



**RANCANG BANGUN *PERMANENT MAGNET*
SYNCHRONOUS GENERATOR 1 FASA FLUKS RADIAL**

SKRIPSI

Oleh :

Pipiq Taufiqur Rahman

NIM 151910201033

PROGRAM STUDI STRATA SATU

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS JEMBER

2019



**RANCANG BANGUN *PERMANENT MAGNET*
SYNCHRONOUS GENERATOR 1 FASA FLUKS RADIAL**

SKRIPSI

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

Oleh :

Pipiq Taufiqur Rahman

NIM. 151910201033

**PROGRAM STUDI STRATA SATU
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER**

2019

PERSEMBAHAN

Dengan mengucap puji dan syukur ke hadirat Allah SWT limpahan kasih dan karunia -Mu telah memberikan kekuatan dan kemudahan sehingga skripsi ini bisa terselesaikan. 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. Ibunda Ida Farida, Ayahanda Kusnadi, Kakak Ahmad Tajuddin Nur, Adik Basirotin Nadiro, Mbah Muhammad Rifa'i dan Mbah Siti Hosna Rosida serta keluarga besar tercinta, terima kasih atas doa, pengorbanan, usaha, kasih sayang, dorongan, nasehat, dan air mata yang menetes dalam setiap untaian doa yang senantiasa mengiringi setiap langkah bagi perjuangan dan keberhasilan penulis;
4. Bapak Prof. Dr. Ir. Bambang Sujanarko, M.M. selaku Dosen Pembimbing Utama dan Bapak R.B. Moch. Gozali, 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;
5. Bapak Dr. Triwahju Hardianto, S.T., M.T. selaku penguji satu dan Bapak Andi Setiawan, S.T., M.T. selaku penguji dua yang telah memberikan saran dan kritik yang membangun untuk terselesaikannya skripsi ini;
6. Bapak Sumardi ST., MT. selaku dosen pembimbing akademik yang telah membimbing dan menanamkan rasa disiplin dan tanggung jawab dengan apa yang dilakukan selama penulis menjadi mahasiswa;
7. Guru-guruku dari taman kanak-kanak hingga perguruan tinggi dan guru ngaji;
8. Almamaterku Universitas Jember yang aku cintai dan banggakan;
9. Tim skripsi Laboratorium *Renewable Energy* : Bayu Sofan S.T., Mas Naufal S.T., Sita Agustina, Ani Rohani, Hafifur Rohman, Muhammad Taufik, Muhammad Zainul Hasan, Muhammad Sodiq, Novial Azhar, Muhammad Rifqi Assarifi, Aqiyas Muhammad Diqri, Ricto Yudi Wicaksono yang telah menemani dan membantu penelitian skripsi penulis;

10. Sita Agustina yang setia menemani dan mendengarkan setiap keluh kesah dalam mengerjakan skripsi penulis;
11. Anak Buah Cries (ABC): Danang Aditya Mahendra, Ade Widya Yuwono, Aqiyas Muhammad Diqri, Cries Avian yang telah menemani dan membantu penelitian skripsi penulis;
12. Badan Perwakilan Mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Jember (BPM FT UNEJ) yang telah memberikan pengalaman organisasi untuk mengkritik dan memberikan saran kepada Fakultas Teknik Universitas Jember.
13. UKM Einstein yang telah memberikan pengalaman organisasi dibidang penelitian dan teknologi.
14. UKM Olahraga Ester yang telah memberikan pengalaman organisasi dibidang olahraga.
15. Serta seluruh pihak yang tidak dalam lembar persembahan ini, kusampaikan terimakasih.

MOTTO

“Jangan pernah iri akan kelebihan orang lain. Karena itu wujud belas kasih sayang Allah SWT kepada makhluknya. Berdoa saja semoga *happy ending*”
(Ayahanda Kusnadi S.pd)

“Jangan Malas. Karena penyakit malas tidak ada obatnya”
(Ibunda Ida Farida)

“Sabar dan ikhlas menjalani cobaan dan rintangan dari Allah SWT. Badai pasti berlalu”
(Ibunda Ida Farida)

“Usaha dan berdoa adalah sepasang jalan menuju sukses”
(Pipiq Taufiqur Rahman)

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Pipiq Taufiqur Rahman

NIM : 151910201033

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Rancang Bangun *Permanent Magnet Synchronous Generator* 1 Fasa Fluks Radial” 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, 29 Mei 2019

Yang menyatakan,

Pipiq Taufiqur Rahman

NIM 151910201033

SKRIPSI

**RANCANG BANGUN *PERMANENT MAGNET*
SYNCHRONOUS GENERATOR 1 FASA FLUKS RADIAL**

Oleh

Pipiq Taufiqur Rahman

NIM 151910201033

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Prof. Dr. Ir. Bambang Sujanarko, M.M.

Dosen Pembimbing Anggota : R.B. Moch. Gozali, S.T., M.T.

PENGESAHAN


Skripsi berjudul “Rancang Bangun *Permanent Magnet Synchronous Generator* 1 Fasa Fluks Radial” karya Pipiq Taufiqur Rahman telah diuji dan disahkan pada:

Hari, tanggal : 29 Mei 2019

Tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Tim Penguji :

Ketua,



Prof. Dr. Ir. Bambang Sujanarko, M.M.

NIP 196312011994021002

Anggota II,



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

NIP 197008261997021001

Anggota I,



R.B Moch. Gozali, S.T., M.T.

NIP 196906081999031002

Anggota III,



Andi Setiawan, S.T., M.T.

