinta, Bapak Misnoto dan Ibunda Muhoisun atas pengorbanan dan usaha, segala cinta dan kasih sayang, dorongan, nasehat, kepercayaan dan air mata yang menetes dalam setiap untaian doa yang senantiasa menyertai;

7. Laboratorium Listrik Dasar dan Laboratorium Konversi Energi Listrik Universitas Jember yang telah memberikan fasilitas terhadap penulis dalam melakukan penelitian;
8. Teman seperjuangan se-DPU, se-DPA, dan sepenelitian yang saling membantu, mendukung, menyemangati, dan memotivasi dalam penyusunan skripsi;
9. Rekan-rekan Fakultas Teknik, Universitas Jember, khususnya rekan-rekan Teknik Elektro Angkatan 2016 yang tidak dapat disebut satu per satu, yang selama ini telah memberikan pengalaman, motivasi dan semangat dari mulai menjadi mahasiswa hingga terselesaikannya penyusunan skripsi ini.
10. Para sahabat, teman-teman terdekat, teman seperjuangan dan semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu-persatu namanya yang telah membantu dalam segala hal.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan, karena sempurna hanya milik Allah SWT. Harapan penulis adalah supaya informasi dari skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi penulis dan pembaca.

Jember, 05 Mei 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERSEMBAHAN	iii
HALAMAN MOTO	v
HALAMAN PERNYATAAN.....	vii
HALAMAN PEMBIMBING	viii
HALAMAN PENGESAHAN.....	ix
RINGKASAN	x
SUMMARY	xii
PRAKATA	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR.....	xix
DAFTAR TABEL	xxii
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
1.6 Sistematika Penelitian	5
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Generator.....	6
2.2 Generator <i>Axial Flux</i>.....	7
2.2.1 Prinsip Kerja Generator <i>Axial Flux</i>	7
2.2.2 Konstruksi Generator <i>Axial Flux</i>	9
2.2.3 Tipe-tipe Generator <i>Axial Flux</i>	11
2.2.4 Rangkaian Ekuivalen.....	14
2.3 Magnet Permanen	15
2.4 Fluks Magnet.....	17
2.5 Kawat Email	19
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian	21
3.1.1 Tempat Penelitian	21
3.1.2 Waktu Penelitian.....	21
3.2 Alat dan Bahan.....	22
3.2.1 Perangkat Lunak (<i>software</i>).....	22
3.2.2 Perangkat Keras (<i>hardware</i>).....	22
3.3 Tahapan Penelitian	23

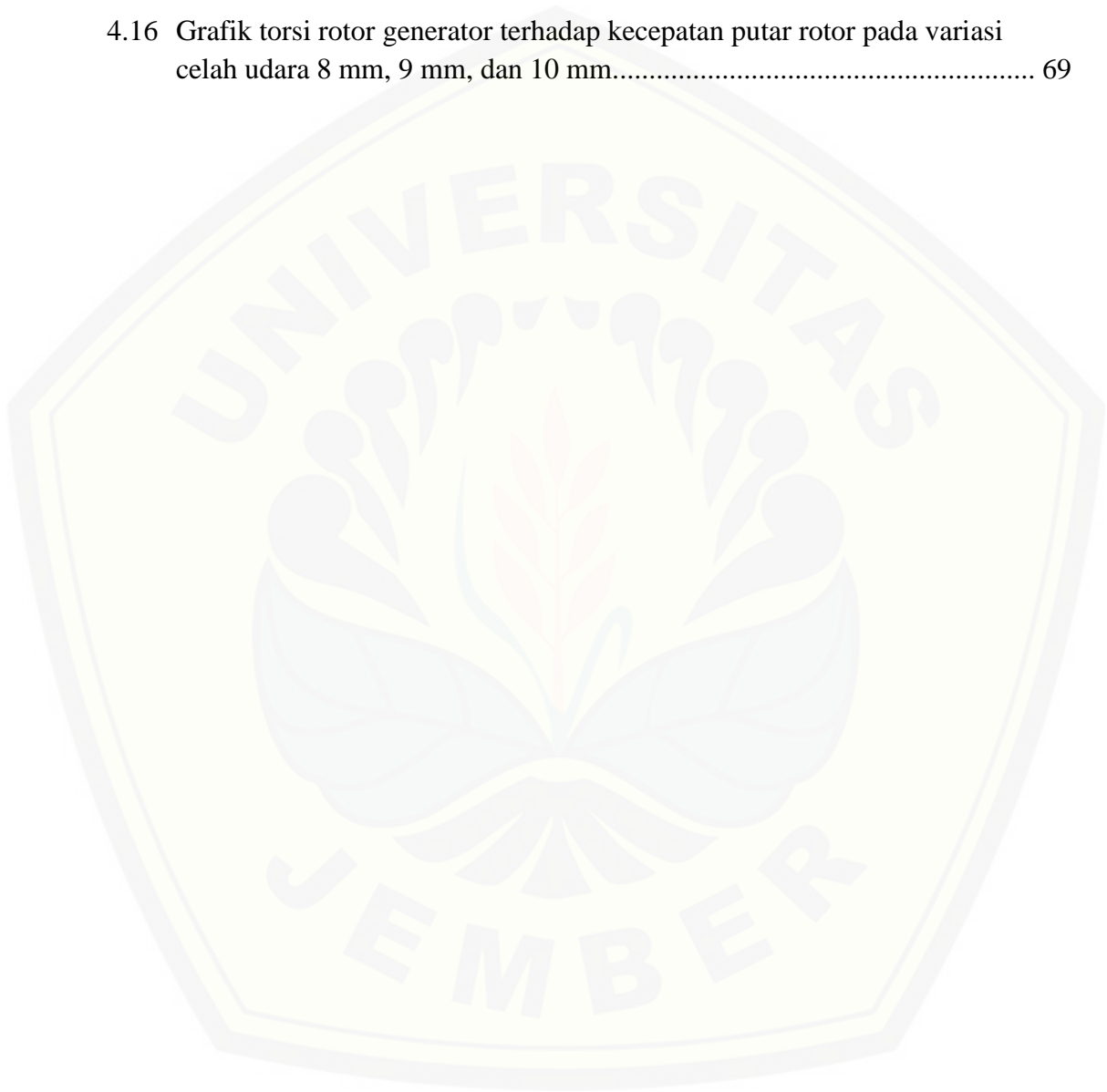
3.4 Blok Diagram dan Perancangan Sistem	27
3.5 Desain Alat.....	28
3.5.1 Desain Stator.....	28
3.5.2 Desain Rotor	30
3.5.3 Desain Generator <i>Axial Flux Double Side</i> Rotor 1 Fasa	31
3.6 Metode Pengumpulan Data.....	35
3.6.1 Pengujian Generator <i>Axial Flux Double Side</i> Rotor 1 Fasa....	35
3.6.2 Perhitungan	35
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	39
4.1 Spesifikasi Generator <i>Axial Flux Double Side</i> Rotor.....	39
4.2 Pengujian Generator <i>Axial Flux Double Side</i> Rotor 1 Fasa dengan Variasi Celah Udara (<i>Air Gap</i>).....	43
4.2.1 Pengujian Unjuk Kerja Generator <i>Axial Flux Double Side</i> Rotor 1 Fasa dengan Celah Udara (<i>Air Gap</i>) 8 mm.....	44
4.2.2 Pengujian Unjuk Kerja Generator <i>Axial Flux Double Side</i> Rotor 1 Fasa dengan Celah Udara (<i>Air Gap</i>) 9 mm.....	48
4.2.3 Pengujian Unjuk Kerja Generator <i>Axial Flux Double Side</i> Rotor 1 Fasa dengan Celah Udara (<i>Air Gap</i>) 10 mm.....	52
4.3 Analisis Pengaruh <i>Air Gap</i> (Celah Udara) Terhadap Unjuk Kerja Generator <i>Axial Flux Double Side</i> Rotor 1 Fasa.....	55
4.3.1 Frekuensi Gelombang <i>Output</i> Generator.....	56
4.3.2 Tegangan <i>Output</i> Generator.....	57
4.3.3 Arus <i>Output</i> Generator.....	62
4.3.4 Daya <i>Output</i> Generator	65
4.3.5 Torsi Putar Rotor	67
BAB 5. PENUTUP.....	71
5.1 Kesimpulan.....	71
5.2 Saran	72
DAFTAR PUSTAKA	74
LAMPIRAN.....	76

DAFTAR GAMBAR

2.1	Topologi <i>Axial Flux Permanent Magnet</i> (AFPM).....	7
2.2	Stator dengan inti besi	9
2.3	Tipe pemasangan magnet <i>permanent</i> (a) <i>surface-mounted</i> PM, (b) <i>embedded</i> PM	10
2.4	Generator <i>axial flux</i> sisi tunggal stator bersela (<i>single sided-slotted rotor</i>).....	11
2.5	Generator <i>axial flux</i> sisi ganda (<i>double sided</i>) (a) Internal stator dengan PM rotor ganda, (b) Internal PM rotor dengan stator ganda.....	12
2.6	Generator <i>axial flux</i> sisi ganda (<i>double sided</i>) internal stator dengan rotor ganda (a) Tipe kutub searah (N-N), (b) Tipe kutub berlawanan (N-S)	13
2.7	Generator <i>axial flux multi stage</i> (<i>multidisc</i>)	13
2.8	Rangkaian Ekuivalen Generator	14
2.9	Rangkaian Ekuivalen Operasi Generator.....	15
2.10	Magnet Permanen silinder jenis <i>Neodymium Iron Boron</i> (NdFeB)	16
2.11	Kurva demagnetisasi untuk berbagai bahan <i>permanent magnet</i>	17
2.12	Fluks magnet pada suatu bidang.....	18
3.1	<i>Flowchart</i> tahapan penelitian	24
3.2	Blok diagram sistem	27
3.3	<i>Spull</i> mesin jahit berbahan plastik sebagai tempat kumparan stator	28
3.4	Desain dua dimensi (2D) kerangka stator.....	29
3.5	Desain tiga dimensi (3D) stator	29
3.6	Magnet permanen <i>Neodymium Iron Boron</i> (NdFeB) untuk generator <i>axial flux double side rotor</i> satu fasa.....	30
3.7	Desain dua dimensi (2D) kerangka rotor.....	30

3.8	Desain tiga dimensi (3D) rotor	31
3.9	Desain Tiga Dimensi (3D) Generator <i>Axial Flux Double Side</i> Rotor 1 Fasa Tampak Samping.....	31
3.10	Desain Tiga Dimensi (3D) Generator <i>Axial Flux Double Side</i> Rotor 1 Fasa	32
4.1	Generator <i>axial flux double side</i> rotor 1 fasa dengan kutub berlawanan (N-S) menggunakan magnet <i>Neodymium Iron Boron</i> (NdFeB).....	40
4.2	Pengukuran densitas fluks magnet <i>Neodymium Iron Boron</i> (NdFeB)	40
4.3	Pengukuran Resistansi Kumparan (R_a)	41
4.4	Pengukuran Induktansi Kumparan (X_a)	41
4.5	Grafik Arus <i>Output</i> Terhadap Kecepatan Putar Rotor pada Celah Udara 8 mm	47
4.6	Grafik Tegangan <i>Output</i> Terhadap Kecepatan Putar Rotor pada Celah Udara 8 mm	48
4.7	Grafik Tegangan <i>Output</i> Terhadap Kecepatan Putar Rotor pada Celah Udara 9 mm	51
4.8	Grafik Arus <i>Output</i> Terhadap Kecepatan Putar Rotor pada Celah Udara 9 mm	52
4.9	Grafik Tegangan <i>Output</i> Terhadap Kecepatan Putar Rotor pada Celah Udara 10 mm	54
4.10	Grafik Arus <i>Output</i> Terhadap Kecepatan Putar Rotor pada Celah Udara 10 mm	55
4.11	Grafik frekuensi gelombang <i>output</i> generator terhadap kecepatan putar rotor pada variasi celah udara 8 mm, 9 mm, dan 10 mm.	56
4.12	Grafik tegangan <i>open circuit</i> (V_{oc}) generator terhadap kecepatan putar rotor pada variasi celah udara 8 mm, 9 mm, dan 10 mm.	57
4.13	Grafik tegangan <i>output</i> generator dengan beban terhadap kecepatan putar rotor pada variasi celah udara 8 mm, 9 mm, dan 10 mm.	61

4.14	Grafik arus <i>output</i> generator dengan beban terhadap kecepatan putar rotor pada variasi celah udara 8 mm, 9 mm, dan 10 mm.	64
4.15	Grafik daya <i>output</i> generator terhadap kecepatan putar rotor pada variasi celah udara 8 mm, 9 mm, dan 10 mm.	67
4.16	Grafik torsi rotor generator terhadap kecepatan putar rotor pada variasi celah udara 8 mm, 9 mm, dan 10 mm.	69



DAFTAR TABEL

2.1	Kemampuan hantar arus kawat email berdasarkan <i>American Wire Gauge</i> (AWG).....	20
3.1	Jadwal Pelaksanaan Penelitian	21
3.2	Perencanaan spesifikasi generator axial flux double side rotor.....	34
4.1	Spesifikasi generator <i>axial flux double side</i> rotor 1 fasa	42
4.2	Spesifikasi motor DC sebagai <i>prime mover</i> generator	43
4.3	Data hasil pengujian tanpa beban pada celah udara 8 mm	44
4.4	Data hasil pengujian dengan beban 3 buah LED terhubung seri pada celah udara 8 mm.....	45
4.5	Data hasil pengujian dengan beban 2 paralel 3 buah LED terhubung seri pada celah udara 8 mm	46
4.6	Data hasil pengujian dengan beban 3 paralel 3 buah LED terhubung seri pada celah udara 8 mm	46
4.7	Data hasil pengujian tanpa beban pada celah udara 9 mm	48
4.8	Data hasil pengujian dengan beban 3 buah LED terhubung seri pada celah udara 9 mm.....	49
4.9	Data hasil pengujian dengan beban 2 paralel 3 buah LED terhubung seri pada celah udara 9 mm	50
4.10	Data hasil pengujian dengan beban 3 paralel 3 buah LED terhubung seri pada celah udara 9 mm	50
4.11	Data hasil pengujian tanpa beban pada celah udara 10 mm	52
4.12	Data hasil pengujian dengan beban 3 buah LED terhubung seri pada celah udara 10 mm.....	53
4.13	Data hasil pengujian dengan beban 2 paralel 3 buah LED terhubung seri pada celah udara 10 mm	53

4.14	Data hasil pengujian dengan beban 3 paralel 3 buah LED terhubung seri pada celah udara 10 mm	54
4.15	Perhitungan <i>error</i> persen tegangan <i>open circuit</i> (V_{oc}) generator pada variasi celah udara 8 mm, 9 mm, dan 10 mm.....	58
4.16	Perhitungan <i>error</i> persen tegangan output dengan beban pada variasi celah udara 8 mm, 9 mm, dan 10 mm.....	60
4.17	Arus <i>output</i> generator dengan beban pada variasi celah udara 8 mm, 9 mm, dan 10 mm.	63
4.18	Daya <i>output</i> generator pada variasi celah udara 8 mm, 9 mm, dan 10 mm.	65
4.19	Torsi putar rotor generator pada variasi celah udara 8 mm, 9 mm, dan 10 mm.	68

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Semakin meningkatnya pertumbuhan manusia diiringi pesatnya perkembangan teknologi menjadikan kebutuhan energi dunia semakin tinggi. Ketidakseimbangan antara permintaan kebutuhan dan ketersediaan energi yang didorong pesatnya teknologi dan industrialisasi dunia dapat menyebabkan terjadinya krisis cadangan energi, khususnya adalah energi fosil. Bahan bakar minyak bumi atau energi fosil adalah salah satu sumber energi yang bersifat tak terbarukan (*non renewable energy sources*) yang selama ini merupakan sumber energi utama untuk memenuhi kebutuhan energi di seluruh sektor kegiatan terutama dalam bidang kelistrikan, industri dan transportasi. Dengan adanya krisis energi saat ini, perlu adanya penganekaragaman energi (diversifikasi energi) dengan mengembangkan sumber energi baru dan terbarukan (*renewable energy*) yang ramah lingkungan dan berkelanjutan atau tidak habis sejak dibangkitkan. Dimana Indonesia memiliki kekayaan sumber daya energi terbarukan yang besar diantaranya yaitu tenaga air, energi matahari, angin, energi gelombang laut, panas bumi, dan lainnya yang dapat dimanfaatkan sebagai energi alternatif salah satunya adalah dengan memanfaatkan generator untuk mengkonversikan tenaga gerak menjadi energi listrik.

Pemanfaatan sumber energi terbarukan menjadi pembangkit listrik yaitu salah satunya dengan mengubah energi mekanik yang dibangkitkan sumber energi terbarukan tersebut menjadi energi listrik. Generator adalah salah satu peralatan listrik yang dapat mengkonversikan energi mekanik menjadi energi listrik berdasarkan pada hukum *Faraday*. Dimana, suatu kawat atau kumparan konduktor jika berada dalam medan magnet yang berubah terhadap waktu, maka pada ujung-ujung kawat atau konduktor tersebut akan timbul beda potensial atau gaya gerak listrik (GGL) induksi (Fajar, 2017).

Energi terbarukan seperti tenaga angin dan air sebagai sumber energi listrik alternatif skala kecil hanya mampu membangkitkan energi mekanik berupa putaran rendah, sehingga membutuhkan generator yang dapat menghasilkan

energi listrik pada kecepatan putar rendah ($\leq 1000 \text{ rpm}$). Salah satu jenis generator yang dapat bekerja pada putaran rendah (*low speed induction generator*) adalah generator *axial flux permanent magnet* (AFPM). Berbeda dengan generator konvensional pada umumnya yang menggunakan konstruksi *radial flux permanent magnet* (RFPM) untuk bekerja pada kecepatan putar tinggi (*high speed induction generator*), generator fluks aksial ini memungkinkan konstruksi yang lebih sederhana, mudah dibuat, biaya yang relatif rendah dan dapat ditentukan besar diameter rotor sesuai dengan daya dan frekuensi yang dihasilkan pada putaran tertentu (Fajar, 2017).

Beberapa studi telah dilakukan dengan meneliti tentang generator *axial flux* antara lain dalam rancang bangun generator fluks aksial, pengaruh jumlah lilitan kumparan, dan jumlah magnet terhadap kinerja generator serta peneliatan parameter lain yang mempengaruhi kinerja generator. Salah satunya dilakukan oleh mahasiswa Teknik Elektro Universitas Jember, Ainur Rohmah pada tahun 2019 yang berjudul “Rancang Bangun Generator AC Konstruksi Axial Flux Satu Fasa Menggunakan Magnet Neodymium (NdFeB) Silinder dengan Kutub Magnet Berlawanan (U-S)” merupakan penelitian rancang bangun generator *axial flux double* stator menggunakan magnet permanen NdFeB. Penelitian serupa juga dilakukan Alysa Karisma Addina Putri pada tahun 2019 dengan konstruksi yang sama, namun kutub magnet terpasang secara searah (U-U) untuk mengetahui pengaruhnya terhadap unjuk kerja generator stator ganda.

Selain parameter-parameter tersebut, celah udara juga merupakan parameter yang dapat mempengaruhi kinerja dari generator. Sebagaimana berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Prasetijo dan Waluyo pada tahun 2016 dengan judul “Optimasi Lebar Celah Udara Generator Axial Magnet Permanen Putaran Rendah 1 Fase”. Penelitian ini dilakukan dengan mendesain generator magnet permanen aksial 1 fasa bertipe *double sided coreless stator* 10 kutub pada celah udara tertentu untuk mendapatkan *output* tegangan dan daya optimal. Jenis magnet permanen yang digunakan adalah NdFeB (*Neodymium Iron Boron*). Namun, penelitian ini dilakukan dengan cara simulasi untuk mendapatkan

kerapatan fluks pada kumparan stator menggunakan aplikasi FEMM (*finite element Method Magnetic*).

Pada banyak penelitian yang dilakukan mengenai celah udara pada generator *axial flux*, hanya dilakukan dengan metode analisis dengan menggunakan simulasi pada beberapa *software* seperti FEMM (*finite element Method Magnetic*), FEM (*Finite Element Method*) dan *Finite Element Analysis* (FEA) simulator. Salah satu penelitian tentang celah udara pada generator yang tidak menggunakan simulator adalah penelitian dengan judul “Analisis Pengaruh Variasi Jumlah Kutub dan Jarak Celah Magnet Rotor Terhadap Performa Generator Sinkron Fluks Radial” oleh Indriani pada tahun 2015. Penelitian ini dilakukan dengan memberikan variasi perubahan jumlah kutub magnet rotor yaitu 12 dan 8 kutub dan variasi celah udara sebesar 1 mm, 2 mm dan 3 mm pada generator sinkron. Namun penelitian ini berfokus pada generator sinkron tipe fluks radial.

Oleh karena itu, Penelitian pada tugas akhir ini akan dilakukan dengan memberikan variasi celah udara pada generator *axial flux* khususnya pada generator *axial flux* dengan 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). Adapun hasil akhir yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah untuk memperoleh hasil analisis pengaruh perubahan celah udara terhadap unjuk kerja generator dengan parameter tegangan, arus, frekuensi, dan daya output dari generator *axial flux double side rotor* 1 fasa.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun beberapa rumusan masalah yang menjadi fokus dalam penelitian ini diantaranya yaitu :

1. Bagaimana pengaruh perubahan *air gap* (celah udara) terhadap frekuensi, tegangan, arus dan daya luaran generator *axial flux double rotor* 1 fasa dengan kutub magnet berlawanan (N-S)?

2. Bagaimana pengaruh perubahan *air gap* (celah udara) terhadap torsi rotor pada generator *axial flux double rotor* 1 fasa?

1.3 Batasan Masalah

Untuk memfokuskan bahasan dari penelitian ini, maka batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menggunakan rotor ganda dengan stator tunggal dan inti besi pada setiap *coil*.
2. Menggunakan 9 buah *coil* (kumparan) dengan masing-masing terdiri dari 300 lilitan.
3. Menggunakan kawat *email* berdiameter 0,4 mm.
4. Menggunakan magnet permanen *Neodymium Iron Boron* (NdFeB) silinder dengan diameter 15 mm dan tebal 3 mm.
5. Menggunakan jumlah *pole* magnet sebanyak 18 *pole* dengan masing-masing rotor terdiri dari 9 *pole*.
6. Menggunakan dinamo motor DC sebagai *prime mover* (penggerak).
7. Menggunakan konstruksi kutub magnet berlawanan (N-S) pada rotor.
8. Pengujian hanya berupa tegangan, arus, dan frekuensi keluaran. Sedangkan nilai daya dan torsi didapatkan dengan perhitungan.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun penelitian yang akan dilakukan ini memiliki beberapa tujuan sebagai pencapaian akhir diantaranya yaitu :

1. Mengetahui pengaruh perubahan *air gap* (celah udara) terhadap frekuensi, tegangan, arus dan daya luaran generator *axial flux double rotor* 1 fasa dengan kutub magnet berlawanan (N-S)
2. Mengetahui pengaruh perubahan *air gap* (celah udara) terhadap torsi rotor pada generator *axial flux double rotor* 1 fasa.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari hasil penelitian ini, antara lain :

1. Dapat mengetahui pengaruh perubahan *air gap* (celah udara) terhadap frekuensi, tegangan, arus dan daya luaran generator *axial flux double rotor* 1 fasa dengan kutub magnet berlawanan (N-S).
2. Dapat mengetahui pengaruh perubahan *air gap* (celah udara) terhadap torsi rotor pada generator *axial flux double rotor* 1 fasa.
3. Dapat dijadikan sebagai referensi ilmiah dalam pengembangan ilmu pengetahuan mengenai pengaruh perubahan *air gap* (celah udara) pada generator *axial flux* terutama dengan konstruksi rotor ganda 1 fasa menggunakan magnet permanen *Neodymium Iron Boron* (NdFeB) dengan kutub berlawanan (N-S).

1.6 Sistematika Penelitian

Secara garis besar, sistematika penyusunan skripsi ini adalah sebagai berikut:

a. **BAB 1. PENDAHULUAN**

Berisi tentang latar belakang dilakukannya penelitian, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian dan sistematika penelitian.

b. **BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA**

Berisi tentang dasar teori yang dapat menjadi landasan dalam penelitian.

c. **BAB 3. METODE PENELITIAN**

Menjelaskan tentang metode dalam melakukan kajian dan penelitian.

d. **BAB 4. ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN**

Berisi tentang hasil penelitian yang berupa data dan analisis hasil penelitian.

e. **BAB 5. PENUTUP**

Berisi tentang kesimpulan hasil penelitian dan saran dari penulis.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Generator

Generator adalah sebuah alat yang dapat mengkonversi energi gerak atau mekanik menjadi energi listrik dengan memanfaatkan prinsip induksi elektromagnetik. Tenaga mekanik digunakan untuk memutar medan magnet diantara kumparan kawat penghantar, sehingga aris-garis gaya magnet akan memotong belitan-belitan kumparan dan gaya gerak listrik (GGL) atau tegangan induksi akan dibangkitkan. Dalam penerapannya, energi mekanik pada generator dapat berasal dari tenaga potensial air, tenaga angin, mesin uap, atau sumber mekanik lainnya. Generator yang dapat menghasilkan listrik arus bolak-balik disebut sebagai generator AC atau alternator (UTPL dkk., 2011).

Prinsip kerja dari generator secara umum adalah menggunakan prinsip kerja hukum Faraday yang ditemukan oleh Michael Faraday pada tahun 1821. Hukum induksi Faraday adalah hukum dasar elektromagnetik yang memprediksi bagaimana medan magnet akan berinteraksi dengan rangkaian listrik untuk menghasilkan gaya gerak listrik (GGL). Hukum Faraday menyatakan bahwa gaya gerak listrik (ggl) terinduksi pada rangkaian tertutup sama dengan negatif perubahan fluks magnetik terhadap waktu di dalam rangkaian. Dengan kata lain, apabila suatu kawat penghantar listrik berada dalam medan magnet yang berubah-ubah terhadap waktu, maka akan terbentuk gaya gerak listrik induksi didalam kawat tersebut. Demikian pula sebaliknya jika kawat penghantar listrik digerakkan dalam suatu medan magnet, maka dalam kawat penghantar tersebut akan terbentuk gaya gerak listrik induksi.

Pada generator, kawat penghantar yang digunakan adalah sebuah kumparan yang terdiri dari beberapa lilitan. Hukum Faraday untuk kawat penghantar yang terdiri dari N lilitan identik dapat dinyatakan menggunakan persamaan sebagai berikut (Harsha dkk., 2016) :

$$E = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana:

E : tegangan induksi (V)

N : jumlah lilitan kawat penghantar

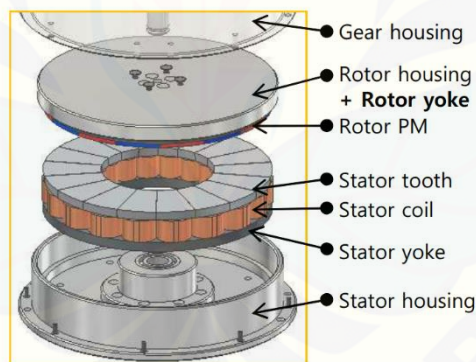
$\Delta\Phi$: perubahan fluks magnet (Wb)

Δt : perubahan waktu (s)

Dari persamaan di atas, dapat diketahui bahwa tegangan yang diinduksi di antara terminalnya sebanding dengan laju perubahan fluks dan jumlah lilitan kawat penghantar.

2.2 Generator Axial Flux

Mesin *axial flux permanent magnet* (AFPM), yang biasa disebut mesin *disc-type*, merupakan sebuah mesin alternatif atas mesin *radial flux permanent magnet* (RFPM) berbentuk silinder. Generator fluks aksial merupakan suatu mesin fluks aksial yang dapat mengkonversikan energi mekanik menjadi energi listrik arus bolak-balik yang terdiri dari stator dan rotor dengan memiliki arah aliran fluks yang memotong stator secara aksial atau vertikal (Fajar, 2017).



Gambar 2.1 Topologi Axial Flux Permanent Magnet (AFPM) (Sumber : Ani dkk., 2012)

2.2.1 Prinsip Kerja Generator Axial Flux

Prinsip kerja generator *axial flux* adalah sama dengan generator konvensional pada umumnya, dimana tegangan listrik yang dihasilkan generator disebabkan oleh adanya gaya gerak listrik akibat adanya perubahan fluks magnetik terhadap waktu. Perubahan fluks pada generator *axial* adalah berputarnya rotor sebagai tempat magnet untuk menghasilkan medan magnet. Berputarnya rotor

kemudian akan menginduksi kumparan pada stator dengan arah aliran fluks yang memotong stator secara aksial atau vertikal.

Pada generator fluks aksial digunakan magnet permanen untuk membangkitkan medan magnet secara konstan. Sehingga, generator dapat menghasilkan medan magnet pada celah udara tanpa perlu eksitasi arus DC untuk membangkitkan medan magnet dan tanpa disipasi daya listrik. Besaran medan magnet yang dihasilkan tergantung dari jenis *magnet permanent* yang digunakan. Hal ini yang membedakan generator *axial flux* dengan generator sinkron.

Medan magnet (B) dari rotor akan menembus bidang stator pada luasan medan magnet (A) akan menghasilkan fluks magnet (Φ) dengan persamaan sebagai berikut (Chapman, 2012).

$$\Phi = B_r A \cos \theta \dots\dots\dots(2.2)$$

dimana:

Φ : fluks medan magnet (Wb)

B_r : medan magnet rotor (T)

A : luas permukaan magnet (m²)

θ : sudut antara garis gaya medan magnet rotor dengan garis normal bidang penampang kumparan stator

Hukum induksi Faraday merupakan dasar dari prinsip kerja generator *axial flux*, sebagaimana yang telah dijelaskan pada persamaan (2.1). Maka, besar garis gaya listrik yang diinduksikan dalam kumparan suatu generator didapatkan dengan persamaan:

$$E_a = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph} \dots\dots\dots(2.3)$$

dimana:

E_a : tegangan efektif induksi generator (V)

f : frekuensi (Hz)

N : jumlah lilitan

Φ_{max} : fluks maksimum magnet (Wb)

Ns : jumlah kumparan

Nph : jumlah fasa

Sedangkan besar frekuensi yang dihasilkan oleh generator *axial flux* sebanding dengan kecepatan putar pada rotor dan jumlah kutub magnet (*pole*) yang digunakan. Persamaan frekuensi yang dihasilkan dari oleh generator aksial fluks adalah (Chapman, 2012).

$$f = \frac{60 \text{ detik}}{1 \text{ menit}} \times \frac{np}{2 \text{ pole pasangan pole}} = \frac{np}{120} \dots\dots\dots(2.4)$$

dimana:

n : kecepatan putar rotor (rpm)

p : jumlah *pole* magnet

f : frekuensi (Hz)

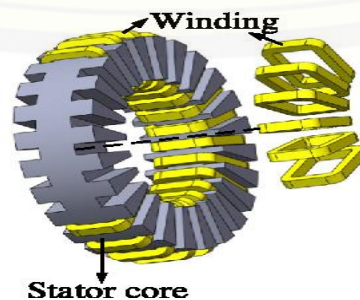
Dalam persamaan (2.4), 120 diperoleh dari hasil konversi menit ke detik dan dari kutub ke pasangan kutub. Dengan cara ini, satuan frekuensi (hertz atau siklus per detik) diturunkan (*United States Department of Energy Washington, 1992*).

2.2.2 Konstruksi Generator *Axial Flux*

Generator *axial flux* memiliki konstruksi yang sama dengan generator pada umumnya, dimana terdiri dari dua bagian utama yaitu stator dan rotor.

1. Stator

Stator merupakan salah satu bagian generator yang diam atau tidak bergerak. Stator terdiri dari beberapa kumparan kawat konduktor sebagai tempat terbentuknya tegangan induksi oleh gaya gerak listrik. Stator juga disebut sebagai belitan jangkar jika pada generator sinkron. Pada stator generator *axial flux* memiliki beberapa variasi diantaranya stator dengan inti besi dan stator tanpa inti besi. Inti besi pada lilitan stator dapat memaksimalkan induksi magnetik menuju kumparan.



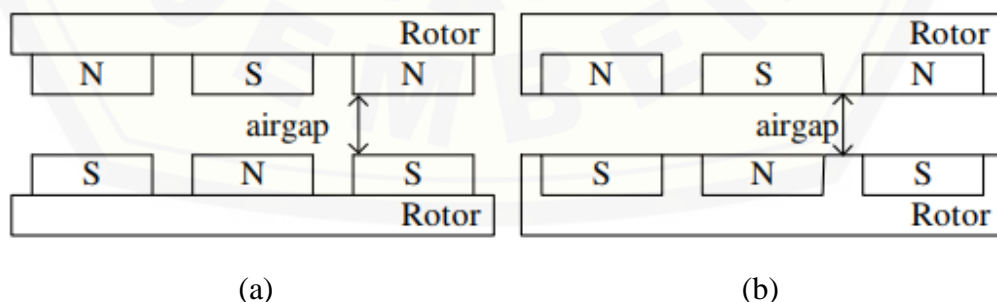
Gambar 2.2 Stator dengan inti besi (Sumber : (Zou dkk., 2017))

Jumlah gulungan atau lilitan pada stator dapat menentukan besarnya tegangan, arus keluaran, dan daya pada generator. Kombinasi rangkaian seri atau paralel pada kumparan stator dapat menentukan penguatan pada tegangan atau arus. Rangkaian seri pada kumparan stator dapat meningkatkan nilai tegangan, sedangkan rangkaian paralel pada kumparan stator dapat meningkatkan nilai arus (Akbar, 2012).

2. Rotor

Rotor merupakan salah satu bagian generator yang bergerak atau berputar saat generator menerima energi mekanik dari penggerak. Pada generator *axial flux*, rotor terdiri dari beberapa magnet permanen yang berfungsi untuk menghasilkan medan magnet yang tetap atau konstan terhadap waktu. Sehingga, pada generator fluks aksial tidak lagi memerlukan eksitasi arus DC untuk membangkitkan medan magnet.

Kombinasi pemasangan magnet permanen pada rotor dapat mempengaruhi besar fluks magnet yang diterima oleh kumparan, selain itu, juga akan mempengaruhi banyaknya putaran per menit pada rotor untuk menimbulkan frekuensi yang diinginkan. Terdapat dua tipe dalam pemasangan atau penyusunan pada generator *axial flux*, yaitu *surface-mounted* dan *embedded*. *Surface-mounted* adalah pemasangan permanen magnet dengan magnet menempel di atas permukaan rotor, sedangkan pada tipe *embedded*, kutub magnet berada di dalam rotor, sehingga permukaan rotor menjadi rata.



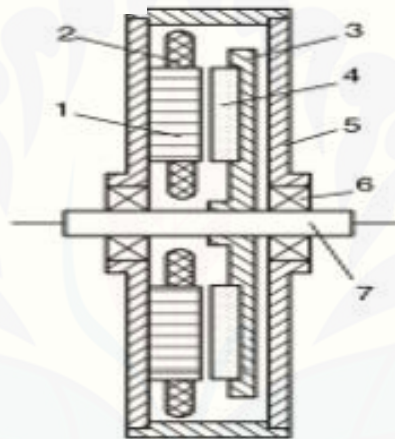
Gambar 2.3 Tipe pemasangan *magnet permanen* (a) *surface-mounted* PM, (b) *embedded* PM (Sumber : (Rossouw, 2009))

2.2.3 Tipe-tipe Generator Axial Flux

Dalam perkembangannya, generator *axial flux* terbagi menjadi tiga tipe berdasarkan segi konstruksinya yaitu sisi tunggal (*single sided*), sisi ganda (*double sided*), ataupun dengan desain *multidisc*.

1. Generator *axial flux* sisi tunggal (*single sided*)

Konstruksi generator fluks aksial sisi tunggal merupakan konstruksi yang paling sederhana yaitu hanya terdiri dari satu buah rotor dan stator. Generator jenis ini dapat menghasilkan torsi yang sangat rendah. Generator fluks aksial sisi tunggal memiliki beberapa jenis seperti stator bersela (*slotted rotor*), stator tanpa sela (*slotless stator*) dan stator kutub menonjol (*sailent-pole stator*)



Gambar 2.4 Generator *axial flux* sisi tunggal stator bersela (*single sided-slotted rotor*) (Sumber : Gieras dkk., 2008)

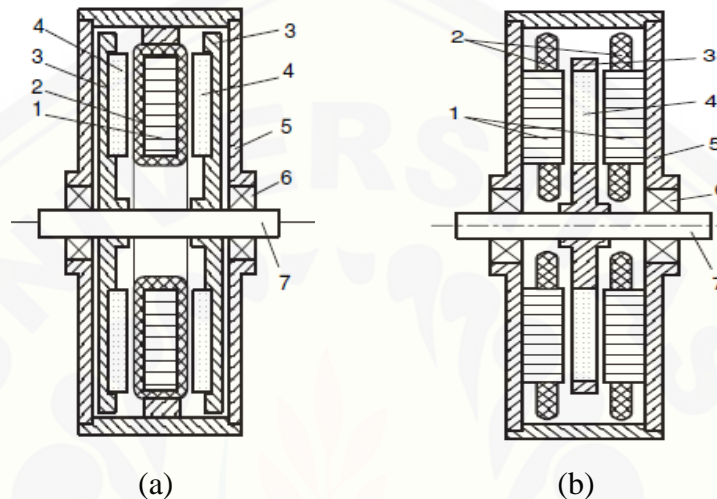
Keterangan :

1. Inti stator
2. Lilitan stator
3. Rotor
4. Magnet Permanen
5. *Frame*
6. *Bearing*
7. *Shaft*

2. Generator *axial flux* sisi ganda (*double sided*)

Konstruksi generator *axial flux* sisi ganda merupakan generator yang memiliki stator ganda atau rotor ganda. Konstruksi stator ganda yaitu generator

terdiri dari satu buah rotor yang diapit oleh dua buah stator, sehingga konstruksi ini juga bisa disebut sebagai generator *axial flux* internal rotor. Sebaliknya, konstruksi rotor ganda yaitu generator terdiri dari satu buah stator yang diapit dua buah rotor atau dapat disebut sebagai generator *axial flux* internal stator.



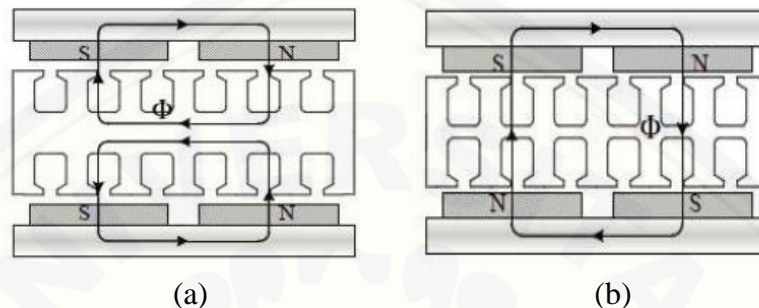
Gambar 2.5 Generator *axial flux* sisi ganda (*double sided*) (a) Internal stator dengan PM rotor ganda, (b) Internal PM rotor dengan stator ganda (Sumber : Gieras dkk., 2008)

Keterangan :

1. Inti stator
2. Lilitan stator
3. Rotor
4. Magnet Permanen
5. *Frame*
6. *Bearing*
7. *Shaft*

Pada Generator *axial flux* sisi ganda (*double sided*) internal stator dengan PM rotor ganda terdapat dua tipe berdasarkan arah fluksnya, yaitu tipe kutub searah (N-N) dan tipe kutub berlawanan (N-S). Pada konfigurasi tipe N-N, kutub N dan N atau kutub S dan S saling berhadapan satu sama lain. Sehingga, arah fluks magnetik memotong kumparan dari kutub utara (N) melewati *air gap* lalu

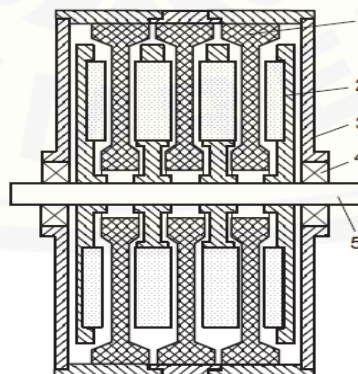
ditangkap oleh kutub selatan (S) yang berada di samping kanan dan kiri kutub utara (N) di rotor yang sama. Sedangkan pada konfigurasi tipe N-S, fluks magnetik memotong kumparan dari kutub utara (N) melewati *air gap* dan stator lalu ditangkap oleh kutub selatan (S), yang berhadapan dengan kutub utara (N) pada rotor yang berbeda (Akbar, 2012).



Gambar 2.6 Generator *axial flux* sisi ganda (*double sided*) internal stator dengan rotor ganda (a) Tipe kutub searah (N-N), (b) Tipe kutub berlawanan (N-S) (Sumber : Prisandi, 2011)

3. Generator *axial flux* multi *stage* (*multidisc*)

Konstruksi generator *axial flux* multi *stage* merupakan generator yang memiliki banyak stator atau banyak rotor. Dikatakan multi *stage* adalah ketika generator memiliki rotor atau stator lebih dari dua buah. Generator tipe ini biasanya digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik yang lebih besar. Torsi yang dimiliki oleh generator *axial flux* multi *stage* ini cenderung lebih besar sehingga memiliki transfer panas yang tidak begitu baik.



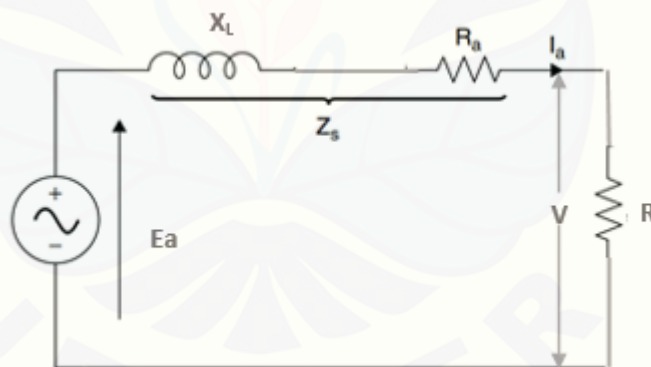
Gambar 2.7 Generator *axial flux* multi *stage* (*multidisc*) (Sumber : (Gieras dkk., 2008)

Keterangan :

1. Lilitan stator (kumparan)
2. Rotor
3. Magnet Permanen
4. *Frame*
5. *Bearing*
6. *Shaft*

2.2.4 Rangkaian Ekuivalen

Tegangan induksi (E_a) akibat gaya gerak listrik saat generator berputar yang dibangkitkan pada kumparan stator generator biasanya tidak sama dengan tegangan *output* pada generator. Hal ini biasanya disebut sebagai tegangan drop. Tegangan induksi akan sama dengan tegangan keluaran generator jika tidak ada arus yang mengalir pada stator yaitu dalam kondisi tanpa beban. Rangkaian ekuivalen generator ketika dihubungkan dengan beban diberikan pada gambar berikut.



Gambar 2.8 Rangkaian Ekuivalen Generator (Sumber : UTPL dkk., 2011)

Hubungan antara tegangan terminal atau tegangan *output* generator dengan tegangan induksi (E_a) diberikan dalam persamaan :

$$E_a = V + I_a R_a + I_a jX_L \dots \dots \dots (2.5)$$

Dengan:

E_a : Tegangan efektif Induksi (V)

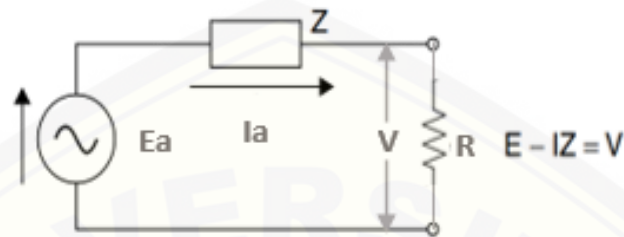
V : Tegangan efektif terminal (*output*) generator

I_a : Arus pada Stator (A)

R_a : Resistansi Kumparan (Ω)

X_L : Reaktansi induktif (Ω)

Dari persamaan di atas, rangkaian ekivalen dapat disederhanakan menjadi gambar dan persamaan berikut ini.



Gambar 2.9 Rangkaian Ekivalen Operasi Generator (Sumber : UTPL dkk., 2011)

$$V = E_a - I_a Z \dots \dots \dots (2.6)$$

Dengan:

V : Tegangan efektif terminal (*output*) generator

E_a : Tegangan efektif induksi (V)

I_a : Arus pada Stator(A)

Z : Impedansi Kumparan (Ω)

Sehingga, pada saat generator dalam kondisi tanpa beban, maka tidak terdapat aliran arus pada stator ($I = 0$) dan tegangan induksi akan bernilai sama dengan tegangan *output* generator ($E_a = V$).

2.3 Magnet Permanen

Magnet permanen adalah suatu material yang dapat menghasilkan medan magnet oleh struktur internal dari material itu sendiri. Medan magnet dari magnet permanen adalah jumlah putaran nuklir, elektron berputar dan orbit elektron itu sendiri. Pada bahan yang disebut feromagnet, semua putaran dan orbit elektron akan berbaris yang menyebabkan bahan memiliki sifat magnetik. Salah satu magnet permanen yang memiliki medan magnet paling kuat adalah *Neodymium Iron Boron* (NdFeB), seperti gambar di bawah ini.



Gambar 2.10 Magnet Permanen silinder jenis *Neodymium Iron Boron* (NdFeB)
(Sumber : Sumardjati dkk.)

Terdapat tiga jenis magnet permanen yang sering digunakan untuk motor listrik, yaitu :

1. *Alnicos* (Al, Ni, Co, Fe)

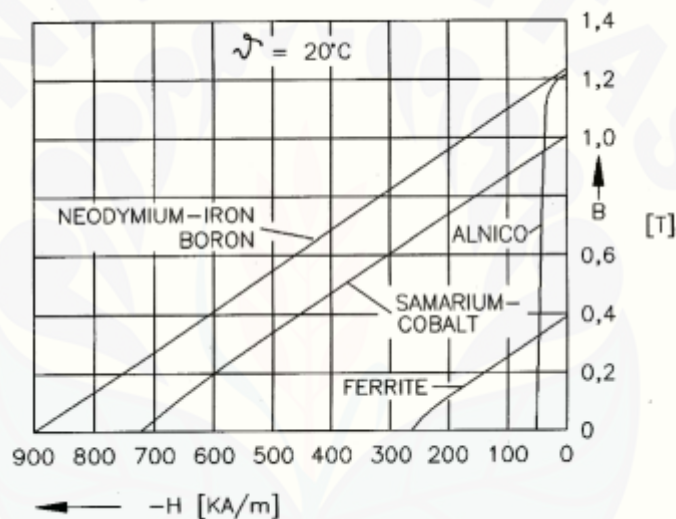
Keuntungan utama *alnico* adalah kerapatan fluks remanen magnetik yang tinggi dan suhu rendah. Namun, memiliki kekuatan koersif yang sangat rendah dan kurva demagnetisasi (gambar 2.10) sangat non-linier. Karena itu, magnet permanen *alnico* sangat mudah untuk menarik magnet dan mendemagnetisasi. *Alnico* telah banyak digunakan di permanen magnet motor DC komutator dari jenis disc dengan celah udara yang relatif besar. Hal ini menghasilkan fluks magnetik reaksi jangkar yang dapat diabaikan.

2. *Ceramics (ferrites)*, contoh : *barium ferrite* ($\text{BaO} \times 6\text{Fe}_2\text{O}_3$) and *strontium ferrite* ($\text{SrO} \times 6\text{Fe}_2\text{O}_3$)

Barium dan *strontium ferrites* yang dihasilkan oleh metalurgi serbuk ditemukan pada 1950-an merupakan permanen magnet yang memiliki kekuatan koersif yang lebih tinggi daripada *Alnico*, tetapi pada saat yang sama memiliki kerapatan fluks magnetik remanen yang lebih rendah. Keuntungan utama dari *ferrites* adalah harganya yang rendah dan hambatan listrik yang sangat tinggi, yang berarti tidak ada kerugian arus eddy dalam volume magnet permanen. Barium ferit biasanya digunakan dalam komutator motor DC untuk mobil (blower, kipas angin, wiper kaca depan, pompa, dll.) dan mainan listrik.

3. *Rare-earth materials*, contoh : *samarium-cobalt* (SmCo) and *neodymium-iron boron* (NdFeB)

Samarium-cobalt memiliki keunggulan yaitu kepadatan fluks yang tinggi, kekuatan koersif tinggi, produk energi tinggi, demagnetisasi linier kurva dan koefisien suhu rendah. Magnet permanen jenis ini cocok untuk motor dengan volume rendah dan motor yang beroperasi pada peningkatan suhu, misalnya generator brushless untuk mikro turbin. Dibandingkan dengan SmCo, NdFeB memiliki sifat magnetik yang lebih baik dari SmCo yaitu kepadatan fluks yang lebih tinggi, namun hanya pada suhu kamar. NdFeB juga rentan terhadap korosi.

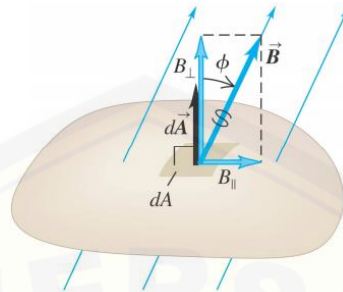


Gambar 2.11 Kurva demagnetisasi untuk berbagai bahan *permanent magnet* (Sumber : Gieras dkk., 2008)

2.4 Fluks Magnet

Magnet terdiri dari dua kutub yaitu kutub utara (*North*) dan kutub selatan (*South*). Dimana jika terdapat dua buah magnet saling berhadapan dengan kutub yang sama maka kedua magnet tersebut akan tolak-menolak, sedangkan jika kutub magnet yang berhadapan berbeda, maka akan saling tarik-menarik. Hal ini terjadi karena adanya medan magnet disekitar magnet . Medan magnet merupakan ruangan yang berada atau disekitar magnet yang memiliki gaya tarik atau menolak

dengan magnet lain. Seluruh kelompok medan magnet yang mengarah keluar dari magnet disebut sebagai kerapatan medan magnet atau fluks magnet.



Gambar 2.12 Fluks magnet pada suatu bidang (Sumber : Amirov, 2012)

Fluks magnet (Φ atau Φ_B) yang melalui beberapa permukaan sebanding dengan jumlah garis medan yang melewati permukaan itu. Fluks magnet yang melewati permukaan area vektor A adalah diberikan oleh persamaan berikut (Jearl Walker, 2014) :

$$\Phi_B = B A \cos \theta \dots\dots\dots(2.7)$$

dimana:

Φ_B : fluks medan magnet (Wb)

B : medan magnet (T)

A : luas permukaan magnet (m^2)

θ : sudut antara garis gaya medan magnet dengan garis normal bidang (tegak lurus dengan A)

Untuk medan magnet yang bervariasi, fluks magnet yang melalui elemen area yang sangat kecil dan dengan menganggap bidang dalam kondisi konstan, maka fluks magnet total melalui permukaan tersebut adalah (Jearl Walker, 2014) :

$$\Phi_B = \int \int_A B \cdot dA \dots\dots\dots(2.8)$$

dimana:

Φ_B : fluks medan magnet (Wb)

B : medan magnet (T)

A : luas permukaan magnet (m^2)

Pada suatu generator, kerapatan medan magnet maksimum yang melalui celah udara tertentu dapat diketahui dengan persamaan sebagai berikut (Alqodri dkk., 2015) :

$$B_{max} = B_r \frac{lm}{lm + \delta} \dots\dots\dots(2.9)$$

dimana:

B_r : densitas fluks magnet (T)

lm : tinggi magnet (m)

δ : lebar celah udara (m)

2.5 Kawat Email

Kawat email adalah sebuah konduktor atau penghantar yang terbuat dari kawat tembaga murni dengan bagian luar dilapisi oleh lumen sebagai isolator dan penahan korosi. Kawat email banyak digunakan sebagai penghantar karena memiliki beberapa keunggulan antara lain memiliki konduktivitas listrik yang tinggi, tahan terhadap korosi, konduktivitas panas yang tinggi, ekspansi panas tinggi, dan mudah disolder.

Pada pemilihan kawat email sebagai konduktor pada kumparan stator, tentunya berdasarkan spesifikasi karakteristik daya, arus dan tegangan pada generator itu sendiri. Dipasaran, kawat email memiliki beberapa ukuran diameter berdasarkan kemampuannya dalam menghantarkan arus seperti pada tabel berikut.

Tabel 2.1 Kemampuan hantar arus kawat email berdasarkan *American Wire Gauge* (AWG) (Sumber : Whilst J.S.T. (U.K.) Ltd.)

AWG	Diameter (mm)	Area (mm²)	Resistance (Ohms/m)	Max Current (Ampere)
18	1,0236	0,823	0,020	2,3
19	0,9118	0,653	0,026	1,8
20	0,8128	0,518	0,033	1,5
21	0,7239	0,41	0,041	0,457
22	0,6452	0,326	0,053	0,92
24	0,5105	0,205	0,084	0,577
26	0,4038	0,129	0,134	0,361
28	0,3200	0,081	0,212	0,226
32	0,2032	0,032	0,538	0,091
38	0,1016	0,00797	2,163	0,0228

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

3.1.1 Tempat Penelitian

Adapun penelitian yang berjudul “Analisis Pengaruh *Air Gap* (Celah Udara) Terhadap Unjuk Kerja Generator *Axial Flux Double Side Rotor* 1 Fasa dengan Kutub Berlawanan (N-S) Menggunakan Magnet Permanen *Neodymium Iron Boron* (NdFeB)” ini dilaksanakan di :

tempat : Laboratorium Konversi Energi Listrik, Fakultas Teknik, Universitas Jember

alamat : Jalan Slamet Riyadi No.62, Patrang, Jember 68111

3.1.2 Waktu Penelitian

Pelaksanaan penelitian dilakukan selama 4 bulan, yaitu pada bulan November 2019 sampai dengan Februari 2020. Adapun jadwal pelaksanaan penelitian ditunjukkan pada tabel berikut ini:

Tabel 3.1 Jadwal Pelaksanaan Penelitian

No.	Kegiatan	Bulan													
		November			Desember			Januari			Februari				
1.	Studi Literatur dan Perumusan Masalah	■	■	■											
2.	Perancangan dan Pembuatan Alat			■	■	■	■	■							
3.	Pengujian Alat dengan Variasi Celah Udara						■	■	■						
4.	Analisis Data Hasil Pengujian									■	■	■	■	■	■

Keterangan :

■ : Kegiatan dilaksanakan

3.2 Alat dan Bahan

Alat dan Bahan yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari perangkat lunak (*software*) dan perangkat keras (*hardware*), antara lain :

3.2.1 Perangkat Lunak (*software*)

Penelitian ini menggunakan beberapa perangkat lunak yang dapat mempermudah dalam perencanaan, pengujian dan analisis, diantaranya yaitu:

1. Perangkat lunak *Corel Draw X-7*, *software* ini digunakan untuk perencanaan dan desain bentuk stator serta rotor dalam dua dimensi (2D) guna menjaga kepresisian bentuk.
2. Perangkat lunak *Inventor Professional 2019*, digunakan untuk desain konstruksi atau bentuk generator *axial flux* dalam tiga dimensi (3D).
3. Perangkat lunak *Microsoft Excel 2013*, yaitu digunakan dalam proses analisis data hasil pengujian berupa pembuatan grafik karakteristik generator tipe *axial flux*.

3.2.2 Perangkat Keras (*hardware*)

Berikut adalah beberapa alat dan bahan berupa perangkat keras yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian ini, antara lain:

3.2.2.1 Alat

1. Solder tipe TQ99 (50-80W)
2. Tang Potong
3. Tang Kombinasi
4. Obeng
5. Bor MODERN M-2100B (350W)
6. Gerinda MAKITA 9553B (600W)
7. NZ-1 *Coil Winder Manual Winding Machine* (Penggulung kawat email manual) *Maximum speed* 2000 rpm
8. Motor DC NISCA NC5475C 24V sebagai *prime mover*
9. *Power supply* CODY 3005DT (30V – 5A)
10. *Teslameter* LEYBOLD DIDACTIC 51662
11. Multimeter Digital KRISBOW KW0600832 Tipe *Bench* 20000 Counts DMM
12. *Tachometer Counter* EXTECH 461920

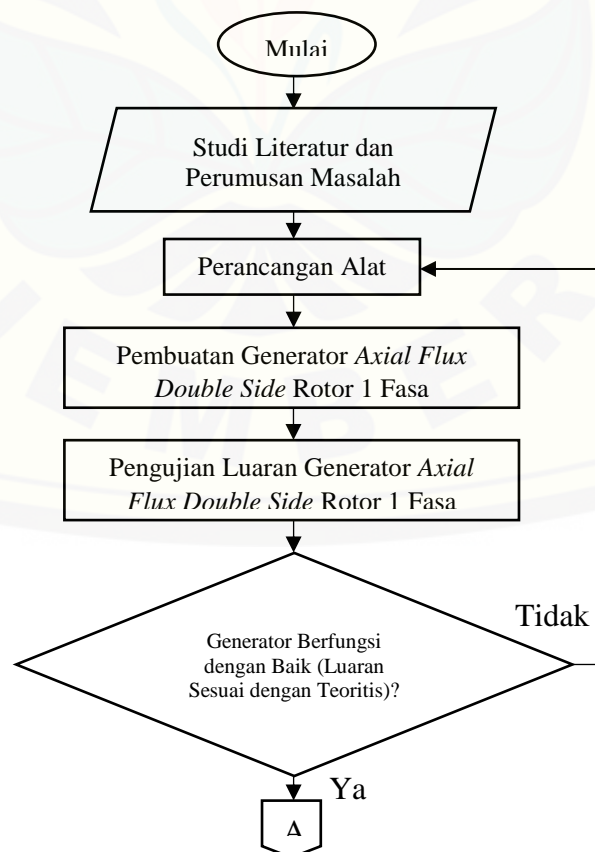
13. Osiloskop Digital DSO5102P (2 Channels)

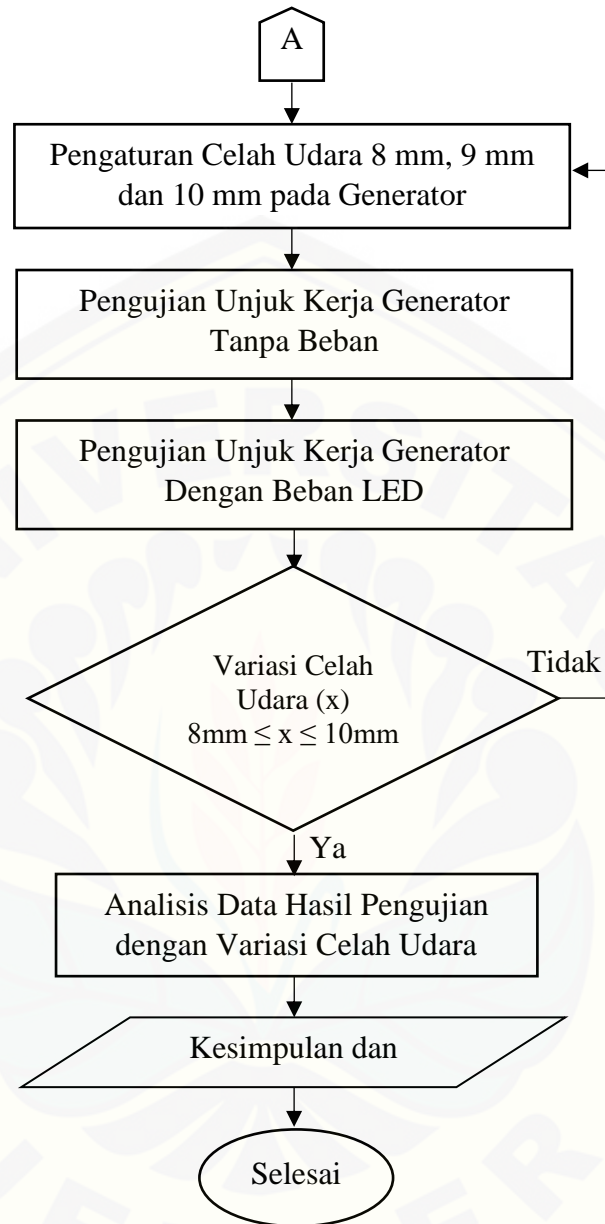
3.2.2.2 Bahan

1. Kawat *email* diameter 0,4 mm
2. Magnet Permanen *Neodymium Iron Boron* (NdFeB) silinder ukuran 15x3 mm
3. Akrilik dengan tebal 5 mm dan 3 mm
4. Spul jahit plastik diameter 2 cm dan lebar 1 cm
5. *Bearing* LIC.JAPAN 606RS ukuran 6 mm x 17 mm x 6 mm
6. Baut M6 panjang 30 mm
7. Mur M6 panjang 5 mm
8. Timah

3.3 Tahapan Penelitian

Beberapa tahapan dalam melakukan penelitian pada perancangan dan pembuatan generator *axial flux double side* rotor 1 fasa ini digambarkan pada *flowchart* berikut:





Gambar 3.1 *Flowchart* tahapan penelitian

1. Studi literatur dan perumusan masalah

Tahapan pertama dalam melakukan penelitian ini adalah studi literatur dengan mengumpulkan informasi dari buku, jurnal, artikel, *website*, dan sebagainya yang menunjang dalam penelitian sekaligus pengembangannya untuk mendapatkan hasil penelitian yang maksimal. Berdasarkan beberapa informasi yang didapat tersebut, maka akan dilakukan perumusan masalah yang menjadi tujuan hasil dari penelitian.

2. Perancangan Alat

Pada tahapan ini, akan ditentukan jenis fasa, tipe konstruksi, dan spesifikasi generator yang akan dibuat. Selain itu, juga dilakukan penentuan jumlah dan jenis permanen magnet, jumlah kumparan dan jumlah lilitan setiap kumparan serta jenis kawat email yang akan digunakan. Setelah ditentukannya spesifikasi dari generator yang akan dibuat, selanjutnya adalah mendesain rotor dan stator dalam dua dimensi (2D) menggunakan *software Corel Draw X-7* dan tiga dimensi (3D) menggunakan *software Inventor Professional 2019*.

3. Pembuatan Generator *Axial Flux Double Side Rotor* 1 Fasa

Setelah desain generator selesai dibuat, maka selanjutnya desain 2D tersebut digunakan untuk pemotongan akrilik sebagai kerangka dari stator dan rotor. Dalam pembuatan stator kemudian dilakukan penggulungan kawat *email* sebagai *coil* (kumparan) sesuai dengan jumlah lilitan yang digunakan. Sedangkan dalam pembuatan rotor adalah dengan pemasangan magnet permanen pada kerangka rotor dimana satu sisi rotor memiliki kutub yang sama. Setelah stator dan rotor selesai dibuat pada masing-masing kerangka, selanjutnya dilakukan penggabungan keduanya dengan pengaturan celah udara tertentu.

4. Pengujian Luaran Generator

Tahap ini merupakan tahap pengujian luaran generator seperti tegangan dan frekuensi untuk kecepatan putar rotor tertentu guna memastikan bahwa generator bekerja dengan baik. Generator dikatakan bekerja dengan baik apabila luaran generator seperti tegangan dan frekuensi yang dihasilkan telah sesuai dengan input kecepatan putar rotor yang diberikan, sehingga dapat dikatakan bahwa luaran generator telah sesuai dengan semua parameter yang mempengaruhi berdasarkan teori matematis dengan perhitungan. Apabila generator tidak berfungsi dengan baik, maka akan dilakukan perancangan generator kembali.

5. Pengujian Unjuk Kerja Generator *Axial Flux Double Side Rotor* 1 Fasa dengan Variasi Celah Udara

Tahapan pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi celah udara yaitu 8 mm, 9 mm dan 10 mm terhadap tegangan, arus, dan daya luaran generator. Penggunaan variasi celah udara sebesar 8 mm, 9 mm, dan 10 mm

adalah dikarenakan jika semakin kecil celah udara yang digunakan, *prime mover* (penggerak generator) tidak mampu untuk mengkopel generator. Hal ini selain dikarenakan kuat medan yang dimiliki magnet permanen jenis *Neodymium Iron Boron* (NdFeB) silinder ukuran 15x3 mm sangat besar juga dikarenakan generator yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis *double side* rotor yang mana memiliki jumlah magnet yang lebih banyak dari konstruksi generator lainnya. Penggunaan tiga variasi celah udara tersebut diharapkan sudah cukup untuk memberikan data karakteristik luaran generator terhadap perubahan celah udara yang diberikan.

Pengujian dengan variasi celah udara tersebut dilakukan dengan dua kondisi yaitu tanpa menggunakan beban dan menggunakan beban LED yang dikombinasikan hubungan seri dan paralel sesuai dengan tegangan luaran generator yang dihasilkan. Dimana pada masing-masing kondisi tersebut dengan variasi celah udara tertentu generator diuji pada kecepatan putar rotor yang berbeda. Pengujian ini menggunakan beberapa alat ukur diantaranya yaitu *teslameter* untuk mengukur besar medan magnet yang dihasilkan oleh magnet permanen, multimeter untuk mengukur tegangan dan arus, dan tachometer untuk mengukur kecepatan putar rotor akibat dari berputarnya motor sebagai penggerak. Selain itu, juga digunakan osiloskop untuk melihat gelombang dan frekuensi yang dihasilkan.

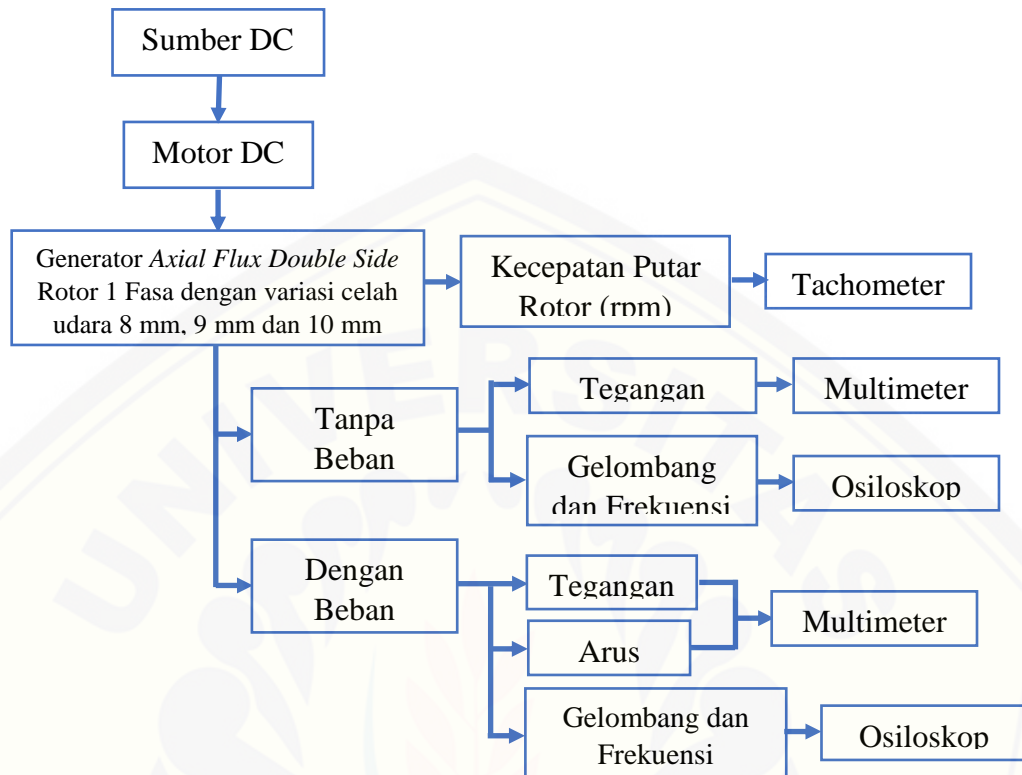
6. Analisis data

Setelah dilakukan pengujian dan pengambilan data, tahapan selanjutnya yaitu melakukan analisis terhadap data yang diperoleh dari pengujian unjuk kerja generator tipe *axial flux* dengan variasi celah udara pada kondisi tanpa beban dan dengan beban. Analisis ini dilakukan untuk mengetahui unjuk kerja dari generator tipe *axial flux* pada celah udara yang berbeda serta pengaruhnya terhadap torsi pada rotor generator.

7. Membuat Kesimpulan dan saran

Tahap terakhir adalah penarikan kesimpulan berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan dan memberikan saran guna memperbaiki kekurangan dan pengembangan pada penelitian selanjutnya.

3.4 Blok Diagram dan Perancangan Sistem



Gambar 3.2 Blok diagram sistem

Prinsip kerja dari penelitian ini dapat digambarkan pada blok diagram di atas. Energi mekanik yang digunakan untuk memutar rotor dari generator *axial flux double side* rotor yaitu sebuah motor DC dengan sumber DC. Generator *axial flux* ini memiliki konstruksi stator tunggal yang berada diantara dua rotor (*double side rotor*), sehingga kedua sisi inti kumparan mendapatkan medan magnet yang sama besar dan penyebaran fluks tertangkap secara maksimal. 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. Pada pengujian tanpa beban hanya didapatkan nilai tegangan *open circuit* dan frekuensi, karena tidak adanya arus yang mengalir. Keluaran generator arus bolak-balik satu fasa kemudian dihubungkan pada beban LED yang dikombinasikan hubungan seri dan paralel sesuai dengan tegangan luaran generator yang dihasilkan untuk

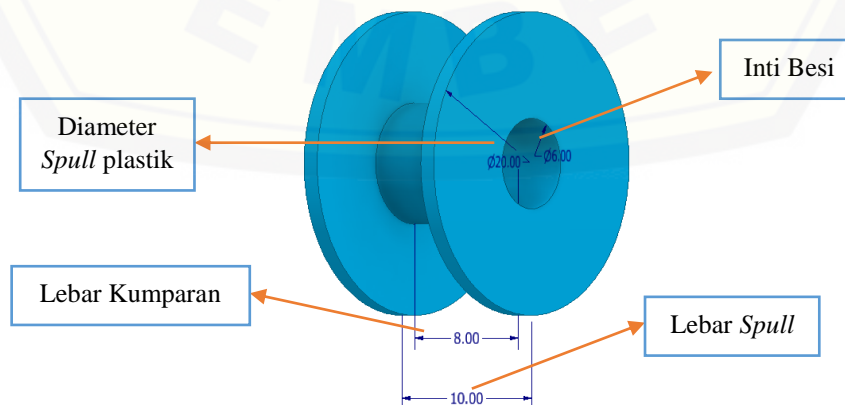
mendapatkan nilai tegangan dan arus yang diukur menggunakan multimeter. Dengan diperoleh nya arus dan tegangan luaran generator, maka akan didapatkan nilai torsi putar rotor dengan perhitungan menggunakan persamaan hubungan torsi dengan daya dan kecepatan putar rotor. Luaran generator juga dihubungkan pada osiloskop untuk mengetahui frekuensi gelombang satu fasa generator. Proses pengujian dilakukan pada setiap variasi celah udara 8 mm, 9 mm dan 10 mm.

Adapun parameter ideal yang ingin dicapai dari pengujian ini adalah pertama, bentuk gelombang luaran generator telah menunjukkan gelombang arus bolak-balik (AC), dimana frekuensi dan tegangan (amplitudo) yang dihasilkan sesuai dengan kecepatan putar rotor dan parameter lainnya yang diberikan sesuai dengan perhitungan matematis. Kedua, tegangan dan arus luaran pada saat generator dihubungkan dengan beban dan adanya drop tegangan yang dihasilkan telah sesuai dengan perhitungan matematis dengan toleransi persentase error (E%) tidak lebih dari 20% berdasarkan dengan teori rangkaian ekivalen generator.

3.5 Desain Alat

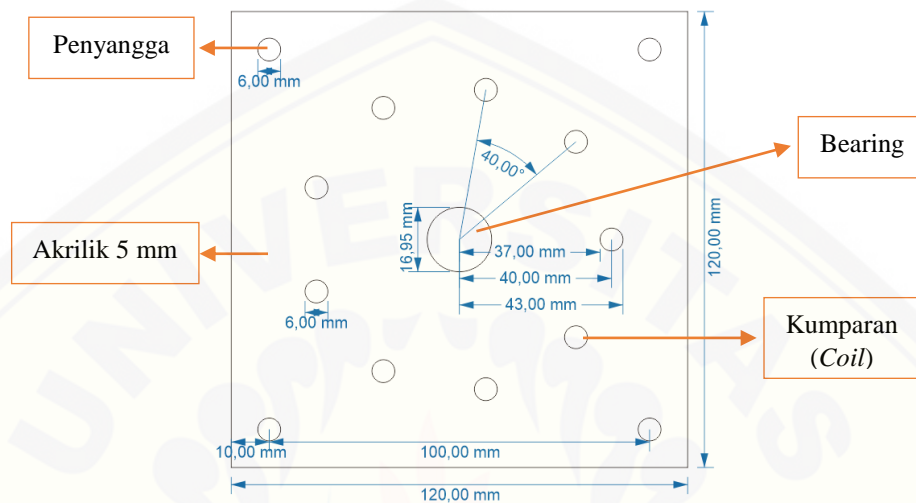
3.5.1 Desain Stator

Pada generator *axial flux double rotor* 1 fasa yang akan dibuat, menggunakan satu buah *side stator* yang terdiri dari 9 buah kumparan. Dimana masing-masing kumparan terdiri dari 300 lilitan kawat *email* berdiameter 0.4 mm. Kumparan yang digunakan adalah kumparan dengan inti besi yang dililitkan pada sebuah *spull* mesin jahit berbahan plastik seperti gambar dibawah ini :



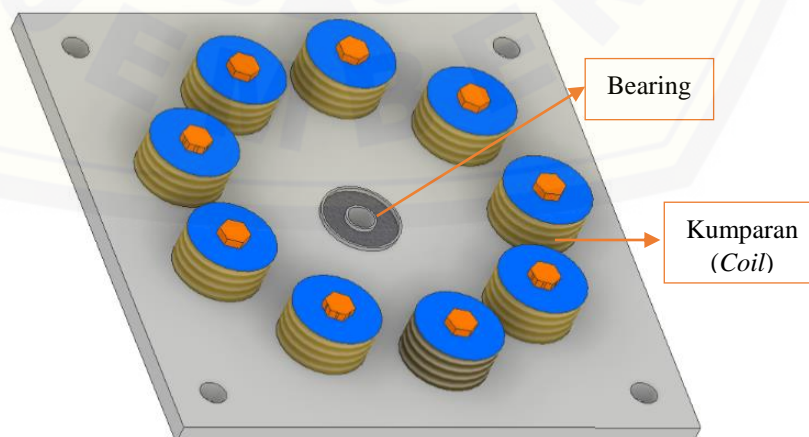
Gambar 3.3 *Spull* mesin jahit berbahan plastik sebagai tempat kumparan stator

Spull plastik mesin jahit yang digunakan memiliki lebar 10 mm atau 1 cm dengan diameter sebesar 20 mm atau 2 cm. Kumaran yang berjumlah 9 buah tersebut akan diletakkan pada sebuah akrilik sebagai kerangka stator dengan tebal 5 mm secara melingkar seperti gambar berikut.



Gambar 3.4 Desain dua dimensi (2D) kerangka stator

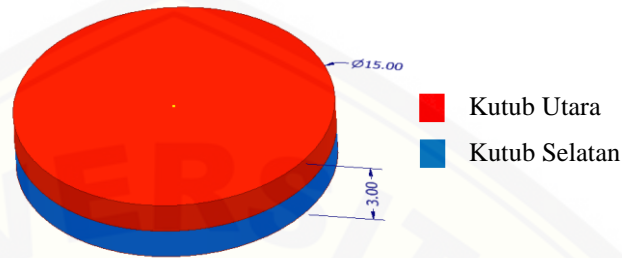
Dengan jumlah kumaran sebanyak 9 buah yang disusun melingkar, maka setiap kumaran memiliki jarak sudut sebesar 40° dengan kumaran lainnya. Dengan demikian, generator *axial flux double side* rotor 1 fasa ini memungkinkan untuk digunakan sebagai generator 3 fasa dengan masing-masing fasa memiliki 3 buah kumaran yang memiliki beda fasa sebesar 120° . Berikut merupakan desain tiga dimensi (3D) stator yang akan dibuat.



Gambar 3.5 Desain tiga dimensi (3D) stator

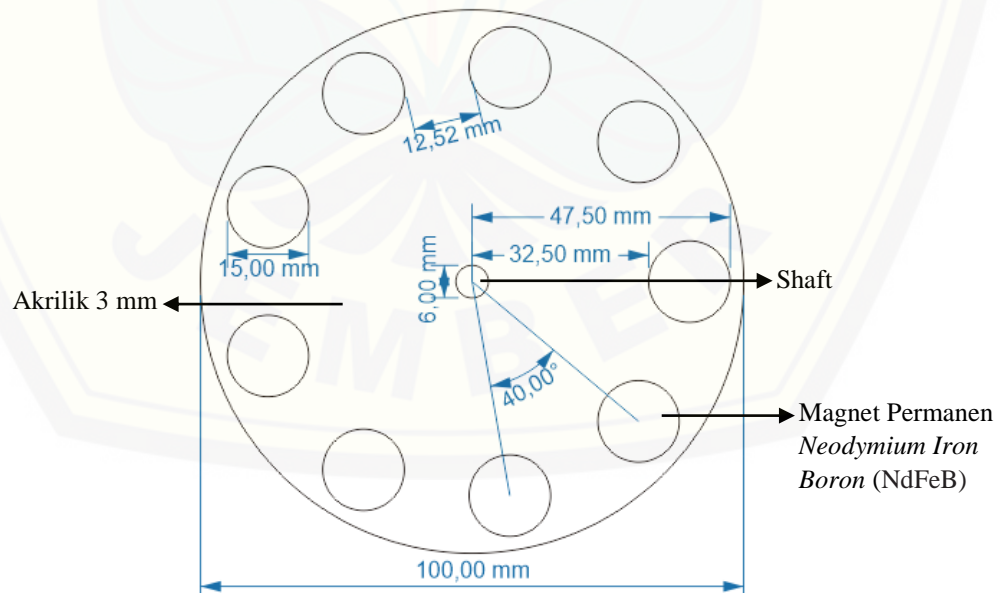
3.5.2 Desain Rotor

Pada generator *axial flux* 1 fasa ini terdiri dari 2 *side* rotor dengan internal stator yang mana masing-masing rotor menggunakan 9 buah magnet permanen *Neodymium Iron Boron* (NdFeB) silinder berdiameter 15 mm dan tebal 3 mm.

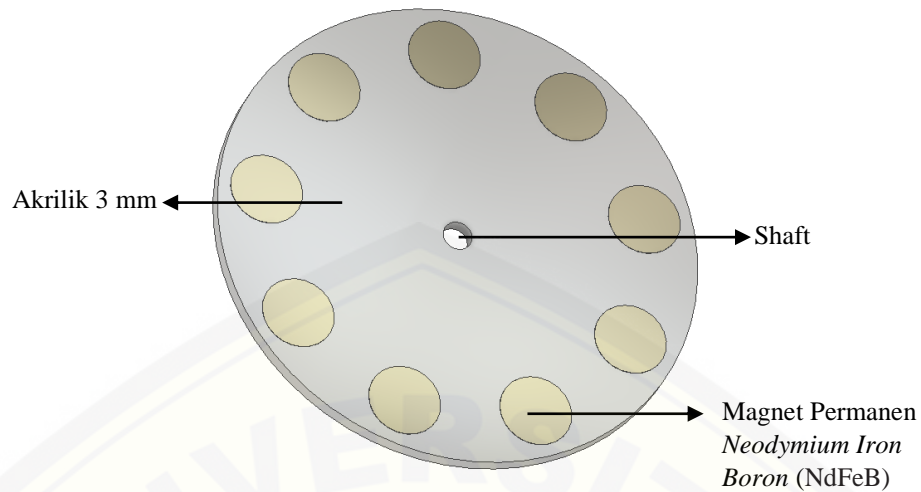


Gambar 3.6 Magnet permanen *Neodymium Iron Boron* (NdFeB) untuk generator *axial flux double side* rotor satu fasa

Pada rotor, magnet permanen *Neodymium Iron Boron* (NdFeB) akan diletakkan pada sebuah kerangka rotor secara melingkar dengan setiap magnet memiliki jarak sudut sebesar 40° dengan magnet lainnya sebagaimana pada stator. Dimana, titik tengah magnet pada rotor akan sejajar dengan titik tengah kumparan pada stator.



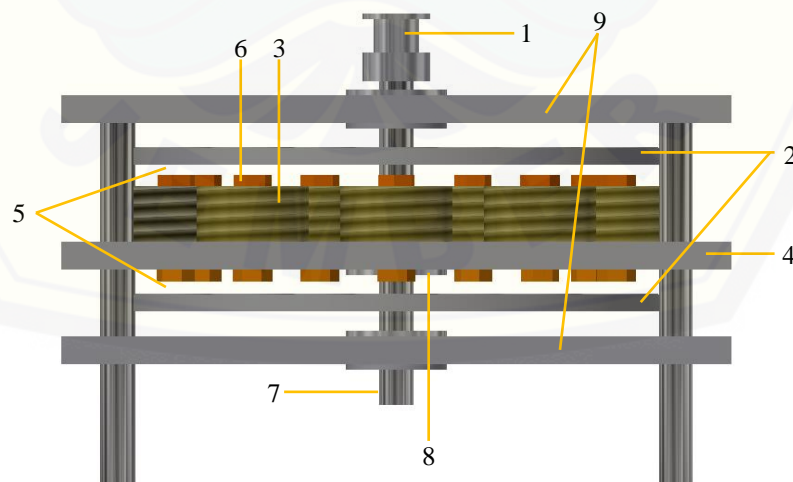
Gambar 3.7 Desain dua dimensi (2D) kerangka rotor



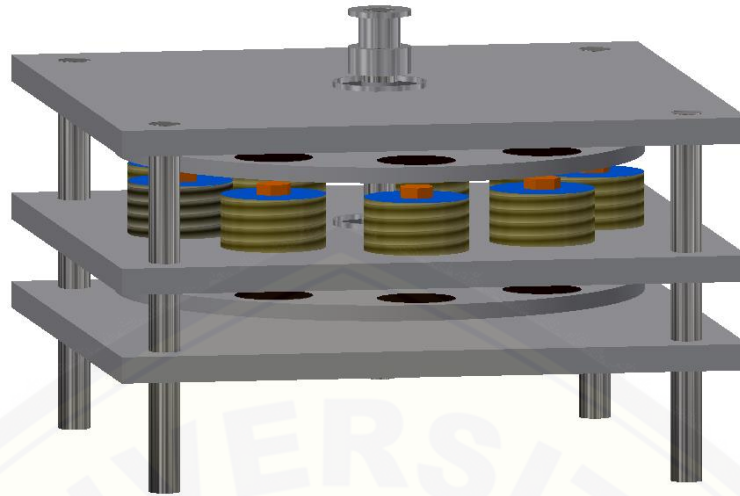
Gambar 3.8 Desain tiga dimensi (3D) rotor

3.5.3 Desain Generator *Axial Flux Double Side Rotor* 1 Fasa

Berdasarkan desain stator dan rotor diatas, maka stator dan rotor akan digabung membentuk sebuah generator *axial flux* dengan konstruksi *double side rotor* internal stator atau digunakan dua buah rotor yang diletakkan diantara satu stator. Konstruksi ini memungkinkan untuk kedua sisi inti kumparan mendapatkan medan magnet yang sama besar dan penyebaran fluks tertangkap secara maksimal. Konstruksi *double side* ini juga sering disebut sebagai celah ganda.



Gambar 3.9 Desain Tiga Dimensi (3D) Generator *Axial Flux Double Side Rotor* 1 Fasa Tampak Samping



Gambar 3.10 Desain Tiga Dimensi (3D) Generator *Axial Flux Double Side Rotor* 1 Fasa

Keterangan :

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

Pada gambar 3.8 dan gambar 3.9 di atas, menunjukkan desain keseluruhan tiga dimensi (3D) generator *axial flux double side rotor* satu fasa yang memiliki beberapa bagian antara lain :

1. *Pulley*

Pulley berfungsi sebagai penghubung mekanis dari motor DC sebagai *prime mover* ke generator *axial flux double side rotor* melalui sebuah *belt* jenis GT2 dengan lebar 6 mm, pitch 2 mm dan panjang keliling 300 mm. Belt ini disesuaikan dengan *pulley* yang digunakan yaitu jenis GT2 16 *teeth*, *width* 6 mm dengan *bore* (lubang tengah) 6 mm.

2. Rotor

Rotor dengan *double side* ini menggunakan magnet permanen *Neodymium Iron Boron* (NdFeB). Magnet permanen dipasang pada rotor dengan satu sisi rotor memiliki kutub magnet yang sama. Sisi kutub selatan pada rotor 1 akan menghadap pada sisi kutub utara pada rotor 2. Konstruksi ini disebut generator *axial flux double side* rotor tipe N-S atau kutub berlawanan. Dimana, arah fluks magnet memotong kumparan dan akan menuju ke kutub yang berlawanan pada rotor yang lain.

3. Kumparan (*Coil*)

Kumparan terdiri dari lilitan kawat *email* berdiameter 0.4 mm sebanyak 300 lilitan. Kawat *email* dililitkan pada sebuah *spull* plastik yang digunakan pada mesin jahit dengan diameter 20 mm dan tebal 10 mm.

4. Stator

Stator terdiri dari 9 buah kumparan yang terhubung secara seri antara kumparan satu dengan kumparan lainnya. Sehingga dihasilkan 2 terminal *output* yaitu fasa dan netral.

5. Celah Udara (*Air Gap*)

Generator ini memiliki celah udara ganda, dimana lebar celah udara (*air gap*) antara magnet permanen pada rotor dengan stator akan diatur sesuai dengan variasi celah udara yang digunakan pada penelitian ini yaitu 8 mm, 9 mm dan 10 mm.

6. Inti Kumparan

Inti kumparan pada masing masing kumparan terbuat dari bahan besi yang dapat menghantarkan fluks magnet secara maksimal pada kumparan. Induksi yang dihasilkan pada inti kumparan akan menghasilkan kutub utara dan selatan pada stator berdasarkan kaidah tangan kanan. kutub utara pada stator disusun menghadap kutub selatan magnet dan kutub selatan pada stator menghadap kutub utara magnet untuk menimbulkan GGL pada kumparan.

7. Shaft

Shaft adalah poros yang berfungsi sebagai penompang rotor yang berputar. Poros yang digunakan memiliki panjang 7 cm dengan diameter 6 mm menyesuaikan dengan diameter lingkaran dalam *bearing*.

8. Bearing

Bearing digunakan untuk menjaga agar poros bisa berputar tanpa menyebabkan stator turut berputar. *Bearing* yang digunakan memiliki diameter luar 17 mm dan diameter lingkaran dalam 6 mm.

9. Akrilik Penyangga

Akrilik penyangga memiliki bentuk dan dimensi yang sama dengan kerangka stator. Akrilik penyangga digunakan sebagai keseimbangan generator.

Dari desain dan keterangan di atas, maka spesifikasi generator *axial flux double side* rotor 1 fasa yang akan digunakan dalam penelitian ini yaitu antara lain:

Tabel 3.2 Perencanaan spesifikasi generator *axial flux double side* rotor

Parameter	Simbol	Nilai
Jumlah fasa	N_{ph}	1 fasa
Jumlah stator		1 stator
Jumlah rotor		2 rotor
Jumlah kumparan	N_s	9 kumparan
Jumlah lilitan per kumparan	N	300 lilitan
Inti Besi		Ya
Diameter kawat email		0.4 mm
Ukuran Stator	p	12 cm
	l	12 cm
Jumlah magnet per rotor	N_m	9 magnet
Dimensi magnet	r	7.5 mm
	t	3 mm
Diameter rotor	D	10 cm
Radius dalam magnet	r_i	3.25 cm
Radius luar magnet	r_o	4.75 cm
Jarak antar magnet	τ_f	1.252 cm

3.6 Metode Pengumpulan Data

3.6.1 Pengujian Generator *Axial Flux Double Side Rotor 1 Fasa*

Pada penelitian ini, dilakukan pengumpulan data dengan menguji generator *axial flux double side rotor 1 fasa* pada variasi celah udara 8 mm, 9 mm dan 10 mm, dengan masing-masing variasi celah udara tersebut diuji pada kondisi, antara lain :

1. Pengujian tanpa beban

Pada pengujian tanpa beban dengan variasi celah udara 8 mm, 9 mm dan 10 mm ini dilakukan pada kecepatan putar tertentu yaitu pada kecepatan putar rendah (≤ 1000 rpm), kecepatan putar menengah (1000-2500 rpm) dan kecepatan putar tinggi (≥ 2500 rpm). Pada kecepatan putar rendah diberikan kecepatan putar rotor yaitu 500 rpm dan 1000 rpm, pada kecepatan putar menengah dengan kecepatan putar rotor 1500 rpm dan 2000 rpm serta pada kecepatan putar tinggi dengan kecepatan putar rotor sebesar 2500 rpm dan 3000 rpm.

2. Pengujian dengan beban.

Pengujian yang kedua yaitu dengan memberikan beban LED yang dikombinasikan hubungan seri dan paralel sesuai dengan tegangan luaran generator yang dihasilkan. pada setiap kecepatan putar sebagaimana pada tabel 3.3 untuk masing-masing variasi celah udara 8 mm, 9 mm dan 10 mm. Dengan pengujian ini, akan didapatkan nilai karakteristik arus dan tegangan sehingga diperoleh nilai daya luaran generator dan torsi putar rotor generator pada variasi celah udara yang telah ditentukan. Hasil pengujian pada kondisi ini akan disajikan pada tabel di bawah ini.

3.6.2 Perhitungan

1. Frekuensi Keluaran Generator *Axial Flux 1 Fasa*

Nilai frekuensi gelombang satu fasa generator *axial flux* bergantung pada kecepatan putar dan jumlah kutub pada generator. Dimana ketiga parameter ini saling berhubungan dengan persamaan berikut ini.

$$f = \frac{np}{120} \dots\dots\dots(3.1)$$

dimana:

N : kecepatan putar rotor (rpm)

p : jumlah *pole* magnet

f : frekuensi (Hz)

2. Fluks Permanen Magnet Generator *Axial Flux* 1 Fasa

Untuk mendapatkan nilai fluks yang dihasilkan dari permanen magnet dapat menggunakan persamaan :

$$\Phi = B_r A \cos \theta \dots\dots\dots(3.2)$$

dimana:

Φ : fluks medan magnet (Wb)

B_r : medan magnet rotor (T)

A : luas permukaan magnet (m²)

θ : sudut antara garis gaya medan magnet rotor dengan garis normal bidang penampang kumparan stator

Sedangkan untuk fluks maksimum magnet (Φ_{max}) pada suatu generator *axial* dapat diperoleh dengan persamaan :

$$\Phi_{max} = A_{magn} B_{max} \dots\dots\dots(3.3)$$

dimana:

Φ_{max} : fluks maksimum magnet (Wb)

A_{magn} : luasan medan magnet (m²)

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

Berdasarkan persamaan (3.4), luasan medan magnet atau dapat diperoleh dari persamaan berikut :

$$A_{magnet} = \pi r_{magnet}^2 \dots\dots\dots(3.4)$$

dimana:

A_{magnet} : luasan medan magnet (m²)

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

Selain itu, nilai kerapatan medan magnet maksimum yang melalui celah udara dapat diketahui dengan persamaan sebagai berikut :

$$B_{max} = B_r \frac{lm}{lm + \delta} \dots\dots\dots(3.5)$$

dimana:

B_r : densitas fluks magnet (T)

lm : tinggi magnet (m)

δ : lebar celah udara (m)

3. Tegangan Keluaran Generator *Axial Flux* 1 Fasa

Adanya perubahan sudut perpotongan antara garis gaya medan magnet dengan bidang normal kumparan yang diakibatkan perputaran rotor, maka garis gaya listrik diinduksikan dalam kumparan itu dengan persamaan:

$$E_a = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph} \dots\dots\dots(3.6)$$

dimana:

E_a : tegangan efektif induksi generator (V)

f : frekuensi (Hz)

N : jumlah lilitan

Φ_{max} : fluks maksimum magnet (Wb)

Ns : jumlah kumparan

Nph : jumlah fasa

Berdasarkan rangkaian ekivalen generator pada saat generator dihubungkan dengan beban, maka tegangan efektif keluaran pada generator *axial flux* satu fasa dipengaruhi oleh resistansi dan reaktansi induktif stator yang diberikan pada persamaan:

$$V = E_a - I \cdot Z \dots\dots\dots(3.7)$$

dimana:

V : tegangan efektif *output* generator (V)

E_a : tegangan efektif induksi generator (V)

I : arus (A)

Z : impedansi (Ω)

Berdasarkan persamaan (3.8), impedansi diperoleh dari persamaan hubungan resistansi dan induktansi oleh kumparan, yaitu:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \dots\dots\dots(3.8)$$

dengan,

$$X_L = 2\pi fL \dots\dots\dots(3.9)$$

dimana:

Z : impedansi (Ω)

R : resistansi (Ω)

X_L : reaktansi induktif (Ω)

L : induktansi (H)

4. Daya Keluaran Generator *Axial Flux* 1 Fasa

Besarnya daya keluaran yang dihasilkan oleh generator *axial flux double side* rotor satu fasa dapat diperoleh dari persamaan berikut:

$$P_o = V \cdot I \dots \dots \dots (3.10)$$

dimana:

P_o : daya *output* generator (W)

V : tegangan *output* generator (V)

I : arus *output* generator (A)

5. Menghitung Torsi pada Rotor Generator

Untuk menghitung nilai torsi pada rotor generator dapat diperoleh dari persamaan hubungan torsi dengan daya dan kecepatan putar rotor yaitu sebagai berikut (Ibrahim dkk., 2016):

$$\tau = \frac{P}{2\pi \frac{n}{60}} \dots \dots \dots (3.11)$$

dimana :

τ : Torsi (Nm)

P : Daya *output* generator (W)

n : Kecepatan putar (rpm)

6. Menghitung *Error* Persen Tegangan *Output*

Perhitungan *error* persen dilakukan untuk mengetahui keakuratan data hasil pengujian (ukur) generator dengan hasil perhitungan. Perhitungan *error* persen didasarkan pada persamaan:

$$Error\ Percent\ V_{out} = \left| \frac{Hasil\ perhitungan - Hasil\ ukur}{Hasil\ perhitungan} \right| \times 100\% \dots \dots \dots (3.12)$$

BAB 5. PENUTUP

Berdasarkan analisis data hasil pengujian unjuk kerja generator *axial flux double side* rotor 1 fasa pada variasi celah udara 8 mm, 9 mm dan 10 mm yang telah dilakukan dapat ditarik beberapa kesimpulan dan saran untuk penelitian lebih lanjut antara lain :

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan dari dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Pada variasi *air gap* (celah udara) yang diberikan pada generator *axial flux double side* rotor 1 fasa dengan kutub berlawanan (N-S) menggunakan magnet permanen *Neodymium Iron Boron* (NdFeB) diketahui bahwa jarak celah udara tidak mempengaruhi besar frekuensi luaran generator. Sebagaimana berdasarkan gambar 4.11 grafik frekuensi gelombang *output* generator terhadap kecepatan putar rotor pada variasi 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. Dengan demikian, diketahui bahwa besar frekuensi gelombang *output* generator hanya dipengaruhi oleh kecepatan putar rotor dan jumlah *pole* yang digunakan generator. Pada setiap pengujian celah udara yang berbeda jumlah *pole* yang digunakan adalah tetap, maka frekuensi yang dihasilkan sama besar pada kecepatan putar rotor yang sama.
2. Pada variasi *air gap* (celah udara) yang diberikan pada generator *axial flux double side* rotor 1 fasa diperoleh semakin kecil jarak celah udara yang digunakan maka tegangan *open circuit* (Voc) atau tegangan *output* tanpa beban, tegangan *output* dengan beban dan arus *output* yang dihasilkan semakin besar pada kecepatan putar rotor yang sama. Dengan semakin besarnya tegangan dan arus *output* saat generator dihubungkan dengan beban, maka daya *output* yang dihasilkan juga semakin besar. Sebagaimana pada pengujian celah udara 8 mm, saat kecepatan putar rotor sebesar 3000 rpm

diperoleh V_{oc} sebesar 8,496 V, tegangan *output* dengan beban 3 LED seri sebesar 7,468 V dan arus *output* sebesar 14,961 mA, sehingga daya *output* sebesar $1,117 \times 10^{-1}$ W. Sedangkan pada pengujian celah udara 9 mm, saat kecepatan putar rotor sebesar 3000 rpm diperoleh V_{oc} sebesar 7,669 V, tegangan *output* dengan beban 3 LED seri sebesar 7,279 V dan arus *output* sebesar 7,444 mA, sehingga daya *output* sebesar $5,418 \times 10^{-2}$ W. Dan pada pengujian celah udara 10 mm, saat kecepatan putar rotor sebesar 3000 rpm diperoleh V_{oc} sebesar 6,976 V, tegangan *output* dengan beban 3 LED seri sebesar 6,826 V dan arus *output* sebesar 1,298 mA, sehingga daya *output* sebesar $8,860 \times 10^{-3}$ W.

3. Dengan semakin besarnya tegangan *output* tanpa beban, tegangan *output* dengan beban, arus *output* dan daya *output* yang dihasilkan, saat jarak celah udara (*air gap*) yang digunakan semakin kecil dalam hal ini adalah celah udara sebesar 8 mm, 9 mm dan 10mm, maka torsi putar pada rotor generator juga semakin besar. Sebagaimana pada pengujian celah udara 8 mm dengan beban 3 LED seri diperoleh besar torsi rotor yaitu $3,558 \times 10^{-4}$ Nm saat kecepatan putar sebesar 3000 rpm. Dengan beban dan kecepatan putar rotor yang sama, diperoleh besar torsi rotor pada celah udara 9 mm yaitu $1,726 \times 10^{-4}$ Nm, sedangkan pada celah udara 10 mm torsi rotor sebesar $2,822 \times 10^{-5}$ Nm. Dapat dikatakan bahwa semakin kecil jarak celah udara yang digunakan generator, maka semakin besar gaya putar (torsi) yang harus diberikan penggerak generator untuk dapat memenuhi torsi yang sebanding dengan torsi rotor. Dengan demikian, gaya putar atau torsi yang terlalu besar pada generator perlu diperhitungkan dengan menyesuaikan kemampuan penggerak generator yang digunakan.

5.2 Saran

Adapun beberapa saran yang dapat dipertimbangkan pada penelitian selanjutnya antara lain :

1. Dalam melakukan pengujian unjuk kerja generator secara pengukuran dapat memperhatikan keakuratan alat ukur yang digunakan serta diperlukan

pengukuran atau perhitungan lebih lanjut mengenai rugi-rugi lain yang mempengaruhi unjuk kerja generator selain rugi-rugi tembaga pada kumparan stator yang telah dilakukan, seperti rugi gesekan, rugi inti besi dan rugi lainnya guna memperkecil nilai *error* persen yang dihasilkan.

2. 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.
3. Dengan parameter generator dan penggerak yang relatif sama, jarak celah udara yang ideal untuk digunakan pada penelitian selanjutnya adalah berkisar antara 5 mm hingga 8 mm jika digunakan untuk membangkitkan luaran berupa tegangan dan arus yang cukup besar.
4. Pada penelitian selanjutnya dapat dilakukan penelitian dengan membandingkan unjuk kerja generator *axial flux double side rotor* yang telah dibuat pada penelitian ini dengan generator *axial flux* jenis konstruksi *double side stator*.

DAFTAR PUSTAKA

- Akbar, M. 2012. Rancang bangun generator turbin angin axial flux tiga fasa untuk kecepatan angin rendah. *Fakultas Teknik, Universitas Indonesia Universitas Indonesia*
- Algodri, M. F., C. E. Rustana, dan H. Nasbey. 2015. Rancang bangun generator fluks aksial putaran rendah magnet permanen jenis neodymium (ndfeb) untuk turbin angin sumbu vertikal tipe double-stage savionus. *Seminar Nasional Fisika SNF 2015*. IV:135–142.
- Ani, S. O., H. Polinder, J. Y. Lee, S. R. Moon, dan D. H. Koo. 2012. Performance of axial flux permanent magnet generator for human power application. *IET Conference Publications*. 2012(592 CP):1–5.
- Chapman, S. J. 2012. *Electric Machinery Fundamentals-5th Ed*. New York. *Mc Graw Hill Companies*.
- Fajar, A. 2017. Rancang bangun generator sinkron axial flux permanent magnet 1500 watt. (December)
- Gieras, F. J., R.-J. Wang, dan J. M. Kamper. 2008. *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*. Springer Science.
- Harsha, N. R. S., A. Prakash, dan D. P. Kothari. 2016. The foundations of electric circuit theory. *The Foundations of Electric Circuit Theory*. 1–206.
- Ibrahim, W. A., W. T. Widodo, dan W. T. Supardi. 2016. Sistem kontrol torsi pada motor dc. *IJEIS*. 6(1):93–104.
- Indriani, A. 2015. Analisis pengaruh variasi jumlah kutub dan jarak celah magnet rotor terhadap performan generator sinkron fluks radial. *Jurnal Rekayasa Dan Teknologi Elektro*. 9(2)
- Jearl Walker. 2014. *Fundamentals of Physics Halliday & Resnick 10ed*. Wiley.
- Prasetijo, H. dan S. Waluyo. 2016. Optimasi lebar celah udara generator axial magnet permanen putaran rendah 1 fase. *Jurnal Nasional Teknik Elektro Dan Teknologi Informasi (JNTETI)*. 4(4):2–6.
- Prisandi, C. H. 2011. Studi desain kumparan stator pada generator sinkron magnet permanen fluks aksial tanpa inti stator. *Fakultas Teknik, Universitas Indonesia*
- Putri, A. K. A. 2019. Rancang Bangun Generator Axial Flux Satu Fasa Menggunakan Neodymium Iron Boron Magnet (NdFeB) Silinder Dengan

Kutub Searah (U-U). Teknik Elektro Universitas Jember.

Rohmah, A. 2019. Rancang Bangun Generator AC Konstruksi Axial Flux Satu Fasa Menggunakan Magnet Neodymium (NdFeB) Silinder Dengan Kutub Magnet Berlawanan (U-S). Universitas Jember.

Rossouw, F. G. 2009. Analysis and design of axial flux permanent magnet wind generator system for direct battery charging applications. *Africa*. (March):140.

Sh, S. 2012. Elementary

Sumardjati, P., S. Pramono, dan F. D. Wijaya. 2017. The ferrite effect on magnetic field distribution with two rotors and one stator machine topology. *Procedia Engineering*. 170:384–389.

United States Department of Energy dan Washington. 1992. AC theory , circuits , generators & motors. 3–92.

UTPL, E. D. E. L. A. M. D. E. C. C, T. Motors, C. Module, a C. Generators, a C. Motors, D. Intent, E. S. Instrumentation, S. Approach, Electronicam, C. Continua, O. L. Regalado, P. Aelterman, K. Rabaey, W. Verstraete, A. M. Cant, S. Todo, E. Moyer, U. Chicago, Hydro-Quebec, K. S. Ríos, John Wiley & Sons, O. Box, dan I. Boldea. 2011. “*Part I: Theory , Construction , Principles of Operation*”. 10. Style (DeKalb, IL).

Whilst J.S.T. (U.K.) Ltd. tanpa tahun. *American Wire Gauge (AWG) Cable Conductor Size*. England: J.S.T. (U.K.) Ltd.

Zou, T., D. Li, R. Qu, J. Li, dan D. Jiang. 2017. Analysis of a dual-rotor, toroidal-winding, axial-flux vernier permanent magnet machine. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 53(3):1920–1930.

LAMPIRAN

A. Perhitungan

1. Perhitungan Data Hasil Pengujian pada Celah Udara 8mm

Perhitungan kerapatan fluks magnet

$$\begin{aligned}
 B_{max} &= B_r \frac{lm}{lm + \delta} \\
 &= 0,002 \frac{0,003}{0,003 + 0,008} \\
 &= 0,0005455 \text{ T} \\
 &= 5,455 \times 10^{-4} \text{ T}
 \end{aligned}$$

Perhitungan luasan medan magnet

$$\begin{aligned}
 A_{magnet} &= \pi r_{magnet}^2 \\
 &= 3,14 \times 0,0075^2 \\
 &= 0,0001766 \text{ m}^2 \\
 &= 1,766 \times 10^{-4} \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

Perhitungan fluks maksimum magnet

$$\begin{aligned}
 \Phi_{max} &= A_{magn} B_{max} \\
 &= 1,766 \times 10^{-4} \times 5,455 \times 10^{-4} \\
 &= 9,634 \times 10^{-8} \text{ Wb}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Phi_{max} \text{ per rotor} &= \Phi_{max} \times Nm \text{ per rotor} \\
 &= 9,634 \times 10^{-8} \times 9 \\
 &= 8,671 \times 10^{-7} \text{ Wb}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Phi_{max} \text{ 2 rotor} &= \Phi_{max} \text{ per rotor} \times 2 \\
 &= 8,671 \times 10^{-7} \times 2 \\
 &= 1,734 \times 10^{-6} \text{ Wb}
 \end{aligned}$$

A. Pengujian Tanpa Beban pada Celah Udara 8mm

1) Saat Kecepatan Putar Rotor 500 rpm

a. Perhitungan Frekuensi

$$\begin{aligned}
 f &= \frac{np}{120} \\
 &= \frac{500 \cdot 18}{120} \\
 &= 75 \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

b. Perhitungan Tegangan Output

$$\begin{aligned}
 V = E_a &= \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph} \\
 &= \frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{2}} \cdot 75 \cdot 300 \cdot 1,734 \times 10^{-6} \cdot \frac{9}{1} \\
 &= 1,559 \text{ V}
 \end{aligned}$$

c. Perhitungan Error Persen Tegangan Output

$$\begin{aligned}
 E\% E_a &= \left| \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil ukur}}{\text{Hasil perhitungan}} \right| \times 100\% \\
 &= \left| \frac{1,559 - 1,632}{1,559} \right| \times 100\% \\
 &= 4,66 \%
 \end{aligned}$$

2) Saat Kecepatan Putar Rotor 1000 rpm**a. Perhitungan Frekuensi**

$$\begin{aligned}
 f &= \frac{np}{120} \\
 &= \frac{1000 \cdot 18}{120} \\
 &= 150 \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

b. Perhitungan Tegangan Output

$$\begin{aligned}
 V = E_a &= \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph} \\
 &= \frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{2}} \cdot 150 \cdot 300 \cdot 1,734 \times 10^{-6} \cdot \frac{9}{1} \\
 &= 3,119 \text{ V}
 \end{aligned}$$

c. Perhitungan Error Persen Tegangan Output

$$E\% E_a = \left| \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil ukur}}{\text{Hasil perhitungan}} \right| \times 100\%$$

$$= \left| \frac{3,119 - 3,153}{3,119} \right| \times 100\%$$

$$= 1,10 \%$$

3) Saat Kecepatan Putar Rotor 1500 rpm

a. Perhitungan Frekuensi

$$f = \frac{np}{120}$$

$$= \frac{1500 \cdot 18}{120}$$

$$= 225 \text{ Hz}$$

b. Perhitungan Tegangan Output

$$V = E_a = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph}$$

$$= \frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{2}} \cdot 225 \cdot 300 \cdot 1,734 \times 10^{-6} \cdot \frac{9}{1}$$

$$= 4,678 \text{ V}$$

c. Perhitungan Error Persen Tegangan Output

$$E\% E_a = \left| \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil ukur}}{\text{Hasil perhitungan}} \right| \times 100\%$$

$$= \left| \frac{4,678 - 4,597}{4,678} \right| \times 100\%$$

$$= 1,73 \%$$

4) Saat Kecepatan Putar Rotor 2000 rpm

a. Perhitungan Frekuensi

$$f = \frac{np}{120}$$

$$= \frac{2000 \cdot 18}{120}$$

$$= 300 \text{ Hz}$$

b. Perhitungan Tegangan Output

$$V = E_a = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph}$$

$$= \frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{2}} \cdot 300 \cdot 300 \cdot 1,734 \times 10^{-6} \cdot \frac{9}{1}$$

$$= 6,238 V$$

c. Perhitungan Error Persen Tegangan Output

$$\begin{aligned} E\% E_a &= \left| \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil ukur}}{\text{Hasil perhitungan}} \right| \times 100\% \\ &= \left| \frac{6,238 - 5,973}{6,238} \right| \times 100\% \\ &= 4,24 \% \end{aligned}$$

5) Saat Kecepatan Putar Rotor 2500 rpm

a. Perhitungan Frekuensi

$$\begin{aligned} f &= \frac{np}{120} \\ &= \frac{2500 \cdot 18}{120} \\ &= 375 \text{ Hz} \end{aligned}$$

b. Perhitungan Tegangan Output

$$\begin{aligned} V = E_a &= \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph} \\ &= \frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{2}} \cdot 375 \cdot 300 \cdot 1,734 \times 10^{-6} \cdot \frac{9}{1} \\ &= 7,797 V \end{aligned}$$

c. Perhitungan Error Persen Tegangan Output

$$\begin{aligned} E\% E_a &= \left| \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil ukur}}{\text{Hasil perhitungan}} \right| \times 100\% \\ &= \left| \frac{7,797 - 7,316}{7,797} \right| \times 100\% \\ &= 6,17 \% \end{aligned}$$

6) Saat Kecepatan Putar Rotor 3000 rpm

a. Perhitungan Frekuensi

$$\begin{aligned} f &= \frac{np}{120} \\ &= \frac{3000 \cdot 18}{120} \\ &= 400 \text{ Hz} \end{aligned}$$

b. Perhitungan Tegangan Output

$$\begin{aligned}
 V = E_a &= \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph} \\
 &= \frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{2}} \cdot 400 \cdot 300 \cdot 1,734 \times 10^{-6} \cdot \frac{9}{1} \\
 &= 9,356 \text{ V}
 \end{aligned}$$

c. Perhitungan Error Persen Tegangan Output

$$\begin{aligned}
 E\% E_a &= \left| \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil ukur}}{\text{Hasil perhitungan}} \right| \times 100\% \\
 &= \left| \frac{9,356 - 8,496}{9,356} \right| \times 100\% \\
 &= 9,19 \%
 \end{aligned}$$

B. Pengujian Dengan Beban (3 LED Terhubung Seri)**1) Saat Kecepatan Putar Rotor 500 rpm****a. Perhitungan Impedansi**

$$\begin{aligned}
 X_L &= 2\pi fL \\
 &= 2 \times 3,14 \times 75 \times 0,00882 \\
 &= 4,158 \Omega
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Z &= \sqrt{20,5^2 + 4,158^2} \\
 &= 20,917 \Omega
 \end{aligned}$$

b. Perhitungan Tegangan Output

$$\begin{aligned}
 V &= E_a - I \cdot Z \\
 &= \left(\frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph} \right) - (I \cdot Z) \\
 &= \left(\frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{2}} \cdot 75 \cdot 300 \cdot 1,734 \times 10^{-6} \cdot \frac{9}{1} \right) - (0,001 \times 10^{-3} \times 20,917) \\
 &= 1,559 - 2,092 \times 10^{-5} \\
 &= 1,559 \text{ V}
 \end{aligned}$$

c. Perhitungan Error Persen Tegangan Output

$$E\% V = \left| \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil ukur}}{\text{Hasil perhitungan}} \right| \times 100\%$$

$$= \left| \frac{1,559 - 1,630}{1,559} \right| \times 100\%$$

$$= 4,53 \%$$

d. Perhitungan Daya Output

$$P_o = V \cdot I$$

$$= 1,630 \times 0,001 \times 10^{-3}$$

$$= 1,630 \times 10^{-6} \text{ W}$$

e. Perhitungan Torsi pada Rotor

$$\tau = \frac{P}{2\pi \frac{n}{60}}$$

$$= \frac{1,630 \times 10^{-6}}{2 \times 3,14 \frac{500}{60}}$$

$$= 3,115 \times 10^{-8} \text{ Nm}$$

2) Saat Kecepatan Putar Rotor 1000 rpm

a. Perhitungan Impedansi

$$X_L = 2\pi fL$$

$$= 2 \times 3,14 \times 150 \times 0,00882$$

$$= 8,325 \Omega$$

$$Z = \sqrt{20,5^2 + 8,325^2}$$

$$= 22,126 \Omega$$

b. Perhitungan Tegangan Output

$$V = Ea - I \cdot Z$$

$$= \left(\frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph} \right) - (I \cdot Z)$$

$$= \left(\frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{2}} \cdot 150 \cdot 300 \cdot 1,734 \times 10^{-6} \cdot \frac{9}{1} \right) - (0,001 \times 10^{-3} \times 22,126)$$

$$= 3,119 - 2,213 \times 10^{-5}$$

$$= 3,119 \text{ V}$$

c. Perhitungan Error Persen Tegangan Output

$$E\% V = \left| \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil ukur}}{\text{Hasil perhitungan}} \right| \times 100\%$$

$$= \left| \frac{3,119 - 3,152}{3,119} \right| \times 100\%$$

$$= 1,07 \%$$

d. Perhitungan Daya Output

$$P_o = V.I$$

$$= 3,152 \times 0,001 \times 10^{-3}$$

$$= 3,152 \times 10^{-6} \text{ W}$$

e. Perhitungan Torsi pada Rotor

$$\tau = \frac{P}{2\pi \frac{n}{60}}$$

$$= \frac{3,152 \times 10^{-6}}{2 \times 3,14 \frac{1000}{60}}$$

$$= 3,011 \times 10^{-8} \text{ Nm}$$

3) Saat Kecepatan Putar Rotor 1500 rpm

a. Perhitungan Impedansi

$$X_L = 2\pi fL$$

$$= 2 \times 3,14 \times 225 \times 0,00882$$

$$= 12,474 \Omega$$

$$Z = \sqrt{20,5^2 + 12,474^2}$$

$$= 23,997 \Omega$$

b. Perhitungan Tegangan Output

$$V = Ea - I.Z$$

$$= \left(\frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph} \right) - (I.Z)$$

$$= \left(\frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{2}} \cdot 225 \cdot 300 \cdot 1,734 \times 10^{-6} \cdot \frac{9}{1} \right) - (1,106 \times 10^{-3} \times 23,997)$$

$$= 4,678 - 2,654 \times 10^{-2}$$

$$= 4,652 \text{ V}$$

c. Perhitungan Error Persen Tegangan Output

$$\begin{aligned}
 E\% V &= \left| \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil ukur}}{\text{Hasil perhitungan}} \right| \times 100\% \\
 &= \left| \frac{4,652 - 4,558}{4,652} \right| \times 100\% \\
 &= 2,01 \%
 \end{aligned}$$

d. Perhitungan Daya Output

$$\begin{aligned}
 P_o &= V.I \\
 &= 4,558 \times 1,106 \times 10^{-3} \\
 &= 5,041 \times 10^{-3} W
 \end{aligned}$$

e. Perhitungan Torsi pada Rotor

$$\begin{aligned}
 \tau &= \frac{P}{2\pi \frac{n}{60}} \\
 &= \frac{5,041 \times 10^{-3}}{2 \times 3,14 \frac{1500}{60}} \\
 &= 3,211 \times 10^{-5} Nm
 \end{aligned}$$

4) Saat Kecepatan Putar Rotor 2000 rpm**a. Perhitungan Impedansi**

$$\begin{aligned}
 X_L &= 2\pi fL \\
 &= 2 \times 3,14 \times 300 \times 0,00882 \\
 &= 16,639 \Omega
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Z &= \sqrt{20,5^2 + 16,639^2} \\
 &= 26,403 \Omega
 \end{aligned}$$

b. Perhitungan Tegangan Output

$$\begin{aligned}
 V &= Ea - I.Z \\
 &= \left(\frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph} \right) - (I.Z) \\
 &= \left(\frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{2}} \cdot 300 \cdot 300 \cdot 1,734 \times 10^{-6} \cdot \frac{9}{1} \right) - (5,388 \times 10^{-3} \times 26,403) \\
 &= 6,238 - 1,423 \times 10^{-1} \\
 &= 6,095 V
 \end{aligned}$$

c. Perhitungan Error Persen Tegangan Output

$$\begin{aligned}
 E\% V &= \left| \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil ukur}}{\text{Hasil perhitungan}} \right| \times 100\% \\
 &= \left| \frac{6,095 - 5,795}{6,095} \right| \times 100\% \\
 &= 4,93 \%
 \end{aligned}$$

d. Perhitungan Daya Output

$$\begin{aligned}
 P_o &= V \cdot I \\
 &= 5,795 \times 5,388 \times 10^{-3} \\
 &= 3,122 \times 10^{-2} \text{ W}
 \end{aligned}$$

e. Perhitungan Torsi pada Rotor

$$\begin{aligned}
 \tau &= \frac{P}{2\pi \frac{n}{60}} \\
 &= \frac{3,122 \times 10^{-2}}{2 \times 3,14 \frac{2000}{60}} \\
 &= 1,492 \times 10^{-4} \text{ Nm}
 \end{aligned}$$

5) Saat Kecepatan Putar Rotor 2500 rpm**a. Perhitungan Impedansi**

$$\begin{aligned}
 X_L &= 2\pi fL \\
 &= 2 \times 3,14 \times 375 \times 0,00882 \\
 &= 20,788 \Omega
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Z &= \sqrt{20,5^2 + 20,788^2} \\
 &= 29,196 \Omega
 \end{aligned}$$

b. Perhitungan Tegangan Output

$$\begin{aligned}
 V &= Ea - I \cdot Z \\
 &= \left(\frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph} \right) - (I \cdot Z) \\
 &= \left(\frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{2}} \cdot 375 \cdot 300 \cdot 1,734 \times 10^{-6} \cdot \frac{9}{1} \right) - (10,232 \times 10^{-3} \times 29,196) \\
 &= 7,797 - 2,987 \times 10^{-1}
 \end{aligned}$$

$$= 7,498 \text{ V}$$

c. Perhitungan Error Persen Tegangan Output

$$\begin{aligned} E\% V &= \left| \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil ukur}}{\text{Hasil perhitungan}} \right| \times 100\% \\ &= \left| \frac{7,498 - 6,843}{7,498} \right| \times 100\% \\ &= 8,74 \% \end{aligned}$$

d. Perhitungan Daya Output

$$\begin{aligned} P_o &= V \cdot I \\ &= 6,843 \times 10,232 \times 10^{-3} \\ &= 7,002 \times 10^{-2} \text{ W} \end{aligned}$$

e. Perhitungan Torsi pada Rotor

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{P}{2\pi \frac{n}{60}} \\ &= \frac{7,002 \times 10^{-2}}{2 \times 3,14 \frac{2500}{60}} \\ &= 2,676 \times 10^{-4} \text{ Nm} \end{aligned}$$

6) Saat Kecepatan Putar Rotor 3000 rpm

a. Perhitungan Impedansi

$$\begin{aligned} X_L &= 2\pi fL \\ &= 2 \times 3,14 \times 400 \times 0,00882 \\ &= 24,947 \Omega \\ Z &= \sqrt{20,5^2 + 24,947^2} \\ &= 32,290 \Omega \end{aligned}$$

b. Perhitungan Tegangan Output

$$\begin{aligned} V &= Ea - I \cdot Z \\ &= \left(\frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph} \right) - (I \cdot Z) \\ &= \left(\frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{2}} \cdot 400 \cdot 300 \cdot 1,734 \times 10^{-6} \cdot \frac{9}{1} \right) - (14,961 \times 10^{-3} \times 32,290) \end{aligned}$$

$$= 9,356 - 4,831 \times 10^{-1}$$

$$= 8,873 \text{ V}$$

c. Perhitungan Error Persen Tegangan Output

$$E\% V = \left| \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil ukur}}{\text{Hasil perhitungan}} \right| \times 100\%$$

$$= \left| \frac{8,873 - 7,468}{8,873} \right| \times 100\%$$

$$= 15,84 \%$$

d. Perhitungan Daya Output

$$P_o = V.I$$

$$= 7,468 \times 14,961 \times 10^{-3}$$

$$= 1,117 \times 10^{-1} \text{ W}$$

e. Perhitungan Torsi pada Rotor

$$\tau = \frac{P}{2\pi \frac{n}{60}}$$

$$= \frac{1,117 \times 10^{-1}}{2 \times 3,14 \frac{3000}{60}}$$

$$= 3,558 \times 10^{-4} \text{ Nm}$$

2. Perhitungan Data Hasil Pengujian pada Celah Udara 9mm

Perhitungan kerapatan fluks magnet

$$B_{max} = B_r \frac{lm}{lm + \delta}$$

$$= 0,002 \frac{0,003}{0,003 + 0,009}$$

$$= 0,0005 \text{ T}$$

$$= 5 \times 10^{-4} \text{ T}$$

Perhitungan luasan medan magnet

$$A_{magnet} = \pi r_{magnet}^2$$

$$= 3,14 \times 0,0075^2$$

$$= 0,0001766 \text{ m}^2$$

$$= 1,766 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Perhitungan fluks maksimum magnet

$$\Phi_{max} = A_{magn} B_{max}$$

$$= 1,766 \times 10^{-4} \times 5 \times 10^{-4}$$

$$= 8,831 \times 10^{-8} \text{ Wb}$$

$$\Phi_{max} \text{ per rotor} = \Phi_{max} \times Nm \text{ per rotor}$$

$$= 8,831 \times 10^{-8} \times 9$$

$$= 7,948 \times 10^{-7} \text{ Wb}$$

$$\Phi_{max} \text{ 2 rotor} = \Phi_{max} \text{ per rotor} \times 2$$

$$= 7,948 \times 10^{-7} \times 2$$

$$= 1,590 \times 10^{-6} \text{ Wb}$$

A. Pengujian Tanpa Beban pada Celah Udara 9mm

1) Saat Kecepatan Putar Rotor 500 rpm

a. Perhitungan Frekuensi

$$f = \frac{np}{120}$$

$$= \frac{500 \cdot 18}{120}$$

$$= 75 \text{ Hz}$$

b. Perhitungan Tegangan Output

$$V = E_a = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph}$$

$$= \frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{2}} \cdot 75 \cdot 300 \cdot 1,590 \times 10^{-6} \cdot \frac{9}{1}$$

$$= 1,429 \text{ V}$$

c. Perhitungan Error Persen Tegangan Output

$$E\% E_a = \left| \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil ukur}}{\text{Hasil perhitungan}} \right| \times 100\%$$

$$= \left| \frac{1,429 - 1,500}{1,429} \right| \times 100\%$$

$$= 4,94 \%$$

2) Saat Kecepatan Putar Rotor 1000 rpm

a. Perhitungan Frekuensi

$$\begin{aligned} f &= \frac{np}{120} \\ &= \frac{1000 \cdot 18}{120} \\ &= 150 \text{ Hz} \end{aligned}$$

b. Perhitungan Tegangan Output

$$\begin{aligned} V = E_a &= \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph} \\ &= \frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{2}} \cdot 150 \cdot 300 \cdot 1,590 \times 10^{-6} \cdot \frac{9}{1} \\ &= 2,859 \text{ V} \end{aligned}$$

c. Perhitungan Error Persen Tegangan Output

$$\begin{aligned} E\% E_a &= \left| \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil ukur}}{\text{Hasil perhitungan}} \right| \times 100\% \\ &= \left| \frac{2,859 - 2,706}{2,859} \right| \times 100\% \\ &= 5,35 \% \end{aligned}$$

3) Saat Kecepatan Putar Rotor 1500 rpm

a. Perhitungan Frekuensi

$$\begin{aligned} f &= \frac{np}{120} \\ &= \frac{1500 \cdot 18}{120} \\ &= 225 \text{ Hz} \end{aligned}$$

b. Perhitungan Tegangan Output

$$\begin{aligned} V = E_a &= \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph} \\ &= \frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{2}} \cdot 225 \cdot 300 \cdot 1,590 \times 10^{-6} \cdot \frac{9}{1} \end{aligned}$$

$$= 4,288 \text{ V}$$

c. Perhitungan Error Persen Tegangan Output

$$\begin{aligned} E\% E_a &= \left| \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil ukur}}{\text{Hasil perhitungan}} \right| \times 100\% \\ &= \left| \frac{4,288 - 3,937}{4,288} \right| \times 100\% \\ &= 8,19\% \end{aligned}$$

4) Saat Kecepatan Putar Rotor 2000 rpm

a. Perhitungan Frekuensi

$$\begin{aligned} f &= \frac{np}{120} \\ &= \frac{2000 \cdot 18}{120} \\ &= 300 \text{ Hz} \end{aligned}$$

b. Perhitungan Tegangan Output

$$\begin{aligned} V = E_a &= \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph} \\ &= \frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{2}} \cdot 300 \cdot 300 \cdot 1,590 \times 10^{-6} \cdot \frac{9}{1} \\ &= 5,718 \text{ V} \end{aligned}$$

c. Perhitungan Error Persen Tegangan Output

$$\begin{aligned} E\% E_a &= \left| \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil ukur}}{\text{Hasil perhitungan}} \right| \times 100\% \\ &= \left| \frac{5,718 - 5,228}{5,718} \right| \times 100\% \\ &= 8,57\% \end{aligned}$$

5) Saat Kecepatan Putar Rotor 2500 rpm

a. Perhitungan Frekuensi

$$\begin{aligned} f &= \frac{np}{120} \\ &= \frac{2500 \cdot 18}{120} \\ &= 375 \text{ Hz} \end{aligned}$$

b. Perhitungan Tegangan Output

$$\begin{aligned}
 V = E_a &= \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph} \\
 &= \frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{2}} \cdot 375 \cdot 300 \cdot 1,590 \times 10^{-6} \cdot \frac{9}{1} \\
 &= 7,147 \text{ V}
 \end{aligned}$$

c. Perhitungan Error Persen Tegangan Output

$$\begin{aligned}
 E\% E_a &= \left| \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil ukur}}{\text{Hasil perhitungan}} \right| \times 100\% \\
 &= \left| \frac{7,147 - 6,480}{7,147} \right| \times 100\% \\
 &= 9,33 \%
 \end{aligned}$$

6) Saat Kecepatan Putar Rotor 3000 rpm**a. Perhitungan Frekuensi**

$$\begin{aligned}
 f &= \frac{np}{120} \\
 &= \frac{3000 \cdot 18}{120} \\
 &= 400 \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

b. Perhitungan Tegangan Output

$$\begin{aligned}
 V = E_a &= \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph} \\
 &= \frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{2}} \cdot 400 \cdot 300 \cdot 1,590 \times 10^{-6} \cdot \frac{9}{1} \\
 &= 8,577 \text{ V}
 \end{aligned}$$

c. Perhitungan Error Persen Tegangan Output

$$\begin{aligned}
 E\% E_a &= \left| \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil ukur}}{\text{Hasil perhitungan}} \right| \times 100\% \\
 &= \left| \frac{8,577 - 7,669}{8,577} \right| \times 100\% \\
 &= 10,58 \%
 \end{aligned}$$

B. Pengujian Dengan Beban (3 LED Terhubung Seri)**1) Saat Kecepatan Putar Rotor 500 rpm****a. Perhitungan Impedansi**

$$\begin{aligned} X_L &= 2\pi fL \\ &= 2 \times 3,14 \times 75 \times 0,00882 \\ &= 4,158 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{20,5^2 + 4,158^2} \\ &= 20,917 \Omega \end{aligned}$$

b. Perhitungan Tegangan Output

$$\begin{aligned} V &= Ea - I \cdot Z \\ &= \left(\frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph} \right) - (I \cdot Z) \\ &= \left(\frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{2}} \cdot 75 \cdot 300 \cdot 1,590 \times 10^{-6} \cdot \frac{9}{1} \right) - (0,001 \times 10^{-3} \times 20,917) \\ &= 1,429 - 2,092 \times 10^{-5} \\ &= 1,429 V \end{aligned}$$

c. Perhitungan Error Persen Tegangan Output

$$\begin{aligned} E\% V &= \left| \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil ukur}}{\text{Hasil perhitungan}} \right| \times 100\% \\ &= \left| \frac{1,429 - 1,499}{1,429} \right| \times 100\% \\ &= 4,87 \% \end{aligned}$$

d. Perhitungan Daya Output

$$\begin{aligned} P_o &= V \cdot I \\ &= 1,499 \times 0,001 \times 10^{-3} \\ &= 1,499 \times 10^{-6} W \end{aligned}$$

e. Perhitungan Torsi pada Rotor

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{P}{2\pi \frac{n}{60}} \\ &= \frac{1,499 \times 10^{-6}}{2 \times 3,14 \frac{500}{60}} \\ &= 2,864 \times 10^{-8} Nm \end{aligned}$$

2) **Saat Kecepatan Putar Rotor 1000 rpm**

a. **Perhitungan Impedansi**

$$\begin{aligned} X_L &= 2\pi fL \\ &= 2 \times 3,14 \times 150 \times 0,00882 \\ &= 8,325 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{20,5^2 + 8,325^2} \\ &= 22,126 \Omega \end{aligned}$$

b. **Perhitungan Tegangan Output**

$$\begin{aligned} V &= Ea - I.Z \\ &= \left(\frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph} \right) - (I.Z) \\ &= \left(\frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{2}} \cdot 150 \cdot 300 \cdot 1,590 \times 10^{-6} \cdot \frac{9}{1} \right) - (0,001 \times 10^{-3} \times 22,126) \\ &= 2,859 - 2,213 \times 10^{-5} \\ &= 2,859 V \end{aligned}$$

c. **Perhitungan Error Persen Tegangan Output**

$$\begin{aligned} E\% V &= \left| \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil ukur}}{\text{Hasil perhitungan}} \right| \times 100\% \\ &= \left| \frac{2,859 - 2,706}{2,859} \right| \times 100\% \\ &= 4,87 \% \end{aligned}$$

d. **Perhitungan Daya Output**

$$\begin{aligned} P_o &= V.I \\ &= 2,706 \times 0,001 \times 10^{-3} \\ &= 2,706 \times 10^{-6} W \end{aligned}$$

e. **Perhitungan Torsi pada Rotor**

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{P}{2\pi \frac{n}{60}} \\ &= \frac{2,706 \times 10^{-6}}{2 \times 3,14 \frac{1000}{60}} \\ &= 2,585 \times 10^{-8} Nm \end{aligned}$$

3) Saat Kecepatan Putar Rotor 1500 rpm**a. Perhitungan Impedansi**

$$\begin{aligned} X_L &= 2\pi fL \\ &= 2 \times 3,14 \times 225 \times 0,00882 \\ &= 12,474 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{20,5^2 + 12,474^2} \\ &= 23,997 \Omega \end{aligned}$$

b. Perhitungan Tegangan Output

$$\begin{aligned} V &= Ea - I.Z \\ &= \left(\frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph} \right) - (I.Z) \\ &= \left(\frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{2}} \cdot 225 \cdot 300 \cdot 1,590 \times 10^{-6} \cdot \frac{9}{1} \right) - (0,024 \times 10^{-3} \times 23,997) \\ &= 4,288 - 5,759 \times 10^{-4} \\ &= 4,288 V \end{aligned}$$

c. Perhitungan Error Persen Tegangan Output

$$\begin{aligned} E\% V &= \left| \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil ukur}}{\text{Hasil perhitungan}} \right| \times 100\% \\ &= \left| \frac{4,288 - 3,931}{4,288} \right| \times 100\% \\ &= 8,32 \% \end{aligned}$$

d. Perhitungan Daya Output

$$\begin{aligned} P_o &= V.I \\ &= 3,931 \times 0,024 \times 10^{-3} \\ &= 9,434 \times 10^{-5} W \end{aligned}$$

e. Perhitungan Torsi pada Rotor

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{P}{2\pi \frac{n}{60}} \\ &= \frac{9,434 \times 10^{-5}}{2 \times 3,14 \frac{1500}{60}} \\ &= 6,009 \times 10^{-7} Nm \end{aligned}$$

4) Saat Kecepatan Putar Rotor 2000 rpm**a. Perhitungan Impedansi**

$$\begin{aligned} X_L &= 2\pi fL \\ &= 2 \times 3,14 \times 300 \times 0,00882 \\ &= 16,639 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{20,5^2 + 16,639^2} \\ &= 26,403 \Omega \end{aligned}$$

b. Perhitungan Tegangan Output

$$\begin{aligned} V &= Ea - I.Z \\ &= \left(\frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph} \right) - (I.Z) \\ &= \left(\frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{2}} \cdot 300 \cdot 300 \cdot 1,590 \times 10^{-6} \cdot \frac{9}{1} \right) - (1,384 \times 10^{-3} \times 26,403) \\ &= 5,718 - 3,654 \times 10^{-2} \\ &= 5,681 V \end{aligned}$$

c. Perhitungan Error Persen Tegangan Output

$$\begin{aligned} E\% V &= \left| \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil ukur}}{\text{Hasil perhitungan}} \right| \times 100\% \\ &= \left| \frac{5,681 - 5,182}{5,681} \right| \times 100\% \\ &= 8,79 \% \end{aligned}$$

d. Perhitungan Daya Output

$$\begin{aligned} P_o &= V.I \\ &= 5,182 \times 1,384 \times 10^{-3} \\ &= 7,172 \times 10^{-3} W \end{aligned}$$

e. Perhitungan Torsi pada Rotor

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{P}{2\pi \frac{n}{60}} \\ &= \frac{7,172 \times 10^{-3}}{2 \times 3,14 \frac{2000}{60}} \\ &= 3,426 \times 10^{-5} Nm \end{aligned}$$

5) Saat Kecepatan Putar Rotor 2500 rpm**a. Perhitungan Impedansi**

$$\begin{aligned} X_L &= 2\pi fL \\ &= 2 \times 3,14 \times 375 \times 0,00882 \\ &= 20,788 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{20,5^2 + 20,788^2} \\ &= 29,196 \Omega \end{aligned}$$

b. Perhitungan Tegangan Output

$$\begin{aligned} V &= Ea - I.Z \\ &= \left(\frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph} \right) - (I.Z) \\ &= \left(\frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{2}} \cdot 375 \cdot 300 \cdot 1,590 \times 10^{-6} \cdot \frac{9}{1} \right) - (3,907 \times 10^{-3} \times 29,196) \\ &= 7,147 - 1,141 \times 10^{-1} \\ &= 7,033 V \end{aligned}$$

c. Perhitungan Error Persen Tegangan Output

$$\begin{aligned} E\% V &= \left| \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil ukur}}{\text{Hasil perhitungan}} \right| \times 100\% \\ &= \left| \frac{7,033 - 6,323}{7,033} \right| \times 100\% \\ &= 10,10 \% \end{aligned}$$

d. Perhitungan Daya Output

$$\begin{aligned} P_o &= V.I \\ &= 6,323 \times 3,907 \times 10^{-3} \\ &= 2,470 \times 10^{-2} W \end{aligned}$$

e. Perhitungan Torsi pada Rotor

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{P}{2\pi \frac{n}{60}} \\ &= \frac{2,470 \times 10^{-2}}{2 \times 3,14 \frac{2500}{60}} \\ &= 9,441 \times 10^{-5} Nm \end{aligned}$$

6) Saat Kecepatan Putar Rotor 3000 rpm**a. Perhitungan Impedansi**

$$\begin{aligned} X_L &= 2\pi fL \\ &= 2 \times 3,14 \times 400 \times 0,00882 \\ &= 24,947 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{20,5^2 + 24,947^2} \\ &= 32,290 \Omega \end{aligned}$$

b. Perhitungan Tegangan Output

$$\begin{aligned} V &= Ea - I \cdot Z \\ &= \left(\frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph} \right) - (I \cdot Z) \\ &= \left(\frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{2}} \cdot 400 \cdot 300 \cdot 1,590 \times 10^{-6} \cdot \frac{9}{1} \right) - (7,444 \times 10^{-3} \times 32,290) \\ &= 8,577 - 2,404 \times 10^{-1} \\ &= 8,336 V \end{aligned}$$

c. Perhitungan Error Persen Tegangan Output

$$\begin{aligned} E\% V &= \left| \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil ukur}}{\text{Hasil perhitungan}} \right| \times 100\% \\ &= \left| \frac{8,336 - 7,279}{8,336} \right| \times 100\% \\ &= 12,68 \% \end{aligned}$$

d. Perhitungan Daya Output

$$\begin{aligned} P_o &= V \cdot I \\ &= 7,279 \times 7,444 \times 10^{-3} \\ &= 5,418 \times 10^{-2} W \end{aligned}$$

e. Perhitungan Torsi pada Rotor

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{P}{2\pi \frac{n}{60}} \\ &= \frac{5,418 \times 10^{-2}}{2 \times 3,14 \frac{3000}{60}} \\ &= 1,726 \times 10^{-4} Nm \end{aligned}$$

3. Perhitungan Data Hasil Pengujian pada Celah Udara 10 mm

Perhitungan kerapatan fluks magnet

$$\begin{aligned} B_{max} &= B_r \frac{lm}{lm + \delta} \\ &= 0,002 \frac{0,003}{0,003 + 0,01} \\ &= 0,000462 \text{ T} \\ &= 4,620 \times 10^{-4} \text{ T} \end{aligned}$$

Perhitungan luasan medan magnet

$$\begin{aligned} A_{magnet} &= \pi r_{magnet}^2 \\ &= 3,14 \times 0,0075^2 \\ &= 0,0001766 \text{ m}^2 \\ &= 1,766 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Perhitungan fluks maksimum magnet

$$\begin{aligned} \Phi_{max} &= A_{magn} B_{max} \\ &= 1,766 \times 10^{-4} \times 4,62 \times 10^{-4} \\ &= 8,151 \times 10^{-8} \text{ Wb} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{max} \text{ per rotor} &= \Phi_{max} \times Nm \text{ per rotor} \\ &= 8,151 \times 10^{-8} \times 9 \\ &= 7,337 \times 10^{-7} \text{ Wb} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{max} \text{ 2 rotor} &= \Phi_{max} \text{ per rotor} \times 2 \\ &= 7,337 \times 10^{-7} \times 2 \\ &= 1,467 \times 10^{-6} \text{ Wb} \end{aligned}$$

A. Pengujian Tanpa Beban pada Celah Udara 10 mm

1) Saat Kecepatan Putar Rotor 500 rpm

a. Perhitungan Frekuensi

$$\begin{aligned} f &= \frac{np}{120} \\ &= \frac{500 \cdot 18}{120} \\ &= 75 \text{ Hz} \end{aligned}$$

b. Perhitungan Tegangan Output

$$\begin{aligned}
 V = E_a &= \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph} \\
 &= \frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{2}} \cdot 75 \cdot 300 \cdot 1,467 \times 10^{-6} \cdot \frac{9}{1} \\
 &= 1,319 \text{ V}
 \end{aligned}$$

c. Perhitungan Error Persen Tegangan Output

$$\begin{aligned}
 E\% E_a &= \left| \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil ukur}}{\text{Hasil perhitungan}} \right| \times 100\% \\
 &= \left| \frac{1,319 - 1,341}{1,319} \right| \times 100\% \\
 &= 1,63 \%
 \end{aligned}$$

2) Saat Kecepatan Putar Rotor 1000 rpm**a. Perhitungan Frekuensi**

$$\begin{aligned}
 f &= \frac{np}{120} \\
 &= \frac{1000 \cdot 18}{120} \\
 &= 150 \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

b. Perhitungan Tegangan Output

$$\begin{aligned}
 V = E_a &= \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph} \\
 &= \frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{2}} \cdot 150 \cdot 300 \cdot 1,467 \times 10^{-6} \cdot \frac{9}{1} \\
 &= 2,639 \text{ V}
 \end{aligned}$$

c. Perhitungan Error Persen Tegangan Output

$$\begin{aligned}
 E\% E_a &= \left| \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil ukur}}{\text{Hasil perhitungan}} \right| \times 100\% \\
 &= \left| \frac{2,639 - 2,457}{2,639} \right| \times 100\% \\
 &= 6,90 \%
 \end{aligned}$$

3) Saat Kecepatan Putar Rotor 1500 rpm**a. Perhitungan Frekuensi**

$$\begin{aligned}
 f &= \frac{np}{120} \\
 &= \frac{1500 \cdot 18}{120} \\
 &= 225 \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

b. Perhitungan Tegangan Output

$$\begin{aligned}
 V = E_a &= \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph} \\
 &= \frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{2}} \cdot 225 \cdot 300 \cdot 1,467 \times 10^{-6} \cdot \frac{9}{1} \\
 &= 3,958 \text{ V}
 \end{aligned}$$

c. Perhitungan Error Persen Tegangan Output

$$\begin{aligned}
 E\% E_a &= \left| \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil ukur}}{\text{Hasil perhitungan}} \right| \times 100\% \\
 &= \left| \frac{3,958 - 3,555}{3,958} \right| \times 100\% \\
 &= 10,19 \%
 \end{aligned}$$

4) Saat Kecepatan Putar Rotor 2000 rpm

a. Perhitungan Frekuensi

$$\begin{aligned}
 f &= \frac{np}{120} \\
 &= \frac{2000 \cdot 18}{120} \\
 &= 300 \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

b. Perhitungan Tegangan Output

$$\begin{aligned}
 V = E_a &= \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph} \\
 &= \frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{2}} \cdot 300 \cdot 300 \cdot 1,467 \times 10^{-6} \cdot \frac{9}{1} \\
 &= 5,278 \text{ V}
 \end{aligned}$$

c. Perhitungan Error Persen Tegangan Output

$$E\% E_a = \left| \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil ukur}}{\text{Hasil perhitungan}} \right| \times 100\%$$

$$= \left| \frac{5,278 - 4,726}{5,278} \right| \times 100\%$$

$$= 10,46 \%$$

5) Saat Kecepatan Putar Rotor 2500 rpm

a. Perhitungan Frekuensi

$$f = \frac{np}{120}$$

$$= \frac{2500 \cdot 18}{120}$$

$$= 375 \text{ Hz}$$

b. Perhitungan Tegangan Output

$$V = E_a = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph}$$

$$= \frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{2}} \cdot 375 \cdot 300 \cdot 1,467 \times 10^{-6} \cdot \frac{9}{1}$$

$$= 6,597 \text{ V}$$

c. Perhitungan Error Persen Tegangan Output

$$E\% E_a = \left| \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil ukur}}{\text{Hasil perhitungan}} \right| \times 100\%$$

$$= \left| \frac{6,597 - 5,843}{6,597} \right| \times 100\%$$

$$= 11,43 \%$$

6) Saat Kecepatan Putar Rotor 3000 rpm

a. Perhitungan Frekuensi

$$f = \frac{np}{120}$$

$$= \frac{3000 \cdot 18}{120}$$

$$= 400 \text{ Hz}$$

b. Perhitungan Tegangan Output

$$V = E_a = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph}$$

$$= \frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{2}} \cdot 400 \cdot 300 \cdot 1,467 \times 10^{-6} \cdot \frac{9}{1}$$

$$= 7,917 V$$

c. Perhitungan Error Persen Tegangan Output

$$\begin{aligned} E\% E_a &= \left| \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil ukur}}{\text{Hasil perhitungan}} \right| \times 100\% \\ &= \left| \frac{7,917 - 6,976}{7,917} \right| \times 100\% \\ &= 11,88 \% \end{aligned}$$

B. Pengujian Dengan Beban (3 LED Terhubung Seri)

1) Saat Kecepatan Putar Rotor 500 rpm

a. Perhitungan Impedansi

$$\begin{aligned} X_L &= 2\pi fL \\ &= 2 \times 3,14 \times 75 \times 0,00882 \\ &= 4,158 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{20,5^2 + 4,158^2} \\ &= 20,917 \Omega \end{aligned}$$

b. Perhitungan Tegangan Output

$$\begin{aligned} V &= E_a - I \cdot Z \\ &= \left(\frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph} \right) - (I \cdot Z) \\ &= \left(\frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{2}} \cdot 75 \cdot 300 \cdot 1,467 \times 10^{-6} \cdot \frac{9}{1} \right) - (0,001 \times 10^{-3} \times 20,917) \\ &= 1,319 - 2,092 \times 10^{-5} \\ &= 1,319 V \end{aligned}$$

c. Perhitungan Error Persen Tegangan Output

$$\begin{aligned} E\% V &= \left| \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil ukur}}{\text{Hasil perhitungan}} \right| \times 100\% \\ &= \left| \frac{1,319 - 1,340}{1,319} \right| \times 100\% \\ &= 1,56 \% \end{aligned}$$

d. Perhitungan Daya Output

$$\begin{aligned} P_o &= V \cdot I \\ &= 1,340 \times 0,001 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

$$= 1,340 \times 10^{-6} W$$

e. Perhitungan Torsi pada Rotor

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{P}{2\pi \frac{n}{60}} \\ &= \frac{1,340 \times 10^{-6}}{2 \times 3,14 \frac{500}{60}} \\ &= 2,561 \times 10^{-8} Nm\end{aligned}$$

2) Saat Kecepatan Putar Rotor 1000 rpm

a. Perhitungan Impedansi

$$\begin{aligned}X_L &= 2\pi fL \\ &= 2 \times 3,14 \times 150 \times 0,00882 \\ &= 8,325 \Omega\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Z &= \sqrt{20,5^2 + 8,325^2} \\ &= 22,126 \Omega\end{aligned}$$

b. Perhitungan Tegangan Output

$$\begin{aligned}V &= Ea - I.Z \\ &= \left(\frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph} \right) - (I.Z) \\ &= \left(\frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{2}} \cdot 150 \cdot 300 \cdot 1,467 \times 10^{-6} \cdot \frac{9}{1} \right) - (0,001 \times 10^{-3} \times 22,126) \\ &= 2,639 - 2,213 \times 10^{-5} \\ &= 2,639 V\end{aligned}$$

c. Perhitungan Error Persen Tegangan Output

$$\begin{aligned}E\% V &= \left| \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil ukur}}{\text{Hasil perhitungan}} \right| \times 100\% \\ &= \left| \frac{2,639 - 2,454}{2,639} \right| \times 100\% \\ &= 7,01 \%\end{aligned}$$

d. Perhitungan Daya Output

$$\begin{aligned}P_o &= V.I \\ &= 2,454 \times 0,001 \times 10^{-3}\end{aligned}$$

$$= 2,454 \times 10^{-6} \text{ W}$$

e. Perhitungan Torsi pada Rotor

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{P}{2\pi \frac{n}{60}} \\ &= \frac{2,454 \times 10^{-6}}{2 \times 3,14 \frac{1000}{60}} \\ &= 2,345 \times 10^{-8} \text{ Nm} \end{aligned}$$

3) Saat Kecepatan Putar Rotor 1500 rpm

a. Perhitungan Impedansi

$$\begin{aligned} X_L &= 2\pi fL \\ &= 2 \times 3,14 \times 225 \times 0,00882 \\ &= 12,474 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{20,5^2 + 12,474^2} \\ &= 23,997 \Omega \end{aligned}$$

b. Perhitungan Tegangan Output

$$\begin{aligned} V &= Ea - I \cdot Z \\ &= \left(\frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph} \right) - (I \cdot Z) \\ &= \left(\frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{2}} \cdot 225 \cdot 300 \cdot 1,467 \times 10^{-6} \cdot \frac{9}{1} \right) - (0,001 \times 10^{-3} \times 23,997) \\ &= 3,958 - 2,400 \times 10^{-5} \\ &= 3,958 \text{ V} \end{aligned}$$

c. Perhitungan Error Persen Tegangan Output

$$\begin{aligned} E\% V &= \left| \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil ukur}}{\text{Hasil perhitungan}} \right| \times 100\% \\ &= \left| \frac{3,958 - 3,554}{3,958} \right| \times 100\% \\ &= 10,22 \% \end{aligned}$$

d. Perhitungan Daya Output

$$\begin{aligned} P_o &= V \cdot I \\ &= 3,554 \times 0,001 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

$$= 3,554 \times 10^{-6} W$$

e. Perhitungan Torsi pada Rotor

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{P}{2\pi \frac{n}{60}} \\ &= \frac{3,554 \times 10^{-6}}{2 \times 3,14 \frac{1500}{60}} \\ &= 2,264 \times 10^{-8} Nm \end{aligned}$$

4) Saat Kecepatan Putar Rotor 2000 rpm

a. Perhitungan Impedansi

$$\begin{aligned} X_L &= 2\pi fL \\ &= 2 \times 3,14 \times 300 \times 0,00882 \\ &= 16,639 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{20,5^2 + 16,639^2} \\ &= 26,403 \Omega \end{aligned}$$

b. Perhitungan Tegangan Output

$$\begin{aligned} V &= Ea - I \cdot Z \\ &= \left(\frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph} \right) - (I \cdot Z) \\ &= \left(\frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{2}} \cdot 300 \cdot 300 \cdot 1,467 \times 10^{-6} \cdot \frac{9}{1} \right) - (0,003 \times 10^{-3} \times 26,403) \\ &= 5,278 - 7,921 \times 10^{-5} \\ &= 5,278 V \end{aligned}$$

c. Perhitungan Error Persen Tegangan Output

$$\begin{aligned} E\% V &= \left| \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil ukur}}{\text{Hasil perhitungan}} \right| \times 100\% \\ &= \left| \frac{5,278 - 4,724}{5,278} \right| \times 100\% \\ &= 10,49 \% \end{aligned}$$

d. Perhitungan Daya Output

$$\begin{aligned} P_o &= V \cdot I \\ &= 4,724 \times 0,003 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

$$= 1,417 \times 10^{-5} \text{ W}$$

e. Perhitungan Torsi pada Rotor

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{P}{2\pi \frac{n}{60}} \\ &= \frac{1,417 \times 10^{-5}}{2 \times 3,14 \frac{2000}{60}} \\ &= 6,770 \times 10^{-8} \text{ Nm} \end{aligned}$$

5) Saat Kecepatan Putar Rotor 2500 rpm

a. Perhitungan Impedansi

$$\begin{aligned} X_L &= 2\pi fL \\ &= 2 \times 3,14 \times 375 \times 0,00882 \\ &= 20,788 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{20,5^2 + 20,788^2} \\ &= 29,196 \Omega \end{aligned}$$

b. Perhitungan Tegangan Output

$$\begin{aligned} V &= Ea - I \cdot Z \\ &= \left(\frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph} \right) - (I \cdot Z) \\ &= \left(\frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{2}} \cdot 375 \cdot 300 \cdot 1,467 \times 10^{-6} \cdot \frac{9}{1} \right) - (0,233 \times 10^{-3} \times 29,196) \\ &= 6,597 - 6,803 \times 10^{-3} \\ &= 6,591 \text{ V} \end{aligned}$$

c. Perhitungan Error Persen Tegangan Output

$$\begin{aligned} E\% V &= \left| \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil ukur}}{\text{Hasil perhitungan}} \right| \times 100\% \\ &= \left| \frac{6,591 - 5,740}{6,591} \right| \times 100\% \\ &= 12,91 \% \end{aligned}$$

d. Perhitungan Daya Output

$$\begin{aligned} P_o &= V \cdot I \\ &= 5,740 \times 0,233 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

$$= 1,377 \times 10^{-3} \text{ W}$$

e. Perhitungan Torsi pada Rotor

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{P}{2\pi \frac{n}{60}} \\ &= \frac{1,377 \times 10^{-3}}{2 \times 3,14 \frac{2500}{60}} \\ &= 5,111 \times 10^{-6} \text{ Nm} \end{aligned}$$

6) Saat Kecepatan Putar Rotor 3000 rpm

a. Perhitungan Impedansi

$$\begin{aligned} X_L &= 2\pi fL \\ &= 2 \times 3,14 \times 400 \times 0,00882 \\ &= 24,947 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{20,5^2 + 24,947^2} \\ &= 32,290 \Omega \end{aligned}$$

b. Perhitungan Tegangan Output

$$\begin{aligned} V &= Ea - I \cdot Z \\ &= \left(\frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \frac{Ns}{Nph} \right) - (I \cdot Z) \\ &= \left(\frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{2}} \cdot 400 \cdot 300 \cdot 1,467 \times 10^{-6} \cdot \frac{9}{1} \right) - (1,298 \times 10^{-3} \times 32,290) \\ &= 7,917 - 4,191 \times 10^{-2} \\ &= 7,875 \text{ V} \end{aligned}$$

c. Perhitungan Error Persen Tegangan Output

$$\begin{aligned} E\% V &= \left| \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil ukur}}{\text{Hasil perhitungan}} \right| \times 100\% \\ &= \left| \frac{7,875 - 6,826}{7,875} \right| \times 100\% \\ &= 13,32 \% \end{aligned}$$

d. Perhitungan Daya Output

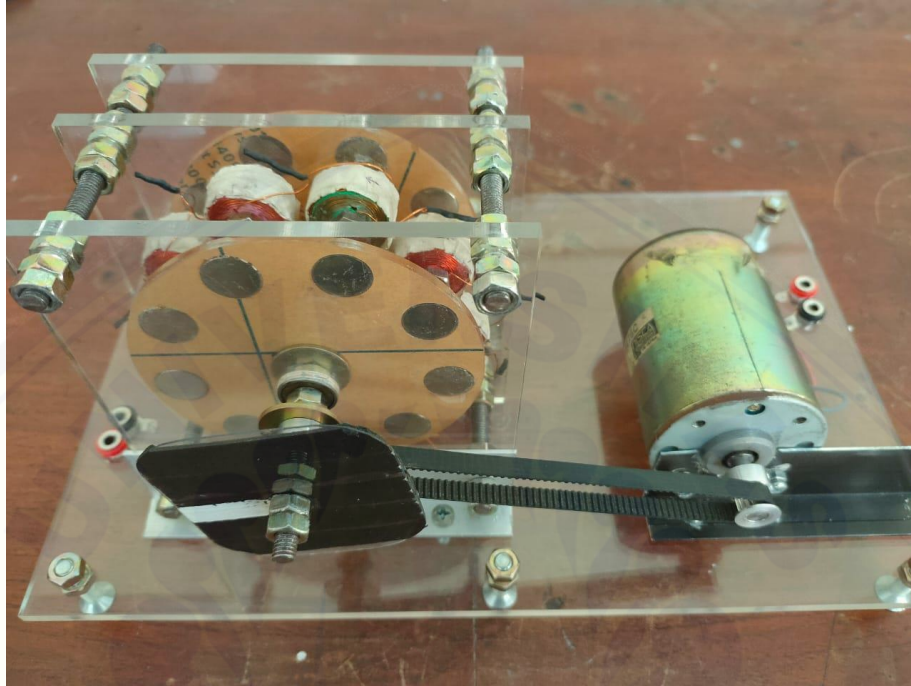
$$\begin{aligned} P_o &= V \cdot I \\ &= 6,826 \times 1,298 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

$$= 8,860 \times 10^{-3} W$$

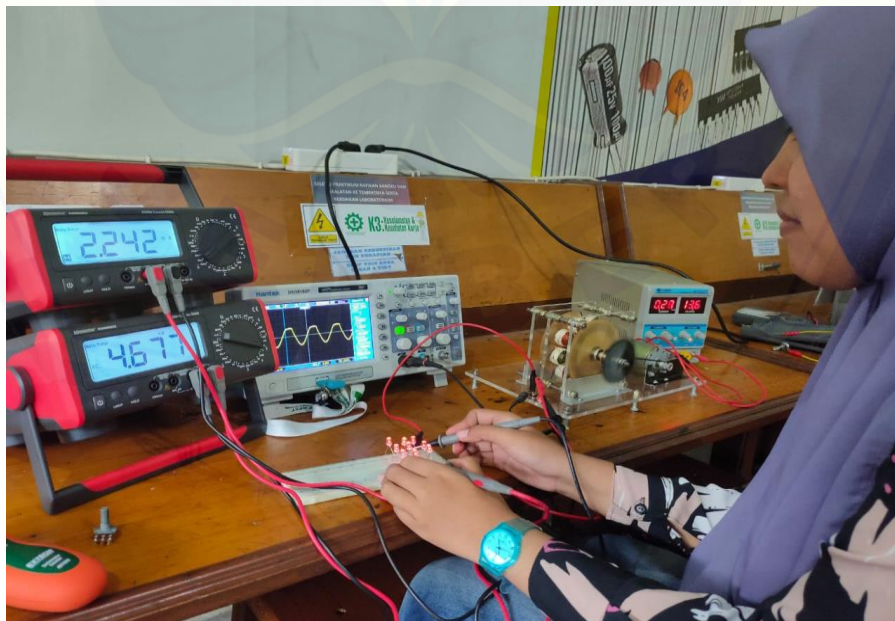
e. Perhitungan Torsi pada Rotor

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{P}{2\pi \frac{n}{60}} \\ &= \frac{8,860 \times 10^{-3}}{2 \times 3,14 \frac{3000}{60}} \\ &= 2,822 \times 10^{-5} Nm\end{aligned}$$



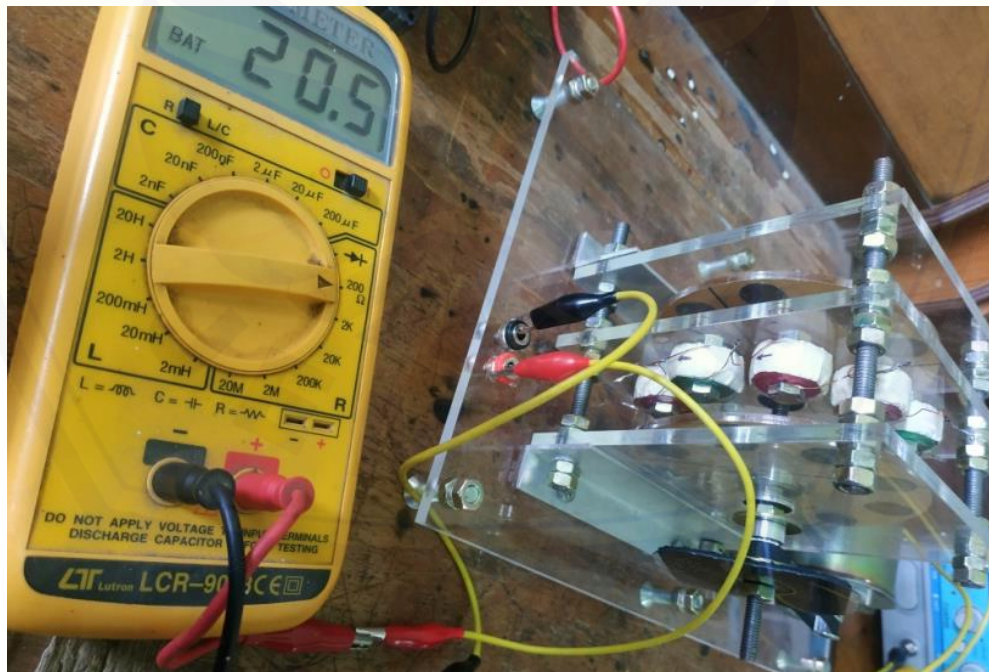
B. Dokumentasi

Gambar 1. Generator *Axial Flux Double Side Rotor* 1 Fasa dengan Kutub Berlawanan (N-S)



Gambar 2. Pengujian Generator *Axial Flux Double Side Rotor* 1 Fasa dengan

Kutub Berlawanan (N-S)

Gambar 3. Pengukuran Densitas Fluks Magnet *Neodymium Iron Boron* (NdFeB)Gambar 4. Pengukuran Resistansi Kumbaran (R_a)



Gambar 5. Pengukuran Induktansi Kumparan (X_a)



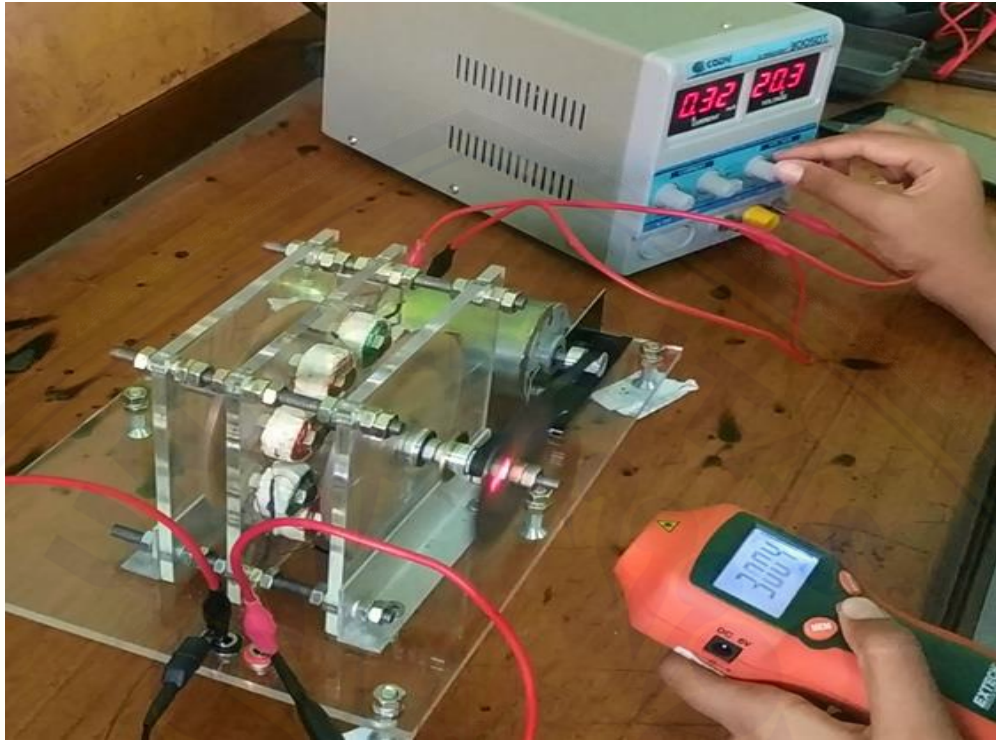
Gambar 6. Pengukuran Jarak Celah Udara 8 mm Menggunakan Jangka Sorong



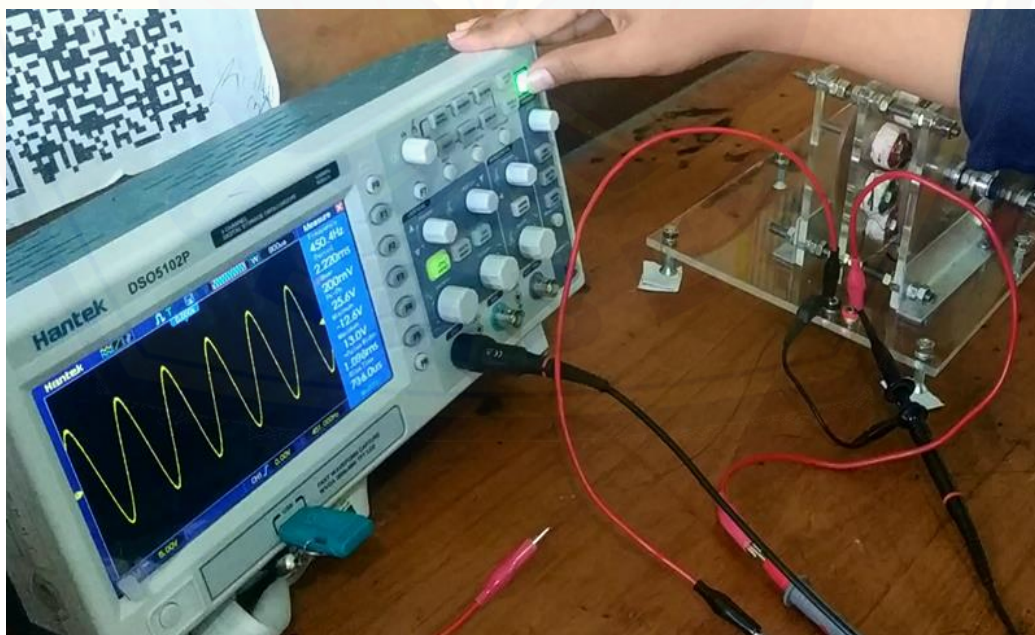
Gambar 7. Pengukuran Jarak Celah Udara 9 mm Menggunakan Jangka Sorong



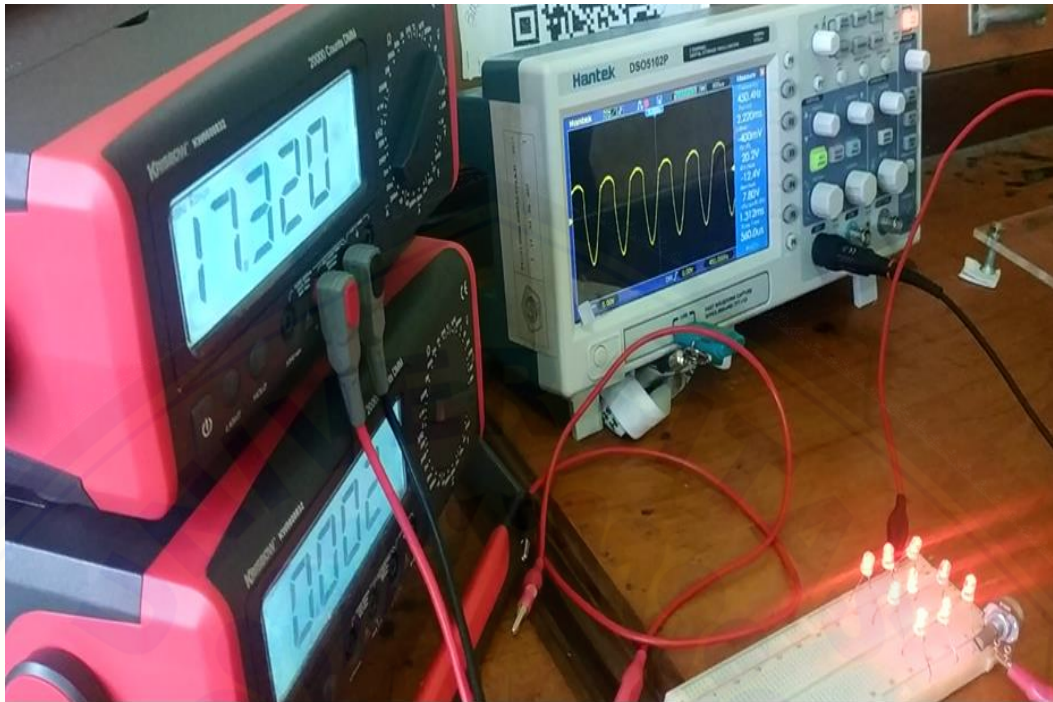
Gambar 8. Pengukuran Jarak Celah Udara 10 mm Menggunakan Jangka Sorong



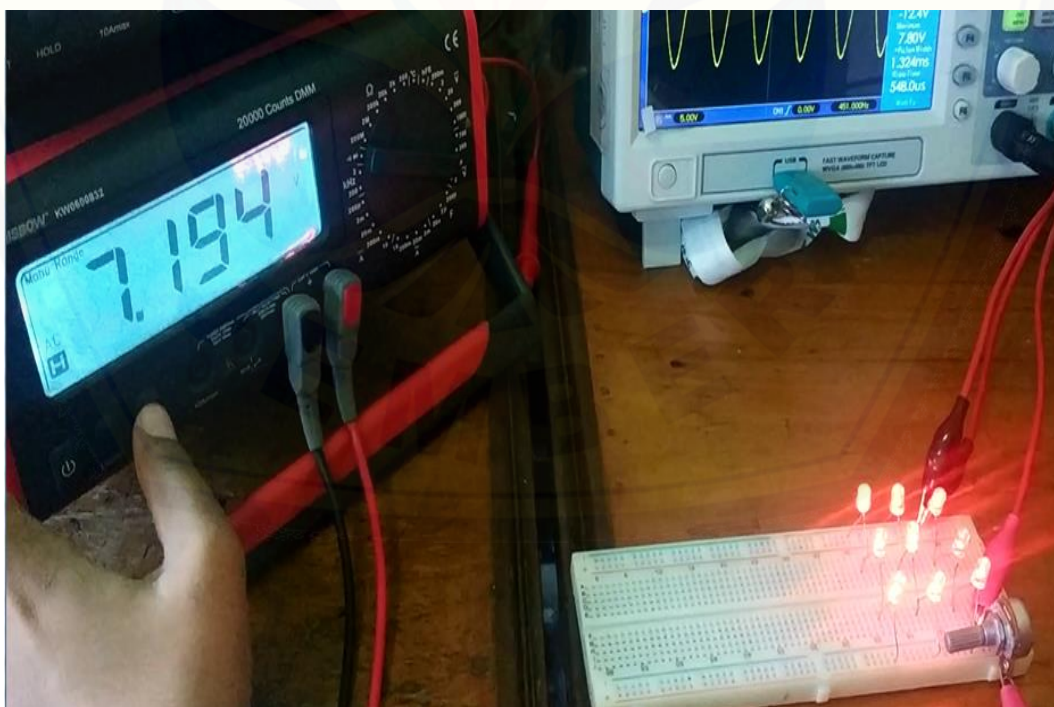
Gambar 9. Pengujian Kecepatan Putar Rotor Menggunakan *Tachometer*



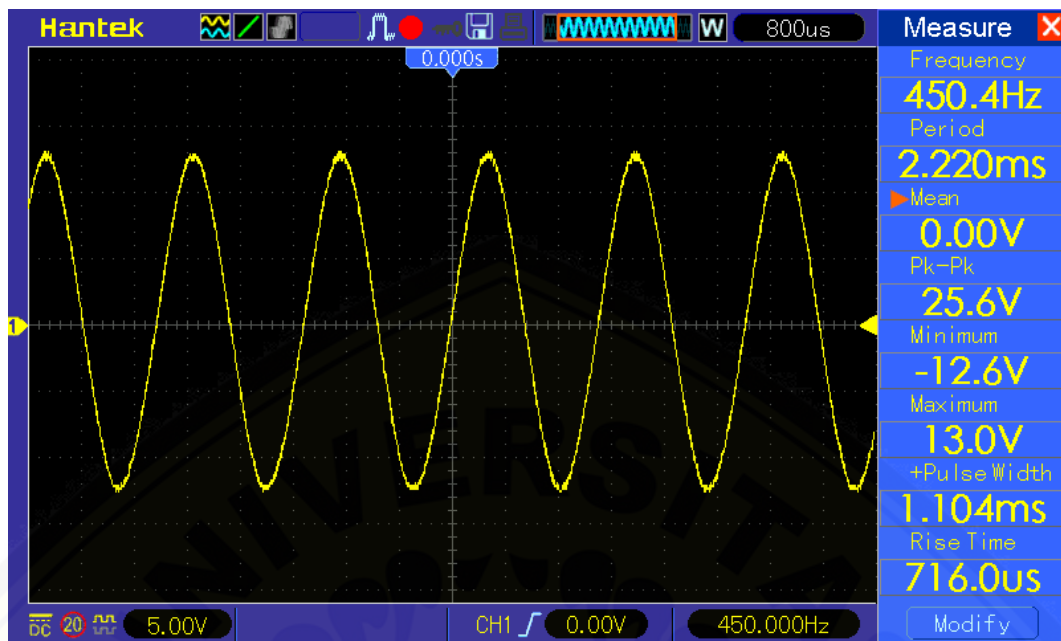
Gambar 10. Pengukuran Frekuensi dan Gelombang Luaran Generator Menggunakan Osiloskop



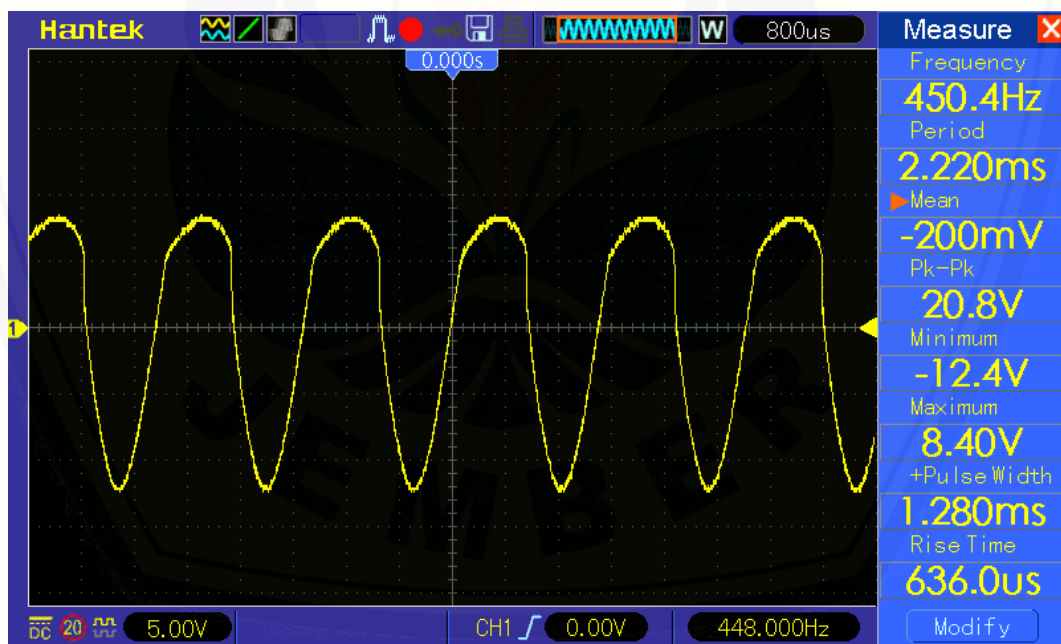
Gambar 11. Pengukuran Arus pada Beban LED



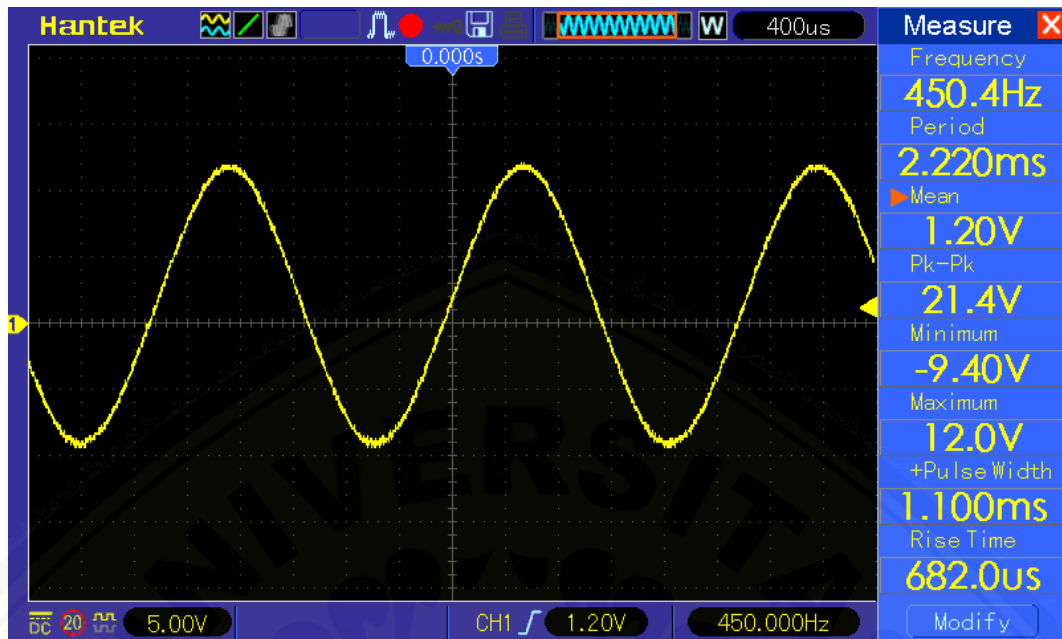
Gambar 12. Pengukuran Tegangan Luaran Generator dengan Beban LED



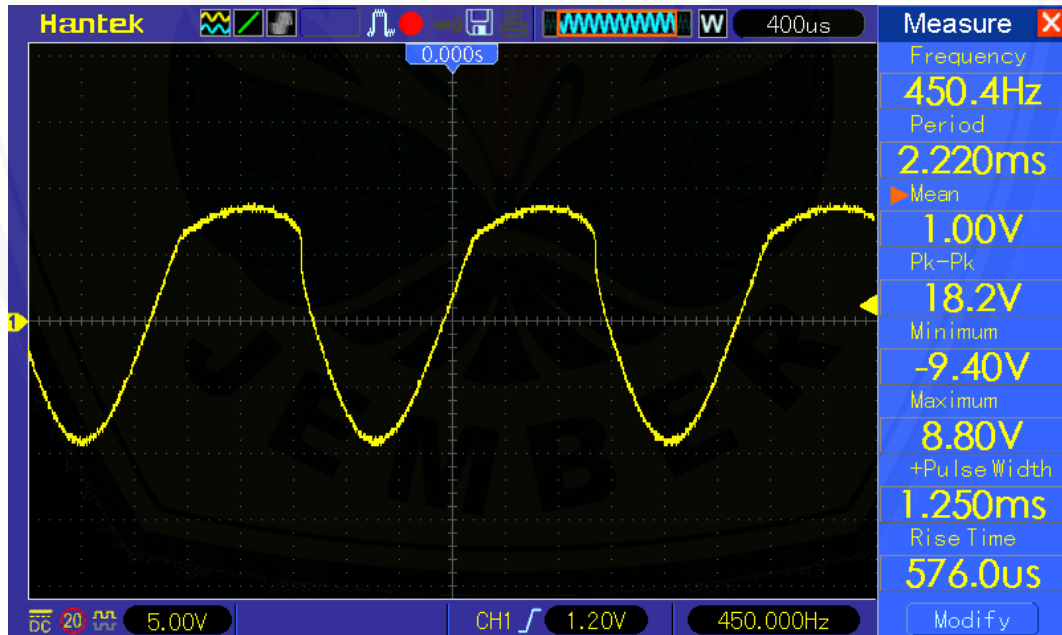
Gambar 13. Gelombang Luan Generator dalam Kondisi Tanpa Beban pada Celah Udara 8 mm saat Kecepatan Putar Rotor 3000 rpm.



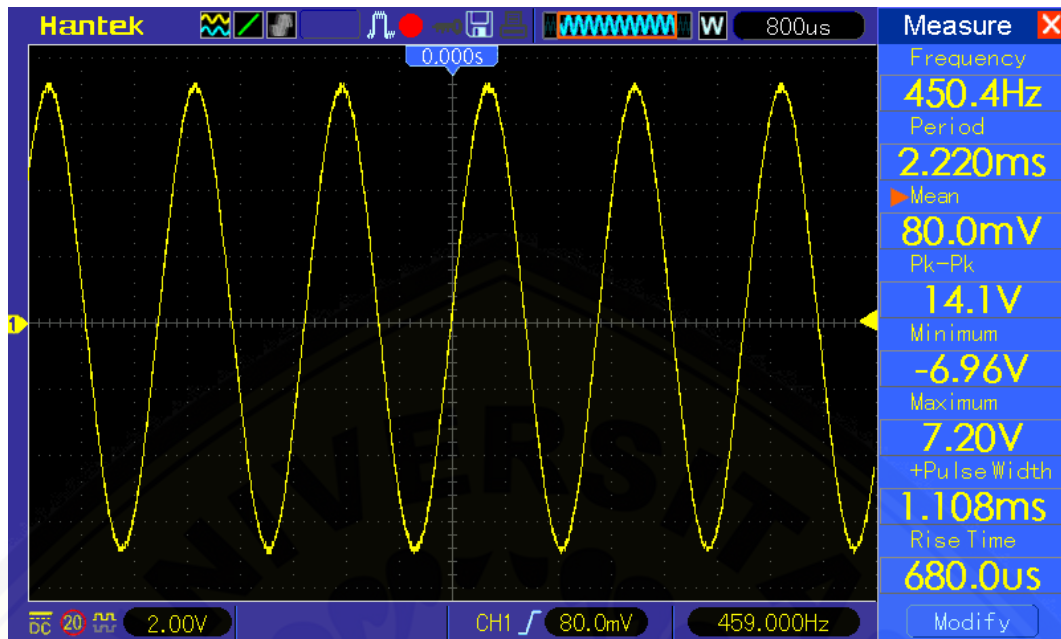
Gambar 14. Gelombang Luan Generator dalam Kondisi Terhubung Beban 3 LED Seri pada Celah Udara 8 mm saat Kecepatan Putar Rotor 3000 rpm.



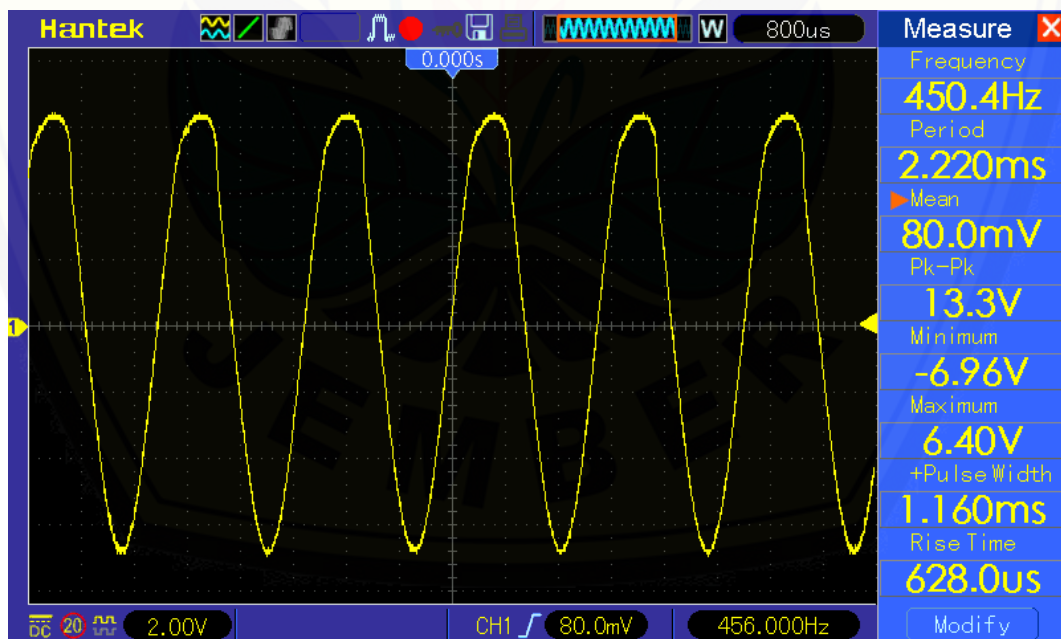
Gambar 15. Gelombang Luanan Generator dalam Kondisi Tanpa Beban pada Celah Udara 9 mm saat Kecepatan Putar Rotor 3000 rpm.



Gambar 16. Gelombang Luanan Generator dalam Kondisi Terhubung Beban 3 LED Seri pada Celah Udara 9 mm saat Kecepatan Putar Rotor 3000 rpm.



Gambar 17. Gelombang Luaran Generator dalam Kondisi Tanpa Beban pada Celah Udara 10 mm saat Kecepatan Putar Rotor 3000 rpm.



Gambar 18. Gelombang Luaran Generator dalam Kondisi Terhubung Beban 3 LED Seri pada Celah Udara 10 mm saat Kecepatan Putar Rotor 3000 rpm.