



**RANCANG BANGUN GENERATOR AXIAL FLUX SATU FASA
MENGUNAKAN NEODYMIUM IRON BORON MAGNET (NdFeB)
SILINDER DENGAN KUTUB SEARAH (U-U)**

SKRIPSI

Oleh:

**Alysa Karisma Addina Putri
NIM 151910201049**

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

2019



**RANCANG BANGUN GENERATOR AXIAL FLUX SATU FASA
MENGUNAKAN NEODYMIUM IRON BORON MAGNET (NdFeB)
SILINDER DENGAN KUTUB SEARAH (U-U)**

SKRIPSI

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat untuk menyelesaikan Program Studi Teknik Elektro (S1) dan mencapai gelar Sarjana Teknik

oleh:

Alysa Karisma Addina Putri

NIM 151910201049

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO STRATA 1

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS JEMBER

2019

PERSEMBAHAN

Dengan ini saya persembahkan skripsi kepada:

1. Kedua orang tua tercinta, Bapak Safroddin dan Ibu Alfiyah, yang senantiasa mendidik saya dengan sabar sampai sejauh ini, serta adikku, Aditya Syahrul Ramadhan, yang selalu meramaikan hari-hari perjuangan. *I love you.*
2. Diri sendiri yang telah berjuang dan bertahan sampai detik ini, yang terlalu tegar dan menerima semua keadaan.
3. Keluarga besar asisten Laboratorium Listrik Dasar selama 3 tahun ini khususnya Rijal Al-Kautsar Muluk, Danang Yuka Hermusyah, dan Adi Hastama yang telah membantu saya berproses dan juga sebagai sandaran hidup. *I'll miss you.*
4. Bopo *Squad*, Aprilya Pravika Sari, S.T. dan Ainur Rohmah, yang telah berjuang dari awal, jatuh bangunnya kita. *Keep me in your memories.*
5. Guru-guru mulai dari TK Al-Baitul Amien, SDN Kepatihan 01 Jember, SMPN 2 Jember, SMAN 1 Jember, dan dosen-dosen pengajar Teknik Elektro Universitas Jember atas semua ilmu yang telah diberikan.
6. Keluarga D15TORSI yang selalu menyemangati dan mendampingi saya selama menjadi bagian keluarga besar elektro 2015.
7. Almamater Teknik Elektro Universitas Jember.
8. Pihak-pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, saya berterima kasih telah membantu saya sampai selesainya pengerjaan skripsi ini.

MOTTO

Will it be easy? Nope

Will it be worth it? Absolutely

-Anonim-

*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-

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-

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

nama : Alysa Karisma Addina Putri

NIM : 151910201049

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Rancang Bangun Generator Axial Flux Satu Fasa Menggunakan *Neodymium Iron Boron* Magnet (NdFeB) Silinder Dengan Kutub Searah (U-U)” 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 dikemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 23 April 2019

Yang menyatakan,

Alysa Karisma Addina Putri

NIM 151910201049

SKRIPSI

**RANCANG BANGUN GENERATOR AXIAL FLUX SATU FASA
MENGUNAKAN NEODYMIUM IRON BORON MAGNET (NdFeB)
SILINDER DENGAN KUTUB SEARAH (U-U)**

Oleh

Alysa Karisma Addina Putri

NIM 151910201049

Pembimbing

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

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

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Rancang Bangun Generator Axial Flux Satu Fasa Menggunakan *Neodymium Iron Boron* Magnet (NdFeB) Silinder Dengan Kutub Searah (U-U)” karya Alysa Karisma Addina Putri telah diuji dan disahkan pada:

hari, tanggal : Selasa, 23 April 2019

tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Tim Penguji:

Ketua

Anggota II

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.

Suprihadi Prasetyono, S.T., M.T.

NIP. 197008261997021001

NIP. 197004041996011001

Mengesahkan
Dekan,

Dr. Ir. Entin Hidayah M.U.M.
NIP. 196612151995032001

RINGKASAN

Rancang Bangun Generator Axial Flux Satu Fasa Menggunakan *Neodymium Iron Boron* Magnet (NdFeB) Silinder Dengan Kutub Searah (U-U): Alysa Karisma Addina Putri, 151910201049: 2019: 89 halaman: Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Krisis energi yang melanda dunia pada umumnya dan Indonesia pada khususnya telah memaksa berbagai pihak untuk mencari solusi dalam mengatasi persoalan ini. Indonesia sendiri memiliki potensi sumber energi terbarukan yang menjanjikan, beberapa diantaranya yaitu energi panas bumi, energi angin, energi air, bahkan energi surya. Energi yang tersedia dari alam tersebut dapat dikonversi menjadi energi listrik yang menjanjikan. Energi listrik sendiri dapat dihasilkan dari energi mekanik dalam suatu sistem pembangkit listrik dengan mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Sistem pembangkit listrik terdapat generator yang mempunyai peran yang sangat penting yaitu sebagai penghasil energi listrik. Generator *axial flux* magnet permanen dapat beroperasi pada putaran rendah dan tinggi selain itu generator ini memiliki keunggulan mudah dalam pemasangan magnet permanen. Magnet permanen yang akan digunakan pada generator ini menggunakan bahan *Neodymium Iron Boron* (NdFeB).

Dalam perancangan generator *axial flux* dengan kutub searah yaitu memiliki 16 kumparan yang masing-masing memiliki 600 lilitan yang dihubungkan secara seri dengan 8 buah magnet *Neodymium Iron Boron* (NdFeB) dengan konstruksi stator ganda dan rotor tunggal. Magnet yang dipasang pada rotor memiliki kutub searah atau sama dipada masing-masing sisi rotor. Diameter kawat email yang digunakan yaitu 0,2 mm. Pengujian dilakukan dengan menggunakan beban 2000 Ω , 1000 Ω , 666,667 Ω , 500 Ω , dan 400 Ω dengan tegangan konstan sebesar 4,5 V, 6 V, dan 8 V. Pengujian dilakukan terhadap tegangan, arus, dan kecepatan putar rotor guna mengetahui daya dan efisiensi generator.

Dari pengujian untuk mengetahui pengaruh kecepatan putar rotor dengan arus pada tegangan konstan 4,5 V dengan kecepatan putar 1122 RPM, 1215 RPM, 1363

RPM, 1586 RPM, 1715 RPM diperoleh arus pengujian pada tiap beban yaitu 0,0022 A, 0,0044 A, 0,0067 A, 0,0087 A, 0,0106 A.

Pada masing-masing data yang telah didapat kemudian dilakukan perhitungan daya dan efisiensi. Daya yang dihasilkan pada tiap beban didapatkan 0,0482 W, 0,039 W, 0,030 W, 0,020 W, 0,010 W dengan efisiensi masing-masing 0,0707%, 0,1165%, 0,1884%, 0,1450%, 0,1622%.

Pada penelitian ini pengaruh kutub searah sangat berpengaruh terdapat daya dan efisiensi yang dapat diketahui bahwa semakin banyak beban atau semakin kecil nilai resistansi maka daya dan efisiensi yang dihasilkan akan semakin besar dengan *output* tegangan konstan. Hal ini berhubungan dengan arus *output* yang mengalir pada beban yang semakin besar jika beban semakin bertambah atau resistansi berkurang, maka akan sesuai dengan Hukum Ohm dengan korelasi bahwa arus berbanding terbalik dengan resistansi.

SUMMARY

Design of One Phase Axial Flux Generator Using Neodymium Iron Boron Magnet (NdFeB) Cylinders in The Same Direction Poles (U-U): Alysa Karisma Addina Putri, 151910201049: 2019: 89 pages. Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Jember.

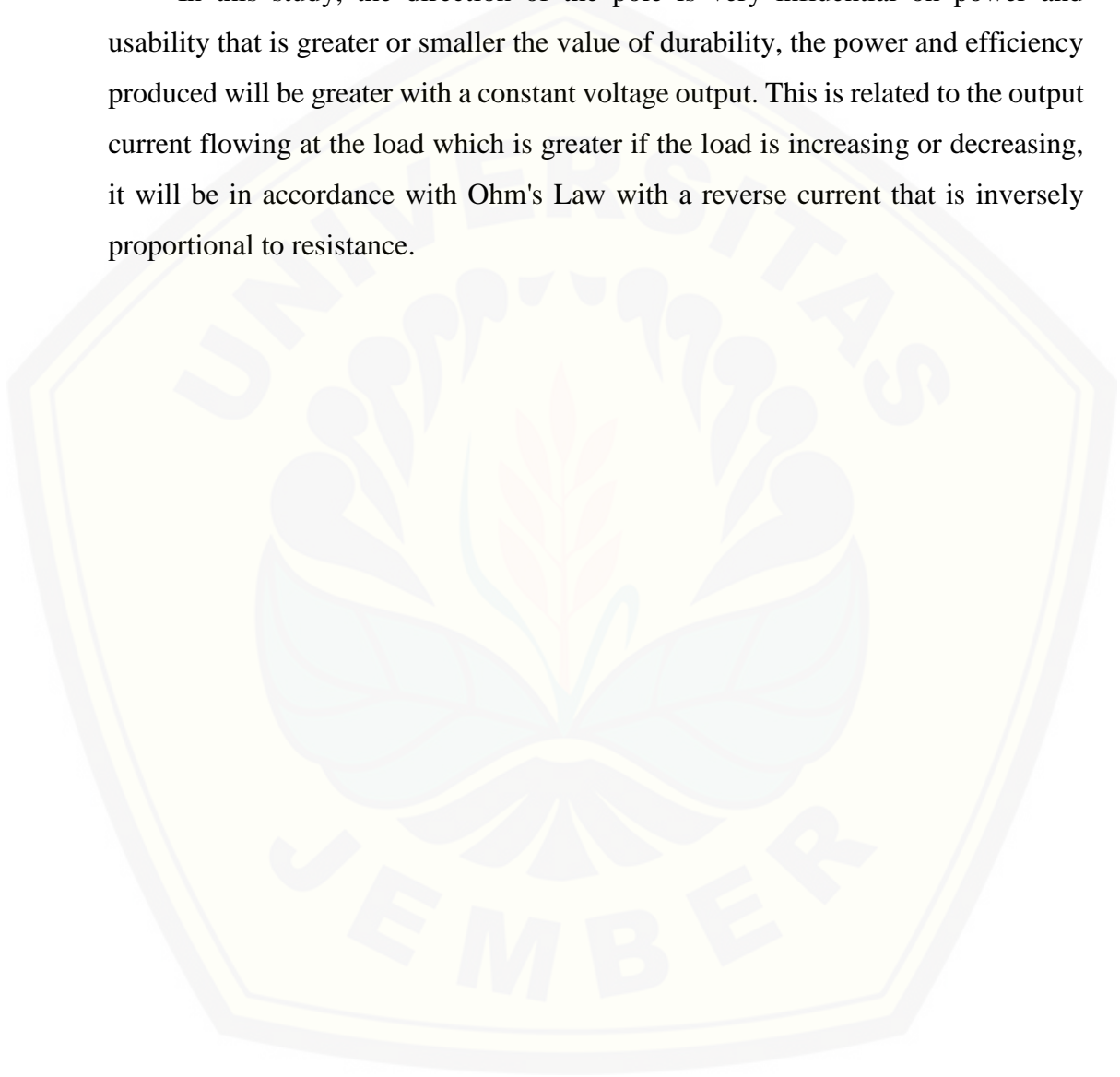
The energy crisis that hit the world in general and in Indonesia in particular has supported a number of parties to find solutions to overcome this problem. Indonesia itself has promising renewable energy sources, some claim geothermal energy, wind energy, air energy, and even solar energy. The available energy from nature can be offered as promising electrical energy. Electrical energy itself can be produced from mechanical energy in a power generation system by converting mechanical energy into electrical energy. Power plant systems needed by generators that have a very important role as producers of electric energy. Permanent magnet axial flux generators can be used at low and high speeds, besides this generator has an easy advantage in the installation of permanent magnets. The permanent magnet that will be used in this generator uses Neodymium Iron Boron (NdFeB).

In designing axial flux generators with same direction poles which have 16 coils which each have 600 turns which are compatible with 8 Neodymium Iron Boron (NdFeB) magnets with double stator construction and single rotor. Magnets mounted on the rotor have poles in the direction or the same on each side of the rotor. The email wire diameter used is 0.2 mm. Tests are carried out using 2000 Ω , 1000 Ω , 666,667 Ω , 500 Ω , and 400 Ω loads with a constant voltage of 4.5 V, 6 V, and 8 V. Tests are carried out on the voltage, current, and rotor rotation to find out the power and generator efficiency.

From testing to study the rotor speed rotation with a current at a constant voltage of 4.5 V with a rotating speed of 1122 RPM, 1215 RPM, 1363 RPM, 1586 RPM, 1715 RPM, the test current for each load is 0.0022 A, 0.0044 A, 0.0067 A, 0.0087 A, 0.0106 A.

In each data that has been obtained then the calculation of power and efficiency is carried out. The power generated is obtained every time 0.0482 W, 0.039 W, 0.030 W, 0.020 W, 0.010 W with 0.0707%, 0.1165%, 0.1884%, 0.1884%, 0.1450% , 0, 1622%.

In this study, the direction of the pole is very influential on power and usability that is greater or smaller the value of durability, the power and efficiency produced will be greater with a constant voltage output. This is related to the output current flowing at the load which is greater if the load is increasing or decreasing, it will be in accordance with Ohm's Law with a reverse current that is inversely proportional to resistance.



PRAKATA

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi penelitian yang berjudul “Rancang Bangun Generator Axial Flux Satu Fasa Menggunakan *Neodymium Iron Boron* Magnet (NdFeB) Silinder Dengan Kutub Searah (U-U)”. Skripsi ini diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat untuk menyelesaikan Program Studi Teknik Elektro (S1) Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember. Selama penyusunan skripsi ini penulis mendapat bantuan berbagai pihak, untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu Dr. Ir. Entin Hidayah M.U.M selaku dekan Fakultas Teknik Universitas Jember.
2. Bapak Ir. Widyono Hadi, M.T. selaku Dosen Pembimbing Akademik dan Dosen Pembimbing Utama dan Bapak Widya Cahyadi, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Anggota dan Komisi Bimbingan S1 yang telah meluangkan waktu, pikiran serta motivasi dalam penyusunan skripsi ini.
3. Bapak Dr. Triwahju Hardianto, S.T., M.T. selaku dosen penguji utama dan Bapak Suprihadi Prasetyono, S.T., M.T. selaku dosen penguji anggota yang telah memberikan kritik dan saran yang membangun sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan lancar.
4. Bapak Dedy Kurnia Setiawan, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Akademik pertama yang telah memberikan bimbingan dan motivasi penulis selama menjadi mahasiswa.
5. Kedua orang tua tercinta, Bapak Safroddin dan Ibu Alfiyah, serta adikku tersayang, Aditya Syahrul Ramadhan, atas kasih sayang, pengorbanan, dan kesabaran yang tiada tara serta doa yang selalu menyertai.
6. Teman seperjuangan se-DPU, se-DPA, dan sepenelitian, Aprilia Pravika Sari, S.T. dan Ainur Rohmah, yang saling mendukung, menyemangati, dan memotivasi dalam penyusunan skripsi.

7. Rekan asisten Laboratorium Listrik Dasar, Rijal Al-Kautsar Muluk, Danang Yuka Hermusyah, Adi Hastama, Dio Firman Pangestu, Malikul Fanani, yang telah menjadi keluarga dari semester 3 hingga sekarang.
8. Rekan-rekan Fakultas Teknik, Universitas Jember, khususnya rekan-rekan Teknik Elektro Angkatan 2015 yang tidak dapat disebut satu per satu, yang selama ini telah memberikan berbagai pengalaman selama penulis menjadi bagian dari keluarga Besar Fakultas Teknik, Universitas Jember.
9. Seluruh pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Penulis menerima segala saran dan kritik dari semua pihak untuk menyempurnakan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat.

Jember, 23 April 2019

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	i
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERSEMBAHAN	iii
HALAMAN MOTTO	iv
HALAMAN PERNYATAAN	v
HALAMAN PEMBIMBING	vi
HALAMAN PENGESAHAN	vii
RINGKASAN	viii
SUMMARY	x
PRAKATA	xii
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR GAMBAR	xviii
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Generator Sinkron	5
3.2.1 Prinsip Kerja Generator Sinkron.....	6
2.2 Generator <i>Axial Flux</i>	7
2.2.1 Konstruksi Generator <i>Axial Flux</i>	7
2.2.2 Tipe-Tipe Generator <i>Axial flux</i>	8
2.2.3 Prinsip Kerja Generator <i>Axial flux</i>	10
2.2.4 Rangkaian Ekuivalen	12
2.3 Perbandingan Antara Generator Aksial dengan Generator Radial.....	12
2.4 Magnet Permanen.....	13

2.5	Medan Megnet.....	14
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN.....		16
3.1	Tempat dan Waktu Penelitian	16
3.1.1	Tempat Penelitian.....	16
3.1.2	Waktu Penelitian	16
3.2	Alat dan Bahan	16
3.2.1	Perangkat lunak (<i>software</i>)	17
3.2.2	Perangkat keras (<i>hardware</i>).....	17
3.3	Tahapan Penelitian	17
3.4	Blok Diagram dan Perancangan Sistem	21
3.5	Perancangan Desain Alat.....	22
3.6	Perancangan Rotor Generator <i>Axial flux</i>	23
3.6.1	Penentuan Magnet pada Rotor	23
3.6.2	Dimensi Rotor	24
3.7	Perancangan Stator Generator DC	25
3.8	Pengujian Generator Tipe <i>Axial flux</i>	26
3.8.1	Frekuensi Generator Satu Fasa Tipe <i>Axial Flux</i>	26
3.8.2	Tegangan Pada GGL Generator Satu Fasa Tipe <i>Axial Flux</i>	26
3.8.3	Daya <i>Output</i> Generator Satu Fasa Tipe <i>Axial Flux</i>	27
3.8.4	Menghitung Besar <i>Error</i> Persen	28
3.8.5	Menghitung Efisiensi Generator	28
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....		29
4.1	Spesifikasi Perancangan Generator <i>Axial Flux</i>	29
4.2	Pengujian Generator <i>Axial Flux</i> Tanpa Beban	32
4.3	Pengujian Generator <i>Axial Flux</i> Berbeban	32
4.3.1	Kecepatan Putar Generator Terhadap Beban	33
4.3.2	Arus <i>Output</i> Generator Terhadap Beban.....	35
4.3.3	Perhitungan Tegangan <i>Output</i> Generator.....	36
4.3.4	Daya <i>Output</i> Generator Terhadap Beban.....	38
4.3.5	Efisiensi Generator.....	40
4.4	Karakteristik Sinyal <i>Output</i> Generator <i>Axial Flux</i>	42

BAB 5. PENUTUP	44
5.1 Kesimpulan.....	44
5.2 Saran.....	45
DAFTAR PUSTAKA	46
LAMPIRAN 1	48
A. Perhitungan kerapatan fluks magnet	48
B. Perhitungan fluks magnet.....	48
C. Perhitungan tegangan <i>output</i> generator	48
a. Saat tegangan <i>output</i> generator konstan 4,5 V.....	48
b. Saat tegangan <i>output</i> generator konstan 6 V.....	55
c. Saat tegangan <i>output</i> generator konstan 8 V.....	62
LAMPIRAN 2	70

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Jadwal Pelaksanaan Penelitian.....	16
Tabel 4.1 Data Spesifikasi Perancangan Generator <i>Axial Flux</i>	30
Tabel 4.2 Spesifikasi Motor Sebagai <i>Prime Mover</i>	31
Tabel 4.3 Hasil Pengujian Tanpa Beban	32
Tabel 4.4 Hasil Pengujian Berbeban Tegangan Konstan 4,5 V	33
Tabel 4.5 Hasil Pengujian Berbeban Tegangan Konstan 6 V	33
Tabel 4.6 Hasil Pengujian Berbeban Tegangan Konstan 8 V	33
Tabel 4.7 Hasil Error Persen Generator <i>Axial Flux</i> Tegangan 4,5 V	36
Tabel 4.8 Hasil Error Persen Generator <i>Axial Flux</i> Tegangan 6 V	37
Tabel 4.9 Hasil Error Persen Generator <i>Axial Flux</i> Tegangan 8 V	37
Tabel 4.10 Daya <i>Output</i> Generator <i>Axial Flux</i> Tegangan 4,5 V	39
Tabel 4.11 Daya <i>Output</i> Generator <i>Axial Flux</i> Tegangan 6 V	39
Tabel 4.12 Daya <i>Output</i> Generator <i>Axial Flux</i> Tegangan 8 V	39
Tabel 4.13 Perhitungan Efisiensi Generator <i>Axial Flux</i> Tegangan 4,5 V	41
Tabel 4.14 Perhitungan Efisiensi Generator <i>Axial Flux</i> Tegangan 6 V	41
Tabel 4.15 Perhitungan Efisiensi Generator <i>Axial Flux</i> Tegangan 8 V	41

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Potongan Generator Sinkron	5
Gambar 2.2 <i>Layout</i> Generator <i>Axial Flux</i> Magnet Permanen.....	7
Gambar 2.3 Tipe Pemasangan Magnet Pada Rotor	8
Gambar 2.4 Generator <i>Axial Flux</i> Tipe Rotor dan Stator Tunggal	9
Gambar 2.5 Generator <i>Axial Flux</i> Rotor Ganda Tipe N-N <i>Coreless</i>	9
Gambar 2.6 Generator <i>Axial Flux</i> Stator Ganda Rotor Tunggal.....	10
Gambar 2.7 Generator <i>Axial Flux</i> Rotor Banyak Tipe <i>Coreless</i>	10
Gambar 2.8 Rangkaian Ekuivalen Generator.....	12
Gambar 2.9 Topologi Generator	13
Gambar 2.10 Perbandingan Arah Fluks	13
Gambar 2.11 Kurva Demagnetisasi Magnet Permanen	14
Gambar 2.12 Garis Gaya Magnet.....	15
Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> Penelitian	19
Gambar 3.2 Blok Diagram Sistem	21
Gambar 3.3 Desain Rotor.....	22
Gambar 3.4 Desain Stator	22
Gambar 3.5 Desain Generator <i>Axial Flux</i>	23
Gambar 3.6 Dimensi Rotor 2D	24
Gambar 3.7 Kutub Utara dengan Kaidah Tangan Kanan	25
Gambar 3.8 Dimensi Stator 2D	26
Gambar 4.1 Generator <i>Axial Flux</i> Satu Fasa Menggunakan <i>Neodymium Iron</i> 29	
Gambar 4.2 Grafik Hubungan Kecepatan Putar Terhadap Beban Resistif.....	34
Gambar 4.3 Grafik Hubungan Arus <i>Output</i> Terhadap Beban Resistif	35
Gambar 4.4 Grafik Perbandingan Pengukuran dan Perhitungan Tegangan ...	38
Gambar 4.5 Grafik Hubungan Daya <i>Output</i> Terhadap Beban Resistif.....	40

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi dan pertumbuhan masyarakat dunia menjadikan kebutuhan energi meningkat pesat. Kebutuhan energi yang semakin besar seiring dengan bertambahnya penduduk menyebabkan krisis energi yang menghantui negara-negara dunia dan Indonesia pada khususnya, terutama energi yang berasal dari fosil. Kenaikan harga minyak bumi yang bersifat vital semakin lama semakin mengkhawatirkan dengan dampak semakin sulitnya masyarakat dalam memenuhi kebutuhan hidup dan menyebabkan krisis ekonomi global. Berdasarkan data dari WTI (*West Texas Intermediate*) bahwa harga minyak mentah mengalami kenaikan sebesar 0,82% menjadi 71,11 dollar US per barel pada Agustus 2018.

Ketergantungan terhadap minyak bumi sebagai energi utama sangatlah besar yang didukung dengan bertambahnya kebutuhan suatu negara dalam memenuhi kebutuhan rakyatnya. Banyak negara yang berlomba-lomba membangun perekonomian bidang industri dimana akan semakin memicu bertambahnya kebutuhan minyak bumi. Juga terdapat beberapa faktor eksternal yang mendorong kenaikan harga minyak bumi seperti terganggunya proses distribusi dan menipisnya cadangan minyak bumi dunia. Sehingga dunia memiliki tiga ancaman serius mengenai energi, yaitu menipisnya cadangan minyak bumi dunia jika tidak segera ditemukan sumur minyak bumi cadangan baru, ketidakstabilan perekonomian akibat banyaknya laju permintaan minyak bumi semakin merajalela daripada produksi minyak bumi itu sendiri, dan polusi CO₂ (efek rumah kaca) yang diakibatkan pembakaran bahan bakar fosil.

Krisis energi yang melanda dunia pada umumnya dan Indonesia pada khususnya telah memaksa berbagai pihak untuk mencari solusi dalam mengatasi persoalan ini. Indonesia sendiri memiliki potensi sumber energi terbarukan yang menjanjikan, beberapa diantaranya yaitu energi panas bumi, energi angin, energi air, bahkan energi surya. Energi yang tersedia dari alam tersebut dapat dikonversi menjadi energi listrik yang menjanjikan.

Energi listrik sendiri dapat dihasilkan dari energi mekanik dalam suatu sistem pembangkit listrik dengan mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Sistem pembangkit listrik terdapat generator yang mempunyai peran yang sangat penting yaitu sebagai penghasil energi listrik. Generator listrik adalah suatu alat yang digunakan untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik yang berbasis pada induksi magnet (Ade Setiawan, 2016). Karakteristik generator dibedakan pada arah fluks yaitu radial dan aksial, sesuai dengan kebutuhan, generator yang digunakan pada pembangkit listrik ialah generator yang bisa digunakan dalam putaran rendah (*low speed induction generator*) dengan menggunakan magnet permanen, sedangkan generator yang digunakan dipusat-pusat pembangkit atau yang dipasaran adalah generator yang berjenis *high speed induction generator*, generator jenis ini ini membutuhkan putaran tinggi, selain itu instalasinya lebih rumit dan memerlukan biaya besar untuk pembuatan serta perawatannya (Abrar Ridwan, 2008).

Generator *axial flux* magnet permanen bisa beroperasi pada putaran rendah dan tinggi selain itu generator ini memiliki keunggulan mudah dalam pemasangan magnet permanen dan biasa dimanfaatkan pada pembangkit listrik tenaga angin. Magnet permanen yang akan digunakan pada generator ini menggunakan bahan *Neodymium Iron Boron* (NdFeB). NdFeB merupakan magnet permanen yang paling banyak digunakan pada pembuatan generator *axial flux*, magnet permanen digunakan untuk menghasilkan fluks magnet.

Pada penelitian sebelumnya yaitu oleh Erol KURT dan Halil GOR pada tahun 2014 dengan judul *Electromagnetic Design of A New Axial Flux Generator* dimana pada penelitian ini menggunakan topologi *axial flux* dengan jumlah magnet NdFeB 16 buah dan 24 kumparan dengan masing-masing 200 lilitan dan menggunakan konstruksi rotor ganda dan stator tunggal. Hanya pada penelitian ini hanya berupa simulasi FEM. Kemudian pada tahun 2017 terdapat penelitian dari Suhairi Rizuan Che Ahmad, dkk dengan judul *Modeling and Analysis of Double Stator Slotted Rotor Permanent Magnet Generator* dimana pada penelitian ini menggunakan topologi *radial flux* dengan konstruksi stator ganda dan rotor tunggal.

Tugas akhir ini akan merancang sebuah generator *axial flux* dengan menggunakan magnet permanen jenis *Neodymium Iron Boron* (NdFeB) dengan konstruksi *double* stator sebagai pembangkit listrik, dengan hasil akhir yang ingin didapat dari penelitian adalah untuk memperoleh unjuk kerja dari generator *axial flux* magnet permanen berupa desain konstruksi, memperoleh daya yang dikeluarkannya dan efisiensi yang baik.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, ada beberapa hal masalah yang akan diselesaikan dalam penelitian ini yaitu :

1. Bagaimana merancang dan membuat generator tipe *flux axial* satu fasa dengan kutub searah (U-U)?
2. Bagaimana pengaruh kutub searah (U-U) terhadap daya *output* dan efisiensi generator tipe *flux axial* satu fasa terhadap variasi beban resistif?

1.3 Batasan Masalah

Berdasarkan rumusan masalah penelitian diatas, supaya pembahasan tidak terlalu luas maka diperlukan suatu pembatasan masalah yaitu :

1. Magnet permanen yang digunakan yaitu jenis magnet *Neodymium Iron Boron* (NdFeB) silinder dengan diameter 1,2 cm dan tebal 3 mm.
2. Jumlah koil yang digunakan berjumlah 16 buah dengan masing-masing terdapat 600 lilitan.
3. Jumlah magnet *Neodymium Iron Boron* berjumlah 8 buah.
4. Generator yang dirancang dengan stator ganda dengan inti besi dan rotor internal.
5. Pemutar generator menggunakan motor AC 1 fasa tipe HF-1026N.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian yang diusulkan dalam proposal ini memiliki beberapa tujuan diantaranya yaitu :

1. Untuk merancang dan membuat generator tipe *flux axial* satu fasa dengan kutub searah (U-U).
2. Mengetahui pengaruh kutub searah (U-U) terhadap daya *output* dan efisiensi generator tipe *flux axial* satu fasa terhadap variasi beban resistif.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan mampu memberi manfaat yaitu :

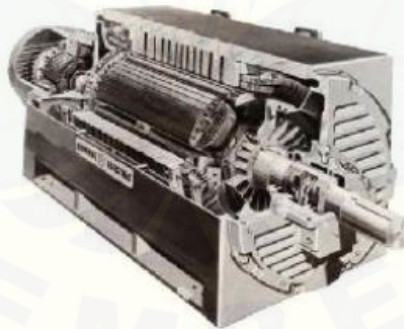
1. Bagi Masyarakat
Hasil dari rancang bangun generator tipe *axial flux* ini bisa dijadikan pilihan dalam pengaplikasian pembangkit listrik turbin angin dalam skala kecil.
2. Bagi dunia pendidikan dan ilmu pengetahuan
Rancang bangun generator tipe *axial flux* ini bisa dijadikan referensi terobosan terbaru untuk penelitian lebih lanjut.
3. Bagi Mahasiswa
Dapat dijadikan pedoman pembelajaran dan pengembangan ilmu pengetahuan khususnya tentang generator tipe *axial flux*.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Generator Sinkron

Generator dapat diartikan sebagai pengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Pembangkitan energi listrik ini biasanya menggunakan induksi elektromagnetik. Dalam penerapannya, biasanya generator akan dipasangkan dengan motor sebagai energi mekanik penggerak generator. Penggunaan energi mekanik untuk generator dapat dilakukan selain menggunakan motor diantaranya dengan menggunakan angin yang memutar turbin angin atau kincir angin, turbin mesin uap, ataupun sumber energi mekanik lainnya.

Prinsip kerja dari generator modern pada saat ini menggunakan prinsip induksi elektromagnetik yang ditemukan oleh Michael Faraday pada tahun 1821. Michael Faraday menemukan bahwa aliran muatan listrik dapat diinduksi dengan menggerakkan konduktor listrik, seperti kawat yang mengandung muatan listrik, dalam medan magnet. Gerakan ini menciptakan perbedaan tegangan antara dua ujung kawat atau konduktor listrik, yang menyebabkan muatan listrik mengalir, sehingga menghasilkan arus listrik.



Gambar 2.1 Potongan Generator Sinkron

(Sumber: Stephen J. Chapman, 2005)

Bagian-bagian pada generator sinkron, yaitu:

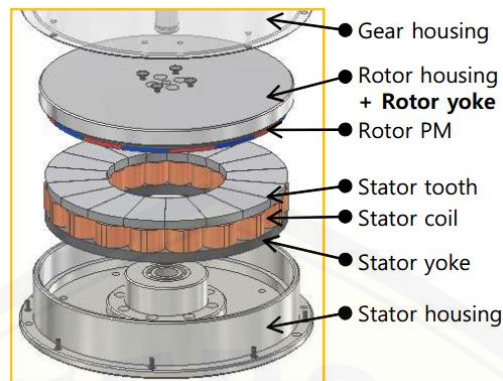
1. Rotor yaitu bagian yang berputar pada generator sehingga menghasilkan GGL. Rotor pada generator sinkron aksial fluks terdiri dari poros, inti, kumparan, cincin geser, dan sikat-sikat.

2. Stator yaitu bagian yang diam pada generator. Stator terdiri dari rangka stator yang merupakan bagian utama yang terbuat dari besi tuang dan merupakan rumah dari semua bagian-bagian generator, kutub utama beserta belitannya, kutub-kutub pembantu beserta belitannya, dan bantalan-bantalan poros.

3.2.1 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Prinsip kerja generator sinkron adalah ketika kumparan diputar dengan kecepatan tetap atau konstan pada medan magnet homogen, maka akan terjadi induksi tegangan sinusoidal pada kumparan. Medan magnet bisa dihasilkan oleh kumparan yang dialiri arus searah (DC) atau oleh magnet tetap. Pada mesin tipe ini medan magnet diletakkan pada stator atau disebut dengan generator kutub eksternal dimana energi listrik dibangkitkan pada kumparan rotor. Hal ini dapat menimbulkan kerusakan pada *slip ring* dan karbon sikat sehingga menimbulkan permasalahan pada pembangkitan daya tinggi. Maka dari itu penggunaan generator dengan tipe kutub internal dibutuhkan untuk mengatasi masalah ini, dimana medan magnet dibangkitkan oleh kutub rotor dan tegangan AC dibangkitkan pada rangkaian stator. Tegangan yang dihasilkan akan berbentuk sinusoidal jika rapat fluks magnet pada celah udara terdistribusi sinusoidal dan rotor diputar pada kecepatan konstan.

2.2 Generator *Axial Flux*



Gambar 2.2 *Layout Generator Axial flux* Magnet Permanent

(Sumber: S. O. Ani *et al*)

Generator *axial flux* merupakan salah satu topologi pada mesin listrik seperti generator yang telah berkembang setelah pada tahun 1821, Michael Faraday menemukan mesin berbentuk cakram yang mirip dengan mesin *axial flux*. Perkembangan kemudian pada tahun 1837 ketika Thomas Davenport mendapatkan paten Amerika pertama dari mesin listrik *axial flux* dan setelahnya penggunaan topologi *axial flux* menjadi umum digunakan. Pada generator *axial flux* ini dapat ditentukan sendiri dimensi dan besarnya sesuai dengan daya yang diinginkan.

2.2.1 Konstruksi Generator *Axial Flux*

Pada dasarnya generator *axial flux* memiliki dua komponen konstruksi utama yang sama dengan generator DC, yaitu stator dan rotor. Stator dan rotor akan menentukan karakteristik dan jenis dari generator.

1. Stator

Stator merupakan bagian dari generator yang diam atau statis (tidak berubah). Generator *axial flux* juga memiliki beberapa jenis dan variasi pada statornya seperti stator dengan inti besi atau tanpa inti besi. Inti besi pada bagian tengah lilitan dapat membantu mengarahkan induksi magnetik menuju kumpuran (Jarekson Ramadhan, 2011). Konfigurasi lilitan pada stator juga dapat memberikan keluaran berbeda, yaitu satu fasa atau tiga fasa.

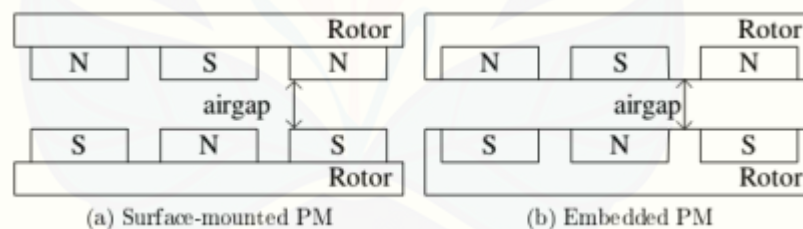
Stator pada generator sebenarnya adalah kumparan kawat yang digulung sesuai akidah baik pada perhitungan lilitan ataupun jarak pada tiap lilitan. Ketika

kumparan kawat diberi energi yang pada kali ini adalah energi mekanik maka medan magnet yang berputar akan menghasilkan listrik.

2. Rotor

Rotor merupakan bagian dari generator yang mengalami perputaran saat dihubungkan dengan motor. Rotor sebagai wadah atau tempat medan magnet yang berasal dari *permanent magnet* seperti jenis *Neodymium Iron Boron* (NdFeB) yang diletakkan pada cakram rotor. Pada rotor terdapat magnet dengan jumlah tertentu dengan arah medan yang searah atau berlawanan. Jumlah kutub magnet akan mempengaruhi banyaknya putaran per menit yang harus bekerja untuk menimbulkan frekuensi yang diinginkan (Abdul Fajar, 2017).

Terdapat dua cara dalam menyusun magnet pada mesin *Axial Flux Permanent Magnet* (AFPM), diantaranya yaitu *surface-mounted PM* dan *embedded PM*. Pada tipe *surface-mounted PM*, kutub magnet ditempelkan di atas permukaan rotor sehingga terdapat celah udara antar PM. Sedangkan pada tipe *embedded PM*, kutub magnet seolah-olah dimasukkan ke dalam rotor kemudian permukaan rotor dan magnet di buat rata.



Gambar 2.3 Tipe Pemasangan Magnet Pada Rotor

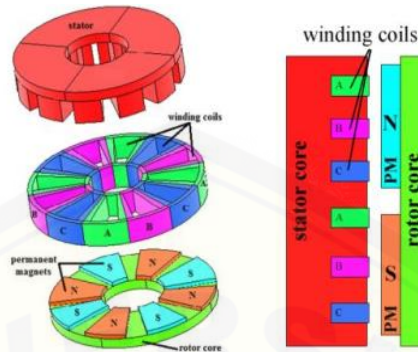
2.2.2 Tipe-Tipe Generator *Axial flux*

Dalam perkembangan mesin *axial flux* terdapat beberapa tipe dari generator *axial flux* yang dapat diaplikasikan sesuai dengan kebutuhan dan kegunaannya. Adapun beberapa tipe dari generator *axial flux*, yaitu:

1. Generator *axial flux* dengan rotor stator tunggal (cakram tunggal).

Seperti namanya, generator *axial flux* cakram tunggal memiliki masing-masing satu buah stator dan rotor. Biasanya rotor pada jenis ini berupa piringan besi

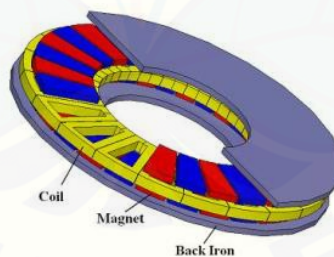
yang kuat dengan magnet yang menempel pada permukaannya. Jenis generator ini biasanya digunakan untuk kecepatan putar yang rendah seperti pada turbin angin.



Gambar 2.4 Generator *Axial Flux Permanent Magnet* Tipe Rotor dan Stator Tunggal (Sumber: A. Mahmoudi, 2011)

2. Generator *axial flux* dengan rotor ganda stator tunggal (eksternal rotor).

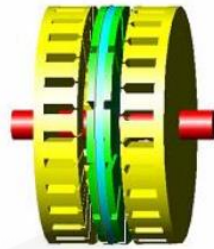
Tipe dari generator *axial flux* ini, stator diapit oleh dua buah rotor atau biasanya disebut eksternal stator. Terdapat dua jenis stator eksternal berdasarkan arah fluksnya yaitu tipe N-S dan tipe N-N. Pada tipe N-S arah fluks memotong kumparan secara lurus dari rotor satu ke kutub yang berlawanan pada rotor lainnya sedangkan pada tipe N-N arah fluksnya memotong kumparan dan akan kembali ke kutub yang berlawanan pada rotor yang sama (Maulana Akbar, 2012).



Gambar 2.5 Generator *Axial Flux Permanent Magnet* Rotor Ganda Tipe N-N *Coreless* (Sumber: B. Xia, 2010)

3. Generator *axial flux* dengan rotor tunggal stator ganda (*internal* rotor).

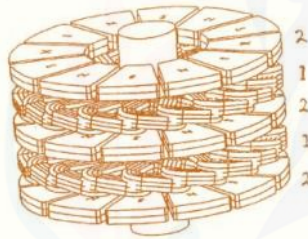
Tipe ini kebalikan dengan sebelumnya, bedanya rotor yang akan diapit oleh dua buah stator atau yang biasanya disebut internal rotor. Desain ini biasanya cocok digunakan untuk mesin yang memiliki momen inersia yang kecil. Tipe ini juga bisa divariasikan seperti tipe eksternal rotor.



Gambar 2.6 Generator *Axial Flux Permanent Magnet* Stator Ganda Rotor Tunggal

4. Generator *axial flux* dengan rotor stator banyak.

Generator *axial flux* ini memiliki rotor dan stator yang lebih dari dua. Biasanya tipe ini digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik yang lebih besar. Torsi yang dimiliki oleh generator *axial flux* ini cenderung lebih besar sehingga memiliki transfer panas yang tidak begitu baik. Untuk variasi generator *axial flux* ini masih sama dengan kedua tipe sebelumnya, yaitu tipe N-N dan tipe N-S.



Gambar 2.7 Generator *Axial Flux Permanent Magnet* Rotor Banyak Tipe *Coreless*

(Sumber: Yu-Ta Tu et al., 2004)

2.2.3 Prinsip Kerja Generator *Axial flux*

Pada dasarnya prinsip kerja dari generator *axial flux* sama dengan generator sinkron. Dimana rotor sebagai tempat magnet akan berputar dan menghasilkan medan magnet kemudian menginduksi kumparan yang ada pada stator. Pada generator *axial flux* tidak membutuhkan arus eksitasi dari luar karena medan magnet yang berasal dari *magnet permanent* bernilai konstan dan tidak membutuhkan eksitasi luar. 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 (A) menghasilkan fluks magnet (Φ) menghasilkan persamaan sebagai berikut (Chapman, 2002) :

$$\Phi = B_r A \cos \theta \dots\dots\dots (2.1)$$

dimana:

Φ = fluks medan magnet (Wb)

B_r = medan magnet rotor (T)

A = luas permukaan bidang penampang kumparan motor (m²)

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

Penggunaan *magnet permanent* pada rotor akan menghasilkan medan magnet yang konstan terhadap fungsi waktu. Dengan demikian, fluks magnet yang ditimbulkan pada stator juga akan bernilai konstan terhadap fungsi waktu. Namun, akibat generator mendapatkan energi mekanik maka akan terjadi perubahan pada sudut perpotongan antara garis gaya medan magnet rotor dengan bidang normal kumparan jangkar. Hukum induksi Faraday menyatakan bahwa apabila jumlah garis gaya yang melalui kumparan diubah, maka garis gaya listrik diinduksikan dalam kumparan itu. Besarnya garis gaya listrik yang diinduksikan berbanding lurus dengan laju perubahan jumlah garis gaya yang melalui kumparan.

$$E = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \dots\dots\dots (2.2)$$

dimana:

E = tegangan induksi (V)

N = jumlah lilitan

$\Delta\Phi$ = perubahan fluks (Wb)

Δt = perubahan waktu (t)

Persamaan frekuensi yang dihasilkan dari oleh generator aksial fluks adalah (Chapman, 2002)

$$f = \frac{np}{120} \dots\dots\dots (2.3)$$

dimana:

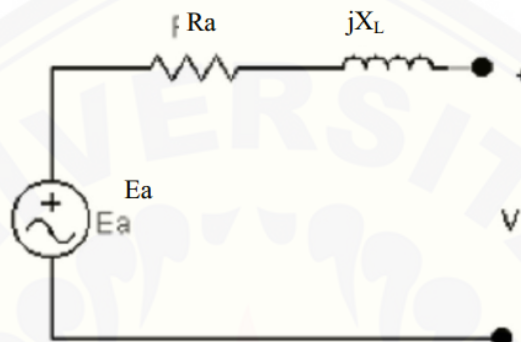
f = frekuensi (Hz)

n = Jumlah rotasi rotor (rpm)

p = Jumlah kutub

2.2.4 Rangkaian Ekivalen

Pada saat generator diputar pada kecepatan tertentu tanpa beban maka akan menghasilkan listrik akibat medan magnet. Tegangan induksi (E_a) yang dibangkitkan pada kumparan jangkar generator biasanya tidak sama dengan tegangan *output* pada generator. Tegangan induksi akan sama dengan tegangan *output* generator jika tidak ada arus yang mengalir pada jangkar mesin.



Gambar 2.8 Rangkaian Ekivalen Generator

Hubungan yang terjadi antara tegangan *output* generator dengan tegangan induksi (E_a) pada kumparan jangkar adalah:

$$E_a = V + I \cdot R_a + jI \cdot X_l \dots\dots\dots (2.4)$$

dimana:

- E_a = tegangan induksi (V)
- V = tegangan *output* generator (V)
- I = arus *output* generator (A)
- R_a = resistansi jangkar (Ω)
- X_l = resistansi induktif (Ω)

Akibat tidak adanya arus akibat kondisi generator tanpa beban, maka besarnya $I = 0$ A sehingga didapat $E_a = V$

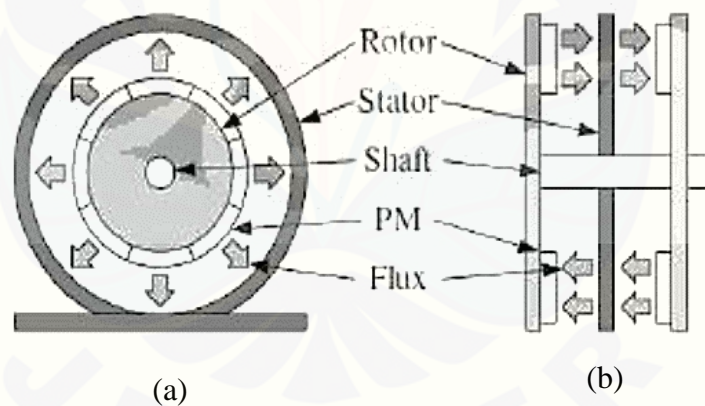
2.3 Perbandingan Antara Generator Aksial dengan Generator Radial

Pada umumnya, prinsip kerja dari generator aksial dan generator radial hampir sama. Perbedaan dari kedua jenis generator ini terletak pada arah fluks yang menembus statornya. Penyebaran fluks pada generator radial tidak semuanya tertangkap oleh kumparan stator, namun sebagian akan terbuang dan terlepas

sehingga menimbulkan rugi-rugi pada generator. Pada generator *axial flux*, penyebaran fluks mempunyai arah aksial ke arah kumparan stator sehingga fluks dapat ditangkap dengan baik oleh kumparan stator. Hal ini menjadikan generator *axial flux* memiliki rugi-rugi yang lebih sedikit daripada generator fluks radial. Pada sisi konstruksi dan massa, generator fluks radial memiliki konstruksi dan massa yang lebih besar dibandingkan dengan generator fluks radial.



Gambar 2.9 Topologi Generator (a) *Axial flux* (b) Fluks Radial
(Sumber: Velington de Aquino Neumann et al, 2014)



Gambar 2.10 Perbandingan Arah Fluks (a) Radial (b) Aksial
(Sumber: Maulana Akbar, 2012)

2.4 Magnet Permanen

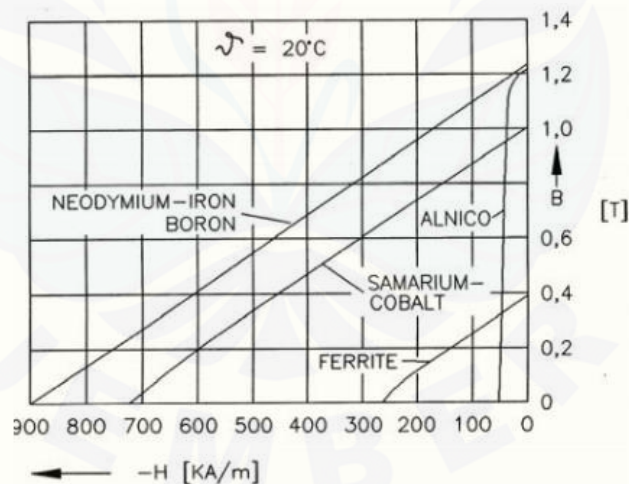
Magnet permanen adalah material di mana medan magnet dihasilkan oleh struktur internal dari material itu sendiri. Di dalam atom dan kristalnya memiliki kedua elektron dan inti atom. Baik nukleus dan elektron sendiri bertindak seperti magnet kecil, seperti potongan kecil muatan listrik yang berputar, dan memiliki medan magnet yang melekat pada partikel itu sendiri. Ada juga medan magnet yang

dihasilkan oleh orbit elektron ketika mereka bergerak di sekitar nukleus. Jadi medan magnet dari magnet permanen adalah jumlah putaran nuklir, elektron berputar dan orbit elektron itu sendiri. Dalam banyak materi, medan magnet menunjuk ke segala arah (acak). Tetapi dalam bahan-bahan tertentu, yang disebut feromagnet, semua putaran dan orbit elektron akan berbaris, menyebabkan bahan menjadi magnet. Ini adalah besi, kobalt, nikel. Magnet permanen dibatasi oleh struktur material.

Beberapa jenis magnet permanen yang banyak digunakan pada mesin elektrik atau motor listrik diantaranya yaitu:

- Alnicos (Al, Ni, Co, Fe)
- Ceramics (Ferrites), contoh : *Barium Ferrite* ($BaOx6Fe2O3$) dan *Strontium Ferrite* ($SrOx6Fe2O3$)
- Rare-earth materials Contoh : *Samarium-Cobalt* (SmCo) dan *Neodymium-Iron-Boron* (NdFeB).

Berikut ini pada gambar adalah kurva demagnetisasi perbedaan dari ketiga jenis magnet permanen diatas.



Gambar 2.11 Kurva Demagnetisasi Magnet Permanen

2.5 Medan Megnet

Medan magnet merupakan ruangan yang berada atau disekitar magnet yang gaya tarik atau menolaknya masih bisa dirasakan oleh magnet lain. Pada tahun 1820, Hans Christian Oersted menemukan bahwa di sekitar kawat berarus terdapat medan magnetik. Medan megnetik suatu solenoida diberikan oleh rumus:

$$B = \frac{\mu_0 i N}{2l} \dots\dots\dots (2.5)$$

dimana:

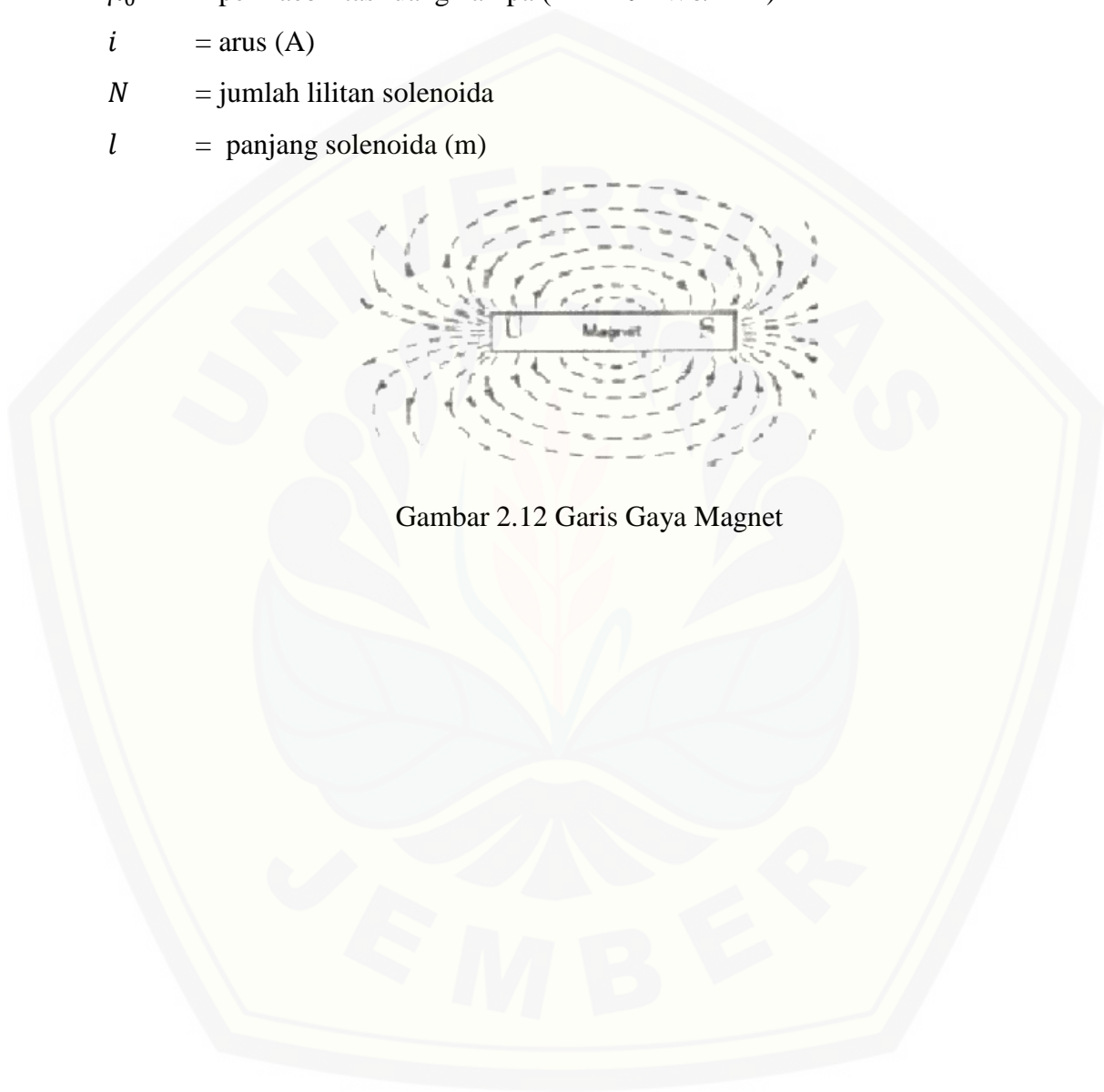
B = kuat medan magnet (Wb/m^2)

μ_0 = permeabilitas ruang hampa ($4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/A}\cdot\text{m}$)

i = arus (A)

N = jumlah lilitan solenoida

l = panjang solenoida (m)



Gambar 2.12 Garis Gaya Magnet

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

3.1.1 Tempat Penelitian

Adapun tempat penelitian, pengujian, dan analisis dilakukan secara umum dilakukan di:

tempat : Laboratorium Konversi Energi Listrik, Universitas Jember

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

3.1.2 Waktu Penelitian

Waktu penelitian dilakukan selama 4 bulan, yaitu pada bulan November 2018 sampai dengan bulan Februari 2019. Jadwal pelaksanaan penelitian seperti pada tabel berikut:

Tabel 3.1 Jadwal Pelaksanaan Penelitian

No	Kegiatan	Bulan															
		November				Desember				Januari				Februari			
1	Studi literatur	■	■	■	■												
2	Perancangan alat			■	■	■	■	■	■								
3	Melakukan pengujian									■	■	■	■				
4	Analisis data									■	■	■	■	■	■		
5	Pengambilan kesimpulan													■	■	■	■

3.2 Alat dan Bahan

Pada penelitian ini ada beberapa alat dan bahan yang digunakan meliputi perangkat lunak (*software*) dan perangkat keras (*hardware*). Adapun kegunaan dari perangkat lunak adalah untuk mendesain generator, sedangkan untuk perangkat keras digunakan untuk proses rancang bangun serta pengukurannya.

3.2.1 Perangkat lunak (*software*)

Berikut adalah perangkat lunak (*software*) yang digunakan pada penelitian ini, yaitu:

1. Perangkat lunak Microsoft Excel 2013, untuk membuat grafik persamaan sistematis parameter generator tipe *axial flux*.
2. Perangkat lunak Corel Draw X-7, untuk mendesain bentuk stator dan rotor guna menjaga kepresisian bentuk.
3. Perangkat lunak Solid Work, untuk membuat bentuk tiga dimensi (3D) dari generator tipe *axial flux*.

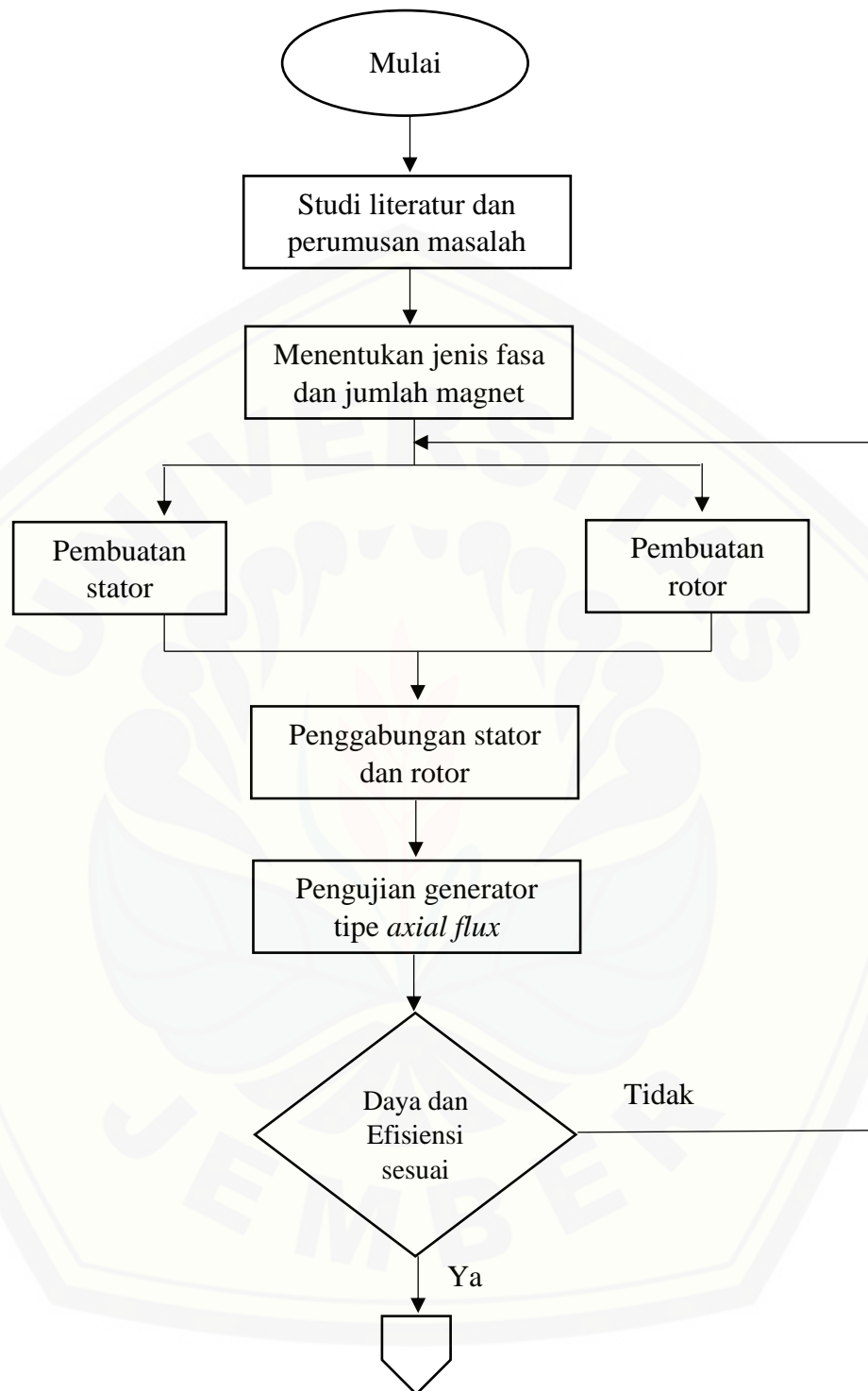
3.2.2 Perangkat keras (*hardware*)

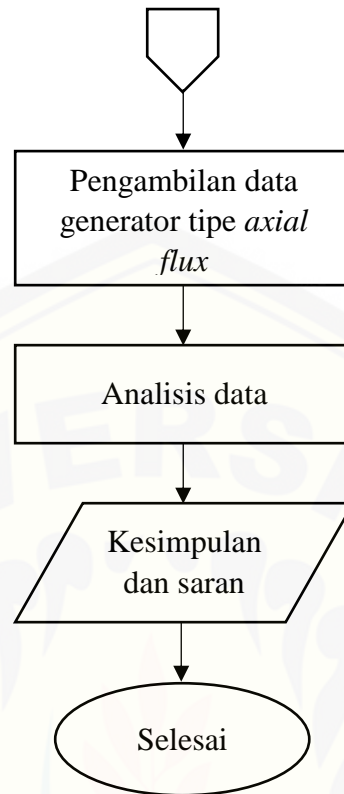
Berikut adalah perangkat keras (*hardware*) yang digunakan pada penelitian ini, yaitu:

1. Kawat email 0,2 mm
2. Akrilik 5 mm dan 3 mm
3. Magnet *Neodymium Iron Boron* (NdFeB) silinder 12x3 mm
4. Kabel pelangi
5. *Bearing*
6. Baut
7. Timah
8. Solder
9. Motor AC 1 fasa tipe HF-1026N.
10. Avometer
11. Tachometer
12. *Voltage Regulator*

3.3 Tahapan Penelitian

Dalam melakukan penelitian ini memiliki beberapa tahapan yang akan dilakukan guna memperoleh informasi yang akurat dan sistematis. Berikut ini adalah diagram alir (*flowchart*) rancangan dan tahapan yang akan dilakukan dalam penelitian ini, yaitu





Gambar 3.1 *Flowchart* Penelitian

Tahapan penelitian yang akan dilakukan dalam perancangan dan pembuatan generator DC tipe *axial flux* adalah sebagai berikut:

1. Studi literatur dan perumusan masalah

Tahapan ini dilakukan dengan mengumpulkan informasi yang menunjang dalam penelitian sekaligus pengembangannya. Informasi yang didapat akan dijadikan acuan untuk melakukan perancangan dan pembuatan generator tipe *axial flux* dan mendapatkan hasil penelitian yang maksimal.

2. Menentukan jenis fasa dan jumlah magnet

Jenis fasa dan jumlah magnet merupakan spesifikasi penting dalam perancangan dan pembuatan generator tipe *axial flux*. Generator tipe *axial flux* menggunakan 8 buah magnet permanen jenis magnet *Neodymium Iron Boron* (NdFeB) dengan diameter 1,2 cm dengan tebal 3 mm pada rotor dan 16 stator.

3. Pembuatan dan penggabungan rotor dan stator

Setelah ditentukannya spesifikasi dari generator tipe *axial flux* adalah mendesain rotor dan stator menggunakan *software* Corel Draw X-7 yang kemudian dicetak pada akrilik dengan tebal 5 mm untuk stator dan 3 mm untuk rotor.

4. Pengujian generator tipe *axial flux*

Pengujian yang dilakukan untuk mengetahui performa dari generator tipe *axial flux* sesuai dengan teori yang ada atau tidak. Pengujian menggunakan dua alat ukur yaitu avometer untuk mengukur tegangan dan arus dan tachometer untuk mengukur kecepatan putar rotor akibat dari berputarnya motor.

5. Pengambilan data generator tipe *axial flux*

Setelah generator tipe *axial flux* sudah berjalan dengan baik, maka pengambilan data dilakukan dengan menggunakan dua alat ukur sebelumnya. Parameter yang digunakan yaitu besarnya tegangan, arus, dan rpm.

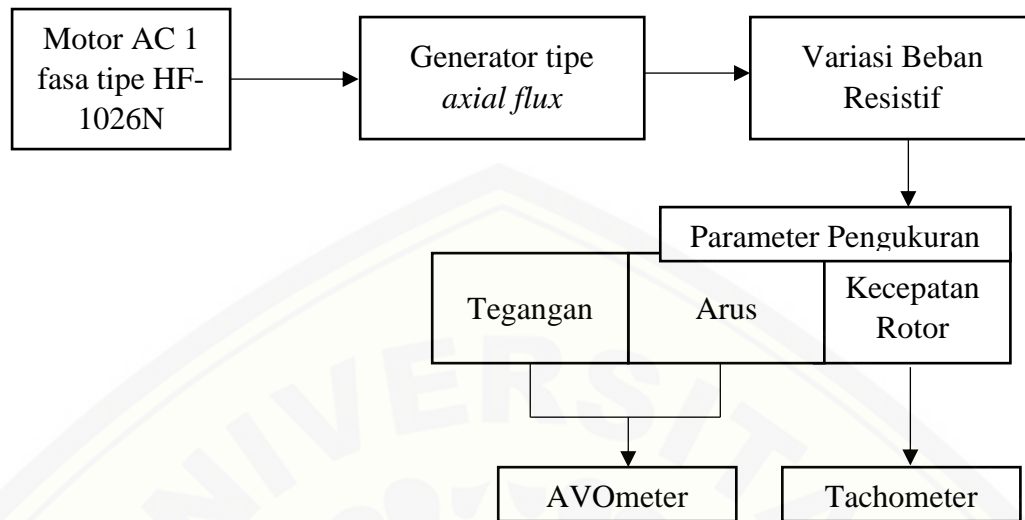
6. Analisis data

Setelah dilakukan pengujian dan pengambilan data, maka langkah selanjutnya yaitu membuat analisis data terhadap data yang telah didapatkan dari rancang bangun generator tipe *axial flux*. Analisis ini dilakukan untuk mengetahui performa dari generator tipe *axial flux* yang telah dirancang sebelumnya.

7. Kesimpulan dan saran

Setelah dilakukan analisis data dan pembuatan laporan, tahap selanjutnya adalah penarikan kesimpulan mengenai performa dari alat yang dibuat dan memberikan saran guna memperbaiki kekurangan dan pengembangan serta penyempurnaan penelitian lebih lanjut.

3.4 Blok Diagram dan Perancangan Sistem



Gambar 3.2 Blok Diagram Sistem

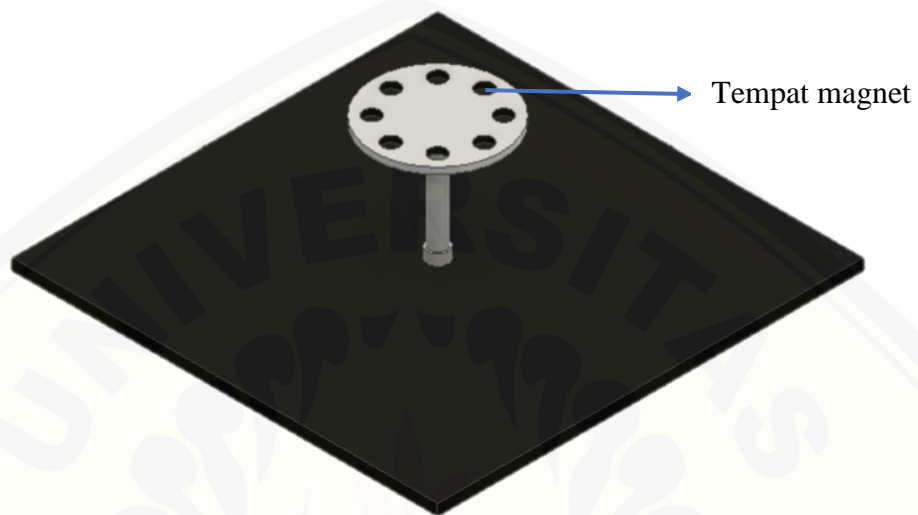
Gambar 3.2 merupakan blok diagram dari sistem kerja generator tipe *axial flux*. Energi mekanik yang digunakan untuk memutar rotor dari generator tipe *axial flux* yaitu dari dinamo motor mesin jahit.

Pada generator tipe *axial flux* menggunakan magnet permanen jenis magnet *Neodymium Iron Boron* (NdFeB) berjumlah 8 buah dengan 16 kumparan (stator) dimana tiap kumparan terdiri atas 600 lilitan kawat email. Konstruksi generator tipe *axial flux* menggunakan rotor tunggal dan stator ganda sehingga rotor dipasang diantara dua buah stator (celah udara ganda), hal ini diharapkan medan magnet pada kedua sisi magnet permanen yang dihasilkan tertangkap maksimal dan penyebaran fluks pada kumparan akan tertangkap maksimal pula.

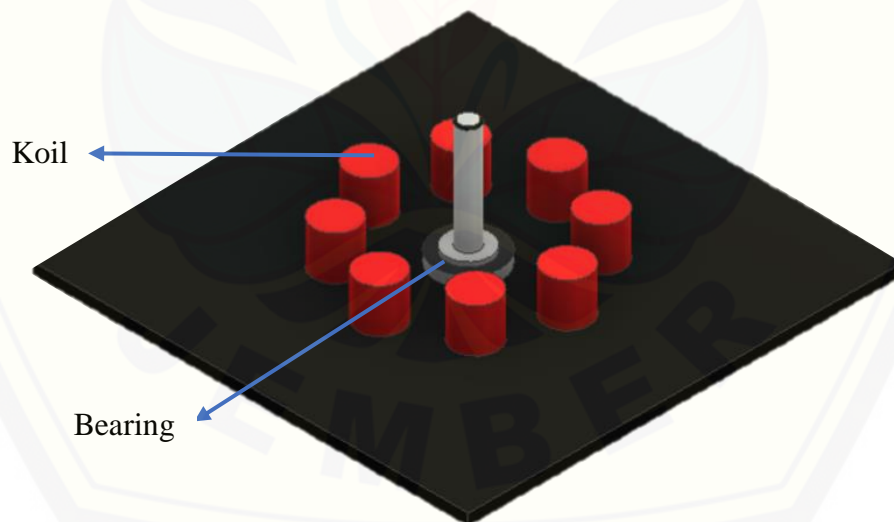
Pengujian pada generator tipe *axial flux* ini adalah untuk memperoleh parameter karakteristik tegangan, kecepatan, dan arus dengan menggunakan variasi beban resistif. Pengukuran parameter ini menggunakan alat ukur avometer untuk mengetahui arus dan tegangan dan tachometer untuk mengukur kecepatan putar dari rotor.

3.5 Perancangan Desain Alat

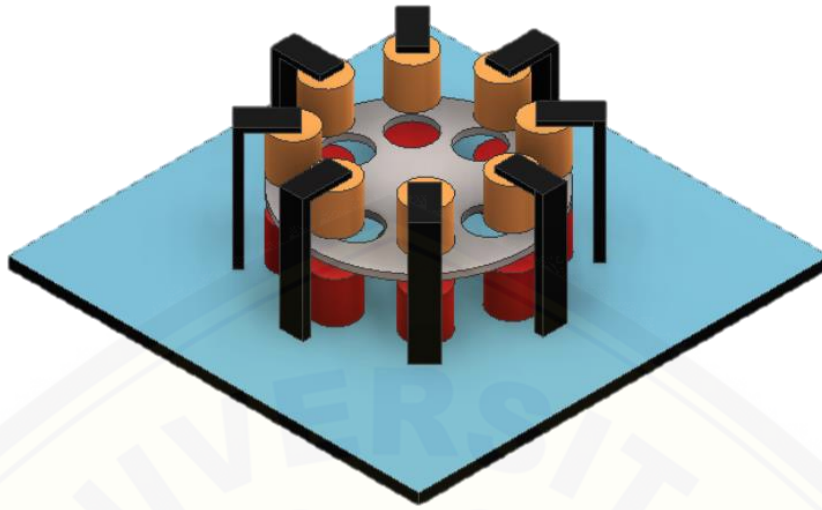
Pada perancangan generator tipe *axial flux* menggunakan magnet permanen *Neodymium Iron Boron* (NdFeB) berjumlah delapan buah. Ke delapan magnet permanen dengan memanfaatkan kutub utara menghadap ke arah bawah.



Gambar 3.3 Desain Rotor



Gambar 3.4 Desain Stator



Gambar 3.5 Desain Generator Aksial Fluks

3.6 Perancangan Rotor Generator *Axial flux*

3.6.1 Penentuan Magnet pada Rotor

Penentuan magnet permanen pada generator tipe *axial flux* ini sangat penting karena akan mempengaruhi kinerja dari generator tipe *axial flux* yang akan dirancang. Pada penelitian ini menggunakan magnet jenis *Neodymium Iron Boron* (NdFeB) berbentuk bulat dengan ukuran diameter 1.2 cm dan tebal 3 mm. Sehingga untuk menentukan nilai fluks magnet yang dihasilkan dapat menggunakan persamaan (Chapman, 2002):

$$\Phi = B_r A \cos\theta \dots\dots\dots (3.1)$$

dimana:

Φ = fluks medan magnet (Wb)

B_r = medan magnet rotor (T)

A = luas permukaan bidang penampang kumparan motor (m²)

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

Sedangkan untuk fluks maksimum magnet (Φ_{max}) dapat diketahui dengan persamaan :

$$\phi_{max} = A_{magn} \cdot B_{max} \dots\dots\dots (3.2)$$

dimana:

ϕ_{max} = fluks maksimum magnet (Wb)

A_{magn} = luasan medan magnet (m²)

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

dengan nilai besaran fluks maksimum yang melalui celah udara bisa diketahui dengan persamaan sebagai berikut :

$$B_{max} = B_r \cdot \frac{I_m}{I_m + \delta} \dots\dots\dots (3.3)$$

dimana:

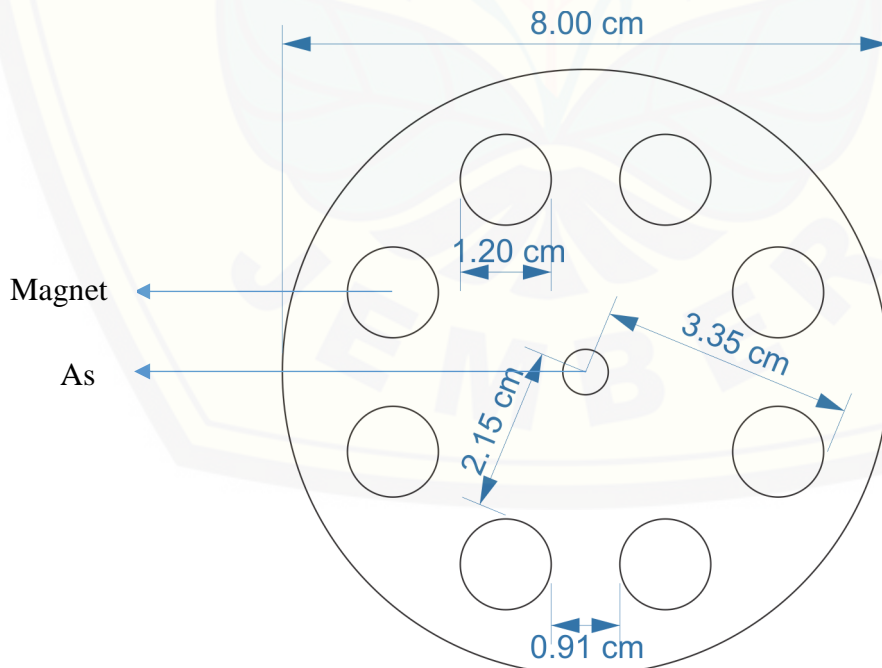
B_r = densitas fluks magnet (T)

I_m = tinggi magnet (m)

δ = lebar celah udara (m)

3.6.2 Dimensi Rotor

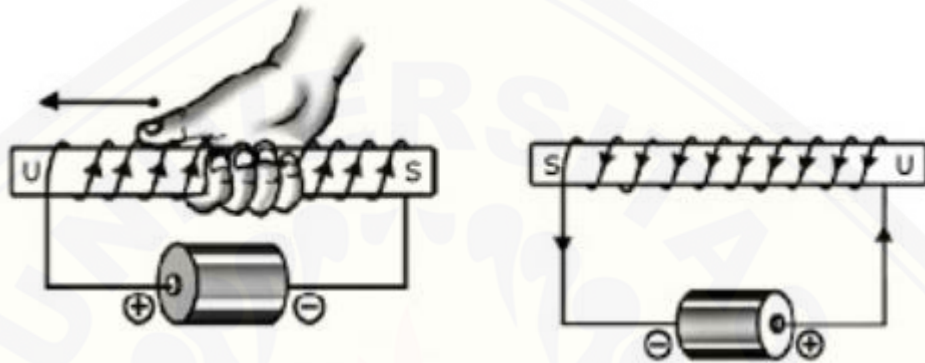
Pada perancangan rotor pada generator ini menggunakan akrilik dengan tebal 30 mm yang sebelumnya dibuat desain untuk menjaga kepresisian dari rotor. Ukuran yang digunakan yaitu:



Gambar 3.6 Dimensi Rotor 2D

3.7 Perancangan Stator Generator DC

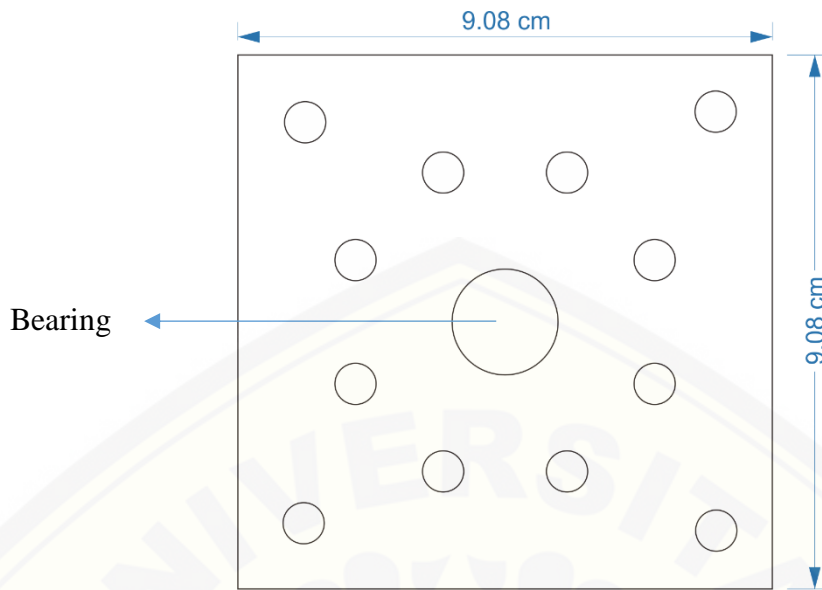
Pada penelitian, stator yang digunakan menggunakan selenoid atau magnet buatan. Pembuatan stator menggunakan kawat tembaga dengan diameter 0,2 mm dimana setiap koil memiliki jumlah lilitan sebanyak 600 lilitan. Jumlah koil yang digunakan berjumlah 16 buah sehingga total lilitan keseluruhannya yaitu 9600 lilitan.



Gambar 3.7 Kutub Utara Dengan Kaidah Tangan Kanan

(Sumber: Dwianto, 2012)

Pada kaidah tangan kanan, ibu jari menunjukkan kutub utara dan keempat jari lainnya menunjukkan aliran arus. Pada penelitian ini menggunakan kutub utara pada stator yang menghadap kutub selatan magnet dan menggunakan kutub selatan pada stator yang menghadap kutub utara magnet untuk menimbulkan GGL pada kumparan. Lilitan yang digunakan pada penelitian kali ini yaitu searah jarum jam dengan lilitan seri.



Gambar 3.8 Dimensi Stator 2D

3.8 Pengujian Generator Tipe *Axial flux*

Pengujian generator *axial flux* digunakan untuk mengetahui unjuk kerja dari generator *axial flux* itu sendiri. Beberapa pengujian yang akan dilakukan yaitu seperti frekuensi, tegangan pada GGL induksi, dan daya yang dihasilkan generator.

3.8.1 Frekuensi Generator Satu Fasa Tipe *Axial Flux*

Frekuensi bergantung pada kecepatan putar dan jumlah kutub pada generator. Maka dari itu, hubungan antara kecepatan putar dan jumlah kutub generator dapat dirumuskan pada persamaan berikut ini: (Chapman J. Stephen, 2012).

$$f = \frac{np}{120} \dots\dots\dots (3.4)$$

dimana:

- n = putaran (rpm)
- p = jumlah kutub magnet
- f = frekuensi (Hz)

3.8.2 Tegangan Pada GGL Induksi Generator Satu Fasa Tipe *Axial Flux*

Perpotongan medan magnet yang diakibatkan berputarnya rotor dalam pengaruh medan magnet menimbulkan tegangan induksi dengan persamaan:

$$E_a = 2\pi \cdot \frac{N_r}{60} \cdot \Phi_{max} \cdot N \dots\dots\dots (3.5)$$

dimana:

E_a = tegangan efektif induksi generator (V)

f = frekuensi (Hz)

Φ_{max} = fluks maksimum (Wb)

N_r = jumlah putaran (rpm)

N = jumlah lilitan

Sehingga didapatkan tegangan *output* dari generator tipe aksial fluks yaitu

$$V = E_a - I \cdot Z \dots\dots\dots (3.6)$$

dimana:

V = tegangan *output* generator (V)

E_a = tegangan efektif induksi generator (V)

I = arus (A)

Z = impedansi (Ω)

Impedansi didapatkan menggunakan rumus hubungan antara resistansi dengan induktansi, yaitu

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \dots\dots\dots (3.7)$$

$$X_L = 2\pi fL \dots\dots\dots (3.8)$$

dimana:

Z = impedansi (Ω)

R = resistansi (Ω)

X_L = reaktansi induktif (Ω)

L = induktansi (H)

3.8.3 Daya Output Generator Satu Fasa Tipe Axial Flux

Besar daya yang dihasilkan dari generator satu fasa tipe *axial flux* dapat diketahui dengan persamaan:

$$P_o = V \cdot I \dots\dots\dots (3.9)$$

dimana:

P_o = daya (W)

V = tegangan (V)

I = arus (A)

3.8.4 Menghitung Besar *Error* Persen

Perhitungan *error* persen diperlukan untuk mengetahui keakuratan data yang diambil (diukur) dengan hasil perhitungan. Perhitungan *error* persen yaitu:

$$\text{Error Percent} = \left| \frac{\text{Data teori} - \text{Data ukur}}{\text{Data teori}} \right| \times 100\% \dots\dots\dots (3.10)$$

3.8.5 Menghitung Efisiensi Generator

Perhitungan efisiensi dilakukan untuk mengetahui perbandingan antara daya *output* terhadap daya *input* generator. Generator akan semakin efisien jika hasil mendekati nilai 100%. Perhitungan efisiensi yaitu:

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \cdot 100\% \dots\dots\dots (3.11)$$

dimana:

η = efisiensi generator (%)

P_o = daya *output* generator (W)

P_i = daya *input* generator (W)

BAB 5. PENUTUP

Berdasarkan data hasil pengujian yang telah dilakukan mengenai generator *axial flux* satu fasa menggunakan *Neodymium Iron Boron* magnet (NdFeB) silinder dengan kutub searah (U-U) dapat ditarik kesimpulan dan saran yang berguna untuk penelitian lebih lanjut.

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan data hasil pengujian didapatkan kesimpulan bahwa:

1. Rancang bangun generator *axial flux* satu fasa menggunakan *Neodymium Iron Boron* magnet (NdFeB) silinder dengan kutub searah (U-U) menggunakan konstruksi stator ganda dengan jumlah kumparan 16 buah berinti besi yang masing-masing memiliki 600 lilitan dan terdapat 8 magnet NdFeB silinder tipe N52 telah berhasil dilakukan dimana didapatkan korelasi semakin kecil resistansi atau beban semakin bertambah maka kecepatan putar rotor akan semakin cepat dengan tegangan *output* generator konstan.
2. Daya dan efisiensi yang dihasilkan oleh generator *axial flux* satu fasa menggunakan *Neodymium Iron Boron* magnet (NdFeB) silinder dengan kutub searah (U-U) berdasarkan variasi beban adalah semakin banyak beban atau semakin kecil nilai resistansi maka daya dan efisiensi yang dihasilkan akan semakin besar dengan *output* tegangan konstan. Hal ini berhubungan dengan arus *output* yang mengalir pada beban yang semakin besar jika beban semakin bertambah atau resistansi berkurang, maka akan sesuai dengan Hukum Ohm dengan korelasi bahwa arus berbanding terbalik dengan resistansi. Dapat dilihat pada saat tegangan konstan 4,5 V dengan resistansi 500 Ω , arus *output* yang mengalir sebesar 0,0087 A dengan daya sebesar 0,039 W dan efisiensi sebesar 0,1450% sedangkan pada resistansi 1000 Ω , arus *output* yang mengalir sebesar 0,0044 A dengan daya sebesar 0,020 W dan efisiensi sebesar 0,1165% memiliki sebesar 0,3224% sedangkan efisiensi pada saat beban 2000 Ω memiliki besar 0,1768%.

5.2 Saran

Pada penelitian tentang generator *axial flux* satu fasa menggunakan *Neodymium Iron Boron* magnet (NdFeB) silinder dengan kutub searah (U-U) terdapat saran untuk penelitian selanjutnya, yaitu:

1. Dalam perhitungan efisiensi diperlukan pengukuran mengenai daya *losses* pada generator seperti *losses* pada kawat tembaga, *losses* pada inti besi, dan *losses* pada torsi untuk mendapatkan hasil data yang maksimal.
2. Penggantian magnet *Neodymium Iron Boron* dengan magnet yang memiliki medan magnet lebih kecil seperti *Ferrite* dipertimbangkan guna menambah efisiensi generator sehingga daya motor pada *prime mover* dapat diperkecil.
3. Pada penelitian lebih lanjut dapat diterapkan pada pembangkit listrik aplikatif seperti dikopel dengan kincir angin.

DAFTAR PUSTAKA

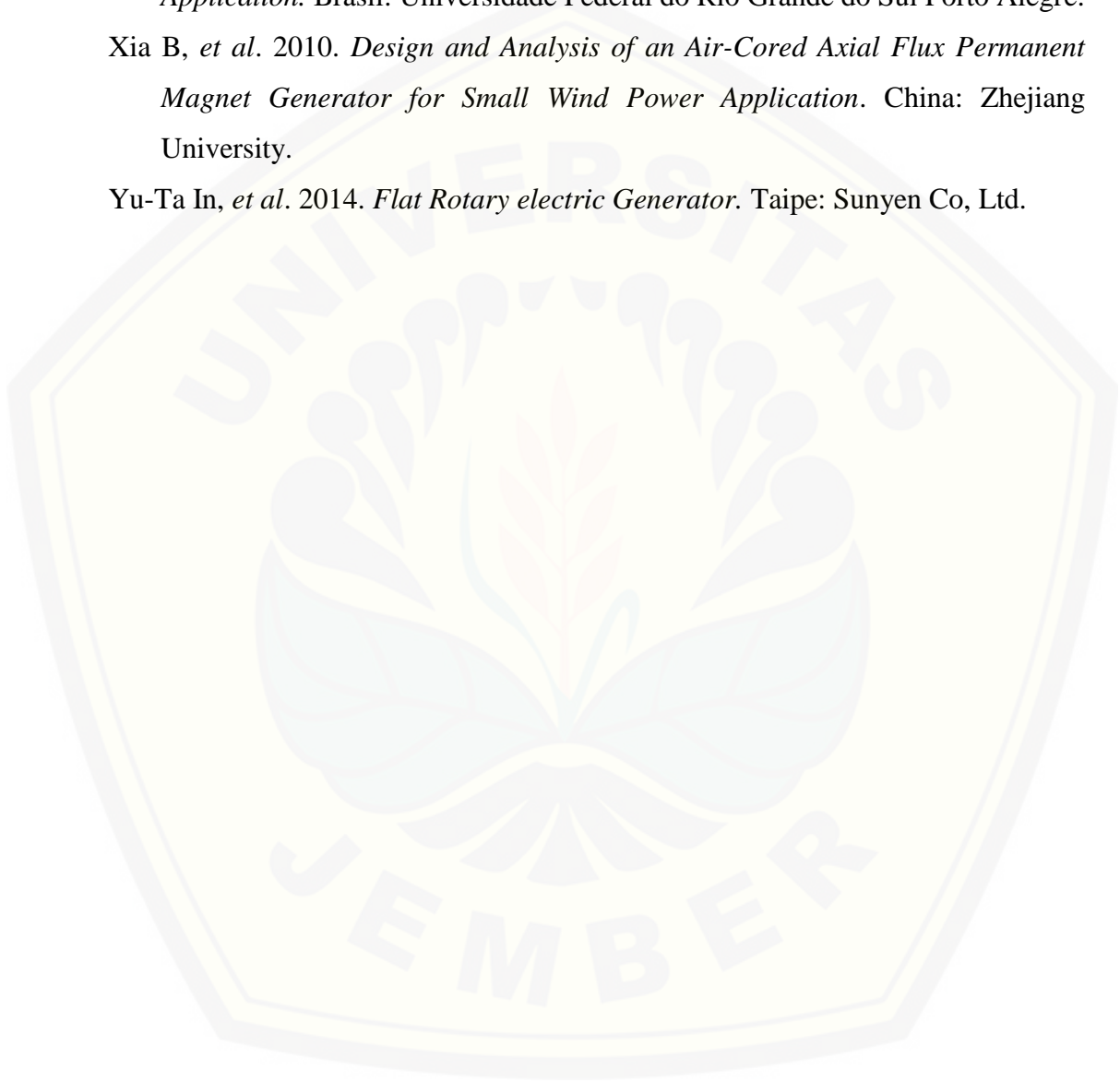
- Ahmad, Suhairi Rizuan Che *et al.* 2017. *Modeling and Analysis of Double Stator Slotted Rotor Permanent Magnet Generator*. Energies MDPI, doi:10.3390/en10030411 www.mdpi.com/journal/energies
- Akbar, Maulana. 2012. *Rancang Bangun Generator Turbin Angin Axial Tiga Fasa Untuk Kecepatan Angin Rendah*. Skripsi. Depok: Universitas Indonesia.
- Ani S. O., *et al.* 2010. *Performance Of Axial Flux Permanent Magnet Generator For Human Power Application*. The Netherlands: Delft University of Technology. vol., no., pp.4165-4170, 12-16 Sept. 2010
- Chapman, Stephen J. 2012. *Electric Machinery Fundamentals - 5th ed.* McGraw-Hill Companies: New York.
- Chen, Yicheng, *et al.* 2004. *PM Wind Generator Comparison Different Topologies*. USA: Clarkson University.
- Erol Kurt and Halil Gör. 2014. *Electromagnetic Design of a New Axial Flux Generator*. Gazi University Ankara: Turki. ECAI 2014 - International Conference – 6th Edition Electronics, Computers and Artificial Intelligence. 978-1-4799-5479-7
- Fajar, Abdul. 2017. *Rancang Bangun Generator Sinkron Axial Flux Permanent Magnet 1500 Watt*.
- Mohmoudi, *et al.* 2011. *Axial-Flux Permanent-Magnet Machine Modeling, Design, Simulation, and analysis*. Malaysia: Universitas Malaysia.
- Ramadhan, Jarekson. 2011. *Studi Jarak Antar Rotor Magnet Permanen pada Generator Sinkron Magnet Permanen Fluks Aksial Tanpa Inti Stator*. Skripsi. Depok: Universitas Indonesia:
- Ridwan, Abrar, *et al.* 2008. *Pengembangan Generator Mini Dengan Menggunakan Magnet Permanen*. Depok: Universitas Indonesia
- Setia, Puja. 2017. *Rancang Bangun Mini Generator Fluks Aksial 1 Fasa Putaran Rendah Menggunakan Neodymium Magnet (NdFeB) Berbasis Multi Cakram*. UMRAH.

Setiawan, Ade. 2016. *Desain Generator Linier Magnet Permanen Jenis Neodymium*. Surakarta: Universitas Muhammadiyah.

Velington de Aquino Neumann and Roberto Petry Homrich. 2014. *Comparison Between Radial And Axial Permanent Magnet Generators For Low Speed Application*. Brasil: Universidade Federal do Rio Grande do Sul Porto Alegre.

Xia B, et al. 2010. *Design and Analysis of an Air-Cored Axial Flux Permanent Magnet Generator for Small Wind Power Application*. China: Zhejiang University.

Yu-Ta In, et al. 2014. *Flat Rotary electric Generator*. Taipe: Sunyen Co, Ltd.



LAMPIRAN 1

A. Perhitungan kerapatan fluks magnet

$$\begin{aligned} B_{max} &= B_r \cdot \frac{I_m}{I_m + \delta} \\ &= 1,43 \cdot \frac{0,003}{0,003 + 0,0037} \\ &= 0,640 \text{ T} \end{aligned}$$

B. Perhitungan fluks magnet

$$\begin{aligned} \phi_{max} &= A_{magn} \cdot B_{max} \\ &= \pi r^2 \cdot B_{max} \\ &= (\pi \cdot (0,006)^2) \cdot 0,640 \\ &= 0,0001131 \text{ Wb} \end{aligned}$$

C. Perhitungan tegangan *output* generator

a. Saat tegangan *output* generator konstan 4,5 V

1. Saat beban 400 Ω

i. Perhitungan frekuensi

$$\begin{aligned} f &= \frac{np}{120} \\ &= \frac{1715 \cdot 16}{120} \\ &= 228,667 \text{ Hz} \end{aligned}$$

ii. Perhitungan impedansi

$$\begin{aligned} X_L &= 2\pi fL \\ &= 2\pi \cdot 228,667 \cdot 0,1127 \\ &= 168,388 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{R^2 + X_L^2} \\ &= \sqrt{232,9^2 + 168,388^2} \\ &= 287,397 \Omega \end{aligned}$$

iii. Perhitungan tegangan *output* generator

$$\begin{aligned} E_a &= 2\pi \cdot \frac{N_r}{60} \cdot \Phi_{max} \cdot N \\ &= 2\pi \cdot \frac{1715}{60} \cdot 0,0001131 \cdot 600 \\ &= 7,803 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V &= E_a - I \cdot Z \\ &= 7,803 - 0,0106 \cdot 287,397 \\ &= 4,757 \text{ V} \end{aligned}$$

iv. Perhitungan eror persen

$$\begin{aligned} \text{Error Percent} &= \left| \frac{\text{Data teori} - \text{Data ukur}}{\text{Data teori}} \right| \times 100\% \\ &= \left| \frac{4,757 - 4,5}{4,757} \right| \times 100\% \\ &= 5,401 \% \end{aligned}$$

v. Perhitungan daya *output* generator

$$\begin{aligned} P_o &= V \cdot I \\ &= 4,5 \cdot 0,0106 \\ &= 0,048 \text{ W} \end{aligned}$$

vi. Perhitungan daya *input* motor

$$\begin{aligned} P_i &= V \cdot I \\ &= 98 \cdot 0,3 \\ &= 29,40 \text{ W} \end{aligned}$$

vii. Perhitungan efisiensi generator

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_o}{P_i} \cdot 100\% \\ &= \frac{0,048}{29,40} \cdot 100\% \\ &= 0,1622 \% \end{aligned}$$

2. Saat beban 500 Ω

i. Perhitungan frekuensi

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

$$= \frac{1586 \cdot 16}{120}$$

$$= 211,467 \text{ Hz}$$

ii. Perhitungan impedansi

$$X_L = 2\pi fL$$

$$= 2\pi \cdot 211,467 \cdot 0,1127$$

$$= 155,722 \Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

$$= \sqrt{232,9^2 + 155,722^2}$$

$$= 280,164 \Omega$$

iii. Perhitungan tegangan *output* generator

$$E_a = 2\pi \cdot \frac{N_r}{60} \cdot \Phi_{max} \cdot N$$

$$= 2\pi \cdot \frac{1586}{60} \cdot 0,0001131 \cdot 600$$

$$= 7,216 \text{ V}$$

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

$$= 7,216 - 0,0087 \cdot 280,164$$

$$= 4,779 \text{ V}$$

iv. Perhitungan eror persen

$$\text{Error Percent} = \left| \frac{\text{Data teori} - \text{Data ukur}}{\text{Data teori}} \right| \times 100\%$$

$$= \left| \frac{4,779 - 4,5}{4,779} \right| \times 100\%$$

$$= 5,837 \%$$

v. Perhitungan daya *output* generator

$$P_o = V \cdot I$$

$$= 4,5 \cdot 0,0087$$

$$= 0,039 \text{ W}$$

vi. Perhitungan daya *input* motor

$$P_i = V \cdot I$$

$$= 90 \cdot 0,3$$

$$= 27 W$$

vii. Perhitungan efisiensi generator

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{P_o}{P_i} \cdot 100\% \\ &= \frac{0,048}{27} \cdot 100\% \\ &= 0,1450 \%\end{aligned}$$

3. Saat beban $666,667 \Omega$

i. Perhitungan frekuensi

$$\begin{aligned}f &= \frac{np}{120} \\ &= \frac{1363 \cdot 16}{120} \\ &= 181,733 Hz\end{aligned}$$

ii. Perhitungan impedansi

$$\begin{aligned}X_L &= 2\pi fL \\ &= 2\pi \cdot 181,733 \cdot 0,1127 \\ &= 133,826 \Omega \\ Z &= \sqrt{R^2 + X_L^2} \\ &= \sqrt{232,9^2 + 122,826^2} \\ &= 268,611 \Omega\end{aligned}$$

iii. Perhitungan tegangan *output* generator

$$\begin{aligned}E_a &= 2\pi \cdot \frac{N_r}{60} \cdot \Phi_{max} \cdot N \\ &= 2\pi \cdot \frac{1363}{60} \cdot 0,0001131 \cdot 600 \\ &= 6,202 V\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}V &= E_a - I \cdot Z \\ &= 6,202 - 0,0067 \cdot 268,611 \\ &= 4,402 V\end{aligned}$$

iv. Perhitungan eror persen

$$\begin{aligned} \text{Error Percent} &= \left| \frac{\text{Data teori} - \text{Data ukur}}{\text{Data teori}} \right| \times 100\% \\ &= \left| \frac{4,402 - 4,5}{4,402} \right| \times 100\% \\ &= 2,226 \% \end{aligned}$$

v. Perhitungan daya *output* generator

$$\begin{aligned} P_o &= V \cdot I \\ &= 4,5 \cdot 0,0067 \\ &= 0,030 \text{ W} \end{aligned}$$

vi. Perhitungan daya *input* motor

$$\begin{aligned} P_i &= V \cdot I \\ &= 80 \cdot 0,3 \\ &= 24 \text{ W} \end{aligned}$$

vii. Perhitungan efisiensi generator

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_o}{P_i} \cdot 100\% \\ &= \frac{0,030}{24} \cdot 100\% \\ &= 0,1256 \% \end{aligned}$$

4. Saat beban 1000 Ω

i. Perhitungan frekuensi

$$\begin{aligned} f &= \frac{np}{120} \\ &= \frac{1215 \cdot 16}{120} \\ &= 162 \text{ Hz} \end{aligned}$$

ii. Perhitungan impedansi

$$\begin{aligned} X_L &= 2\pi fL \\ &= 2\pi \cdot 162 \cdot 0,1127 \\ &= 119,295 \Omega \end{aligned}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

$$= \sqrt{232,9^2 + 119,295^2}$$

$$= 261,675 \Omega$$

iii. Perhitungan tegangan *output* generator

$$E_a = 2\pi \cdot \frac{N_r}{60} \cdot \Phi_{max} \cdot N$$

$$= 2\pi \cdot \frac{1215}{60} \cdot 0,0001131 \cdot 600$$

$$= 5,528 V$$

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

$$= 5,528 - 0,0044 \cdot 261,675$$

$$= 4,377 V$$

iv. Perhitungan eror persen

$$Error\ Percent = \left| \frac{Data\ teori - Data\ ukur}{Data\ teori} \right| \times 100\%$$

$$= \left| \frac{4,377 - 4,5}{4,377} \right| \times 100\%$$

$$= 2,812 \%$$

v. Perhitungan daya *output* generator

$$P_o = V \cdot I$$

$$= 4,5 \cdot 0,0044$$

$$= 0,020 W$$

vi. Perhitungan daya *input* motor

$$P_i = V \cdot I$$

$$= 85 \cdot 0,2$$

$$= 17 W$$

vii. Perhitungan efisiensi generator

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \cdot 100\%$$

$$= \frac{0,020}{17} \cdot 100\%$$

$$= 0,1165 \%$$

5. Saat beban 2000Ω

i. Perhitungan frekuensi

$$\begin{aligned} f &= \frac{np}{120} \\ &= \frac{1122 \cdot 16}{120} \\ &= 149,6 \text{ Hz} \end{aligned}$$

ii. Perhitungan impedansi

$$\begin{aligned} X_L &= 2\pi fL \\ &= 2\pi \cdot 149,6 \cdot 0,1127 \\ &= 110,164 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{R^2 + X_L^2} \\ &= \sqrt{232,9^2 + 110,164^2} \\ &= 257,640 \Omega \end{aligned}$$

iii. Perhitungan tegangan *output* generator

$$\begin{aligned} E_a &= 2\pi \cdot \frac{N_r}{60} \cdot \Phi_{max} \cdot N \\ &= 2\pi \cdot \frac{1122}{60} \cdot 0,0001131 \cdot 600 \\ &= 5,105 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V &= E_a - I \cdot Z \\ &= 5,105 - 0,0022 \cdot 257,640 \\ &= 4,538 \text{ V} \end{aligned}$$

iv. Perhitungan eror persen

$$\begin{aligned} \text{Error Percent} &= \left| \frac{\text{Data teori} - \text{Data ukur}}{\text{Data teori}} \right| \times 100\% \\ &= \left| \frac{4,538 - 4,5}{4,538} \right| \times 100\% \\ &= 0,845 \% \end{aligned}$$

v. Perhitungan daya *output* generator

$$\begin{aligned} P_o &= V \cdot I \\ &= 4,5 \cdot 0,0022 \end{aligned}$$

$$= 0,010 \text{ W}$$

vi. Perhitungan daya *input* motor

$$\begin{aligned} P_i &= V \cdot I \\ &= 70 \cdot 0,2 \\ &= 14 \text{ W} \end{aligned}$$

vii. Perhitungan efisiensi generator

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_o}{P_i} \cdot 100\% \\ &= \frac{0,010}{14} \cdot 100\% \\ &= 0,0707 \% \end{aligned}$$

b. Saat tegangan *output* generator konstan 6 V

1. Saat beban 400Ω

i. Perhitungan frekuensi

$$\begin{aligned} f &= \frac{np}{120} \\ &= \frac{2347 \cdot 16}{120} \\ &= 312,933 \text{ Hz} \end{aligned}$$

ii. Perhitungan impedansi

$$\begin{aligned} X_L &= 2\pi fL \\ &= 2\pi \cdot 312,933 \cdot 0,1127 \\ &= 230,441 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{R^2 + X_L^2} \\ &= \sqrt{232,9^2 + 230,441^2} \\ &= 327,636 \Omega \end{aligned}$$

iii. Perhitungan tegangan *output* generator

$$\begin{aligned} E_a &= 2\pi \cdot \frac{N_r}{60} \cdot \Phi_{max} \cdot N \\ &= 2\pi \cdot \frac{2347}{60} \cdot 0,0001131 \cdot 600 \end{aligned}$$

$$= 10,679 \text{ V}$$

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

$$= 10,679 - 0,01489 \cdot 327,636$$

$$= 5,800 \text{ V}$$

iv. Perhitungan eror persen

$$\text{Error Percent} = \left| \frac{\text{Data teori} - \text{Data ukur}}{\text{Data teori}} \right| \times 100\%$$

$$= \left| \frac{5,8 - 6}{5,8} \right| \times 100\%$$

$$= 3,441 \%$$

v. Perhitungan daya *output* generator

$$P_o = V \cdot I$$

$$= 6 \cdot 0,01489$$

$$= 0,089 \text{ W}$$

vi. Perhitungan daya *input* motor

$$P_i = V \cdot I$$

$$= 100 \cdot 0,3$$

$$= 30 \text{ W}$$

vii. Perhitungan efisiensi generator

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \cdot 100\%$$

$$= \frac{0,089}{30} \cdot 100\%$$

$$= 0,3978 \%$$

2. Saat beban 500Ω

i. Perhitungan frekuensi

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

$$= \frac{2126 \cdot 16}{120}$$

$$= 283,467 \text{ Hz}$$

ii. Perhitungan impedansi

$$X_L = 2\pi fL$$

$$= 2\pi \cdot 283,467 \cdot 0,1127$$

$$= 208,742 \Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

$$= \sqrt{232,9^2 + 208,742^2}$$

$$= 312,755 \Omega$$

iii. Perhitungan tegangan *output* generator

$$E_a = 2\pi \cdot \frac{N_r}{60} \cdot \Phi_{max} \cdot N$$

$$= 2\pi \cdot \frac{2126}{60} \cdot 0,0001131 \cdot 600$$

$$= 9,673 V$$

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

$$= 9,673 - 0,01205 \cdot 312,755$$

$$= 5,905 V$$

iv. Perhitungan eror persen

$$Error\ Percent = \left| \frac{Data\ teori - Data\ ukur}{Data\ teori} \right| \times 100\%$$

$$= \left| \frac{5,905 - 6}{5,905} \right| \times 100\%$$

$$= 1,614 \%$$

v. Perhitungan daya *output* generator

$$P_o = V \cdot I$$

$$= 6 \cdot 0,01205$$

$$= 0,072 W$$

vi. Perhitungan daya *input* motor

$$P_i = V \cdot I$$

$$= 100 \cdot 0,3$$

$$= 30 W$$

vii. Perhitungan efisiensi generator

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \cdot 100\%$$

$$= \frac{0,072}{30} \cdot 100\%$$

$$= 0,2410 \%$$

3. Saat beban $666,667 \Omega$

i. Perhitungan frekuensi

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

$$= \frac{1965 \cdot 16}{120}$$

$$= 262 \text{ Hz}$$

ii. Perhitungan impedansi

$$X_L = 2\pi fL$$

$$= 2\pi \cdot 262 \cdot 0,1127$$

$$= 192,934 \Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

$$= \sqrt{232,9^2 + 192,934^2}$$

$$= 302,433 \Omega$$

iii. Perhitungan tegangan *output* generator

$$E_a = 2\pi \cdot \frac{N_r}{60} \cdot \Phi_{max} \cdot N$$

$$= 2\pi \cdot \frac{1965}{60} \cdot 0,0001131 \cdot 600$$

$$= 8,941 \text{ V}$$

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

$$= 8,941 - 0,00928 \cdot 302,433$$

$$= 6,134 \text{ V}$$

iv. Perhitungan eror persen

$$\text{Error Percent} = \left| \frac{\text{Data teori} - \text{Data ukur}}{\text{Data teori}} \right| \times 100\%$$

$$= \left| \frac{6,134 - 6}{6,134} \right| \times 100\%$$

$$= 2,188 \%$$

- v. Perhitungan daya *output* motor

$$\begin{aligned}P_o &= V.I \\ &= 6 . 0,00928 \\ &= 0,056 \text{ W}\end{aligned}$$

- vi. Perhitungan daya *input* motor

$$\begin{aligned}P_i &= V.I \\ &= 90 . 0,3 \\ &= 27 \text{ W}\end{aligned}$$

- vii. Perhitungan efisiensi generator

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{P_o}{P_i} . 100\% \\ &= \frac{0,056}{27} . 100\% \\ &= 0,2062 \%\end{aligned}$$

4. Saat beban 1000Ω

- i. Perhitungan frekuensi

$$\begin{aligned}f &= \frac{np}{120} \\ &= \frac{1859 . 16}{120} \\ &= 247,867 \text{ Hz}\end{aligned}$$

- ii. Perhitungan impedansi

$$\begin{aligned}X_L &= 2\pi fL \\ &= 2\pi . 1859 . 0,1127 \\ &= 182,526 \Omega\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Z &= \sqrt{R^2 + X_L^2} \\ &= \sqrt{232,9^2 + 182,526^2} \\ &= 295,902 \Omega\end{aligned}$$

- iii. Perhitungan tegangan *output* generator

$$E_a = 2\pi . \frac{N_r}{60} . \Phi_{max} . N$$

$$= 2\pi \cdot \frac{1859}{60} \cdot 0,0001131 \cdot 600$$

$$= 8,459 \text{ V}$$

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

$$= 8,459 - 0,00773 \cdot 295,902$$

$$= 6,171 \text{ V}$$

iv. Perhitungan eror persen

$$\text{Error Percent} = \left| \frac{\text{Data teori} - \text{Data ukur}}{\text{Data teori}} \right| \times 100\%$$

$$= \left| \frac{6,171 - 6}{6,171} \right| \times 100\%$$

$$= 2,774 \%$$

v. Perhitungan daya *output* generator

$$P_o = V \cdot I$$

$$= 6 \cdot 0,00773$$

$$= 0,046 \text{ W}$$

vi. Perhitungan daya *input* motor

$$P_i = V \cdot I$$

$$= 80 \cdot 0,3$$

$$= 24 \text{ W}$$

vii. Perhitungan efisiensi generator

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \cdot 100\%$$

$$= \frac{0,046}{24} \cdot 100\%$$

$$= 0,1933 \%$$

5. Saat beban 10Ω

i. Perhitungan frekuensi

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

$$= \frac{1562 \cdot 16}{120}$$

$$= 208,267 \text{ Hz}$$

ii. Perhitungan impedansi

$$\begin{aligned} X_L &= 2\pi fL \\ &= 2\pi \cdot 208,267 \cdot 0,1127 \\ &= 153,365 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{R^2 + X_L^2} \\ &= \sqrt{232,9^2 + 153,365^2} \\ &= 278,861 \Omega \end{aligned}$$

iii. Perhitungan tegangan *output* generator

$$\begin{aligned} E_a &= 2\pi \cdot \frac{N_r}{60} \cdot \Phi_{max} \cdot N \\ &= 2\pi \cdot \frac{1562}{60} \cdot 0,0001131 \cdot 600 \\ &= 7,107 V \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V &= E_a - I \cdot Z \\ &= 7,107 - 0,00311 \cdot 278,861 \\ &= 6,240 V \end{aligned}$$

iv. Perhitungan eror persen

$$\begin{aligned} \text{Error Percent} &= \left| \frac{\text{Data teori} - \text{Data ukur}}{\text{Data teori}} \right| \times 100\% \\ &= \left| \frac{6,240 - 6}{6,240} \right| \times 100\% \\ &= 3,845 \% \end{aligned}$$

v. Perhitungan daya *output* generator

$$\begin{aligned} P_o &= V \cdot I \\ &= 6 \cdot 0,00311 \\ &= 0,019 W \end{aligned}$$

vi. Perhitungan daya *input* motor

$$\begin{aligned} P_i &= V \cdot I \\ &= 77 \cdot 0,3 \\ &= 23,10 W \end{aligned}$$

vii. Perhitungan efisiensi generator

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{P_o}{P_i} \cdot 100\% \\ &= \frac{0,019}{23,10} \cdot 100\% \\ &= 0,0808 \%\end{aligned}$$

c. Saat tegangan *output* generator konstan 8 V

1. Saat beban 400 Ω

i. Perhitungan frekuensi

$$\begin{aligned}f &= \frac{np}{120} \\ &= \frac{3543 \cdot 16}{120} \\ &= 472,400 \text{ Hz}\end{aligned}$$

ii. Perhitungan impedansi

$$\begin{aligned}X_L &= 2\pi fL \\ &= 2\pi \cdot 472,400 \cdot 0,1127 \\ &= 347,870 \Omega\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Z &= \sqrt{R^2 + X_L^2} \\ &= \sqrt{232,9^2 + 347,870^2} \\ &= 418,636 \Omega\end{aligned}$$

iii. Perhitungan tegangan *output* generator

$$\begin{aligned}E_a &= 2\pi \cdot \frac{N_r}{60} \cdot \Phi_{max} \cdot N \\ &= 2\pi \cdot \frac{3543}{60} \cdot 0,0001131 \cdot 600 \\ &= 16,121 \text{ V}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}V &= E_a - I \cdot Z \\ &= 16,121 - 0,0202 \cdot 418,636 \\ &= 7,664 \text{ V}\end{aligned}$$

iv. Perhitungan eror persen

$$\begin{aligned} \text{Error Percent} &= \left| \frac{\text{Data teori} - \text{Data ukur}}{\text{Data teori}} \right| \times 100\% \\ &= \left| \frac{7,664 - 8}{7,664} \right| \times 100\% \\ &= 4,380 \% \end{aligned}$$

v. Perhitungan daya *output* generator

$$\begin{aligned} P_o &= V \cdot I \\ &= 8 \cdot 0,0202 \\ &= 0,162 \text{ W} \end{aligned}$$

vi. Perhitungan daya *input* motor

$$\begin{aligned} P_i &= V \cdot I \\ &= 110 \cdot 0,3 \\ &= 33 \text{ W} \end{aligned}$$

vii. Perhitungan efisiensi generator

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_o}{P_i} \cdot 100\% \\ &= \frac{0,162}{33} \cdot 100\% \\ &= 0,4897 \% \end{aligned}$$

2. Saat beban 500Ω

i. Perhitungan frekuensi

$$\begin{aligned} f &= \frac{np}{120} \\ &= \frac{3154 \cdot 16}{120} \\ &= 420,533 \text{ Hz} \end{aligned}$$

ii. Perhitungan impedansi

$$\begin{aligned} X_L &= 2\pi fL \\ &= 2\pi \cdot 420,533 \cdot 0,1127 \\ &= 309,676 \Omega \end{aligned}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

$$= \sqrt{232,9^2 + 309,676^2}$$

$$= 387,481 \Omega$$

iii. Perhitungan tegangan *output* generator

$$E_a = 2\pi \cdot \frac{N_r}{60} \cdot \Phi_{max} \cdot N$$

$$= 2\pi \cdot \frac{3154}{60} \cdot 0,0001131 \cdot 600$$

$$= 14,351 V$$

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

$$= 14,351 - 0,0159 \cdot 387,481$$

$$= 8,190 V$$

iv. Perhitungan eror persen

$$Error\ Percent = \left| \frac{Data\ teori - Data\ ukur}{Data\ teori} \right| \times 100\%$$

$$= \left| \frac{8,190 - 8}{8,190} \right| \times 100\%$$

$$= 2,318 \%$$

v. Perhitungan daya *output* generator

$$P_o = V \cdot I$$

$$= 8 \cdot 0,0159$$

$$= 0,127 W$$

vi. Perhitungan daya *input* motor

$$P_i = V \cdot I$$

$$= 105 \cdot 0,3$$

$$= 31,5 W$$

vii. Perhitungan efisiensi generator

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \cdot 100\%$$

$$= \frac{0,127}{31,5} \cdot 100\%$$

$$= 0,4038 \%$$

3. Saat beban 666,667 Ω

i. Perhitungan frekuensi

$$\begin{aligned} f &= \frac{np}{120} \\ &= \frac{2779 \cdot 16}{120} \\ &= 370,533 \text{ Hz} \end{aligned}$$

ii. Perhitungan impedansi

$$\begin{aligned} X_L &= 2\pi fL \\ &= 2\pi \cdot 370,533 \cdot 0,1127 \\ &= 272,857 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{R^2 + X_L^2} \\ &= \sqrt{232,9^2 + 272,857^2} \\ &= 358,738 \Omega \end{aligned}$$

iii. Perhitungan tegangan *output* generator

$$\begin{aligned} E_a &= 2\pi \cdot \frac{N_r}{60} \cdot \Phi_{max} \cdot N \\ &= 2\pi \cdot \frac{2779}{60} \cdot 0,0001131 \cdot 600 \\ &= 12,645 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V &= E_a - I \cdot Z \\ &= 12,645 - 0,0119 \cdot 358,738 \\ &= 8,376 \text{ V} \end{aligned}$$

iv. Perhitungan eror persen

$$\begin{aligned} \text{Error Percent} &= \left| \frac{\text{Data teori} - \text{Data ukur}}{\text{Data teori}} \right| \times 100\% \\ &= \left| \frac{8,376 - 8}{8,376} \right| \times 100\% \\ &= 4,484 \% \end{aligned}$$

v. Perhitungan daya *output* generator

$$\begin{aligned} P_o &= V \cdot I \\ &= 8 \cdot 0,0119 \end{aligned}$$

$$= 0,095 \text{ W}$$

vi. Perhitungan daya *input* motor

$$\begin{aligned} P_o &= V \cdot I \\ &= 100 \cdot 0,3 \\ &= 30 \text{ W} \end{aligned}$$

vii. Perhitungan efisiensi generator

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_o}{P_i} \cdot 100\% \\ &= \frac{0,095}{30} \cdot 100\% \\ &= 0,3173 \text{ \%} \end{aligned}$$

4. Saat beban 1000Ω

i. Perhitungan frekuensi

$$\begin{aligned} f &= \frac{np}{120} \\ &= \frac{2245 \cdot 16}{120} \\ &= 299,333 \text{ Hz} \end{aligned}$$

ii. Perhitungan impedansi

$$\begin{aligned} X_L &= 2\pi fL \\ &= 2\pi \cdot 299,333 \cdot 0,1127 \\ &= 220,426 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{R^2 + X_L^2} \\ &= \sqrt{232,9^2 + 220,426^2} \\ &= 320,671 \Omega \end{aligned}$$

iii. Perhitungan tegangan *output* generator

$$\begin{aligned} E_a &= 2\pi \cdot \frac{N_r}{60} \cdot \Phi_{max} \cdot N \\ &= 2\pi \cdot \frac{2245}{60} \cdot 0,0001131 \cdot 600 \\ &= 10,215 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}V &= E_a - I \cdot Z \\ &= 10,215 - 0,0079 \cdot 320,671 \\ &= 7,682 \text{ V}\end{aligned}$$

iv. Perhitungan eror persen

$$\begin{aligned}\text{Error Percent} &= \left| \frac{\text{Data teori} - \text{Data ukur}}{\text{Data teori}} \right| \times 100\% \\ &= \left| \frac{7,682 - 8}{7,682} \right| \times 100\% \\ &= 4,146 \%\end{aligned}$$

v. Perhitungan daya *output* generator

$$\begin{aligned}P_o &= V \cdot I \\ &= 8 \cdot 0,0079 \\ &= 0,063 \text{ W}\end{aligned}$$

vi. Perhitungan daya *input* motor

$$\begin{aligned}P_i &= V \cdot I \\ &= 98 \cdot 0,2 \\ &= 19,60 \text{ W}\end{aligned}$$

vii. Perhitungan efisiensi generator

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{P_o}{P_i} \cdot 100\% \\ &= \frac{0,063}{19,60} \cdot 100\% \\ &= 0,3224 \%\end{aligned}$$

5. Saat beban 2000Ω

i. Perhitungan frekuensi

$$\begin{aligned}f &= \frac{np}{120} \\ &= \frac{2042 \cdot 16}{120} \\ &= 272,267 \text{ Hz}\end{aligned}$$

ii. Perhitungan impedansi

$$\begin{aligned}X_L &= 2\pi fL \\ &= 2\pi \cdot 272,267 \cdot 0,1127\end{aligned}$$

$$= 200,494 \Omega$$

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{R^2 + X_L^2} \\ &= \sqrt{232,9^2 + 200,494^2} \\ &= 307,312 \Omega \end{aligned}$$

iii. Perhitungan tegangan *output* generator

$$\begin{aligned} E_a &= 2\pi \cdot \frac{N_r}{60} \cdot \Phi_{max} \cdot N \\ &= 2\pi \cdot \frac{2042}{60} \cdot 0,0001131 \cdot 600 \\ &= 9,291 V \\ V &= E_a - I \cdot Z \\ &= 9,291 - 0,0042 \cdot 307,312 \\ &= 8 V \end{aligned}$$

iv. Perhitungan eror persen

$$\begin{aligned} Error\ Percent &= \left| \frac{Data\ teori - Data\ ukur}{Data\ teori} \right| \times 100\% \\ &= \left| \frac{8 - 8}{8} \right| \times 100\% \\ &= 0\% \end{aligned}$$

v. Perhitungan daya *output* generator

$$\begin{aligned} P_o &= V \cdot I \\ &= 8 \cdot 0,0042 \\ &= 0,034 W \end{aligned}$$

vi. Perhitungan daya *input* motor

$$\begin{aligned} P_i &= V \cdot I \\ &= 95 \cdot 0,2 \\ &= 19 W \end{aligned}$$

vii. Perhitungan efisiensi generator

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_o}{P_i} \cdot 100\% \\ &= \frac{0,034}{19} \cdot 100\% \end{aligned}$$

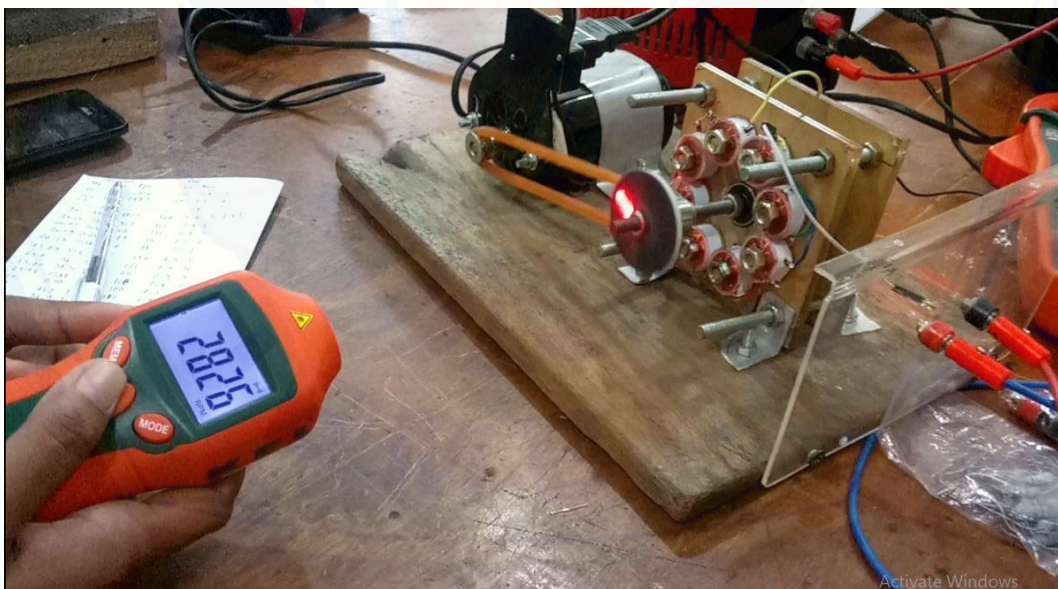
= 0,1768 %



LAMPIRAN 2



Gambar 1. Pengujian Tegangan dan Arus *Output* Generator *Axial Flux*



Gambar 2. Pengujian Kecepatan Putar Generator *Axial Flux*



Gambar 3. Pengujian Generator *Axial Flux* Tegangan Output 28 V



Gambar 4. Tampilan Osiloskop Pengujian Generator *Axial Flux*