NIP 196910101997021001

Mengesahkan

Dekan,

Dr. Entin Hidayah, M. UM.

NIP 199612151995032001

RINGKASAN

Rancang Bangun *Permanent Magnet Synchronous Generator* 1 Fasa Fluks

Radial : Pipiq Taufiqur Rahman, 151910201033 : 2019:65; Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Jember.

Listrik merupakan energi primer yang dipakai oleh setiap lapisan masyarakat untuk kehidupan sehari-hari. Seiring berkembangnya teknologi dan pertumbuhan penduduk maka kebutuhan listrik semakin bertambah. Dewasa ini, bahan sumber energi listrik masih bergantung pada bahan energi yang tidak dapat diperbaharui seperti batu bara, gas bumi dan Bahan Bakar Minyak (BBM). Salah satu energi alternatif yang berpotensi untuk dikembangkan di Indonesia adalah energi angin. Daerah dengan kecepatan angin rendah dapat memanfaatkan *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) sebagai penghasil listrik pada Pembangkit Listrik Tenaga Angin. PMSG memiliki tingkat efisiensi yang lebih baik dibandingkan dengan generator induksi karena tidak ada rugi-rugi eksitasi yang dihasilkan sehingga sesuai untuk penggunaan Pembangkit Listrik Tenaga Angin.

Perancangan *Permanent Magnet Synchronous Generator* 1 Fasa Fluks Radial menggunakan stator kipas angin gantung model NK-562. Material magnet permanen yang digunakan adalah magnet *Neodymium Iron Boron*. Jumlah *slot* dan *pole* untuk desain yang dibuat adalah 14 *slot* dan 14 *pole*. Setiap kumparan pada masing-masing *slot* terdiri dari 800 lilitan dengan diameter kawat 0,15 mm. Variasi beban untuk pengujian alat menggunakan lampu bohlam sebesar 15 watt, 25 watt, 40 watt dan 75 watt. Pengujian pertama untuk mengukur tahanan lampu bohlam. Kemudian pengujian tegangan generator tanpa beban lampu. Kemudian pengujian generator menggunakan *prime mover* pada kecepatan 430 rpm dengan frekuensi 50 Hz dengan variasi beban. Pengujian alat menggunakan *prime mover* pada kecepatan 200 rpm, 400 rpm, 600 rpm, 800 rpm, 1000 rpm, 1200 rpm, 1400 rpm dan 1600 rpm.

Pegujian Beban Lampu Bohlam 15 watt dihasilkan tahanan bohlam sebesar 281,2 Ω . Pada Beban Lampu Bohlam 25 watt dihasilkan tahanan lampu

bohlam yang lebih besar dari sebelumnya sebesar 157,1 Ω . Pada Beban Lampu Bohlam 40 watt dihasilkan tahanan bohlam sebesar 99,8 Ω . Kemudian pada Beban Lampu Bohlam 75 watt dihasilkan tahanan bohlam sebesar 65,4 Ω . Pada pengujian tegangan tanpa beban dihasilkan pada kecepatan 200 rpm menghasilkan tegangan sebesar 67 volt dan pada kecepatan 1200 rpm menghasilkan tegangan sebesar 554 volt. Kemudian pada pengujian kecepatan generator 430 rpm dengan frekuensi 50 Hz pada beban lampu 15 watt dihasilkan tegangan 151 volt, arus sebesar 0,05 ampere dan daya sebesar 7,55 watt. Pada pengujian terbesar 75 watt dihasilkan 40 volt, arus sebesar 0,09 ampere dan daya yang dihasilkan 3,6 watt.

Kemudian pengujian dengan variasi beban menggunakan beban lampu 15 watt kecepatan generator 200 rpm sampai kecepatan generator 1600 rpm. Pada kecepatan generator terbesar 1600 rpm menghasilkan tegangan sebesar 533 volt, arus sebesar 0,15 ampere dan daya sebesar 79,5 watt. Kemudian pengujian dengan variasi beban menggunakan beban lampu 25 watt kecepatan generator 200 rpm sampai kecepatan 1600 rpm. Pada kecepatan 1600 rpm menghasilkan tegangan sebesar 533 volt, arus sebesar 0,15 ampere dan daya sebesar 79,5 watt. Kemudian pengujian dengan variasi beban menggunakan beban lampu 40 watt kecepatan generator 200 rpm sampai kecepatan generator 1600 rpm. Pada kecepatan generator terbesar 1600 rpm menghasilkan tegangan sebesar 294 volt, arus sebesar 0,2 ampere dan daya sebesar 53 watt. Kemudian pengujian dengan variasi beban menggunakan beban lampu 75 watt kecepatan generator 200 rpm sampai kecepatan 1600 rpm. Pada kecepatan 1600 rpm menghasilkan tegangan sebesar 126 volt, arus sebesar 0,22 ampere dan daya sebesar 27,5 watt.

Berdasarkan beberapa pengujian *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) yang telah dilakukan dapat diketahui dengan pengujian tanpa beban menghasilkan tegangan semakin besar seiring semakin besar nilai kecepatan generator. Pada saat penambahan variasi beban didapatkan hasil pengujian semakin besar nilai kecepatan putaran generator maka tegangan, arus dan daya yang dihasilkan semakin besar.

SUMMARY

Design of Permanent Synchronous Generator Magnets 1 Phase Radial Flux:

Pipiq Taufiqur Rahman, 151910201033: 2019: 65; Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Jember.

Electricity is primary energy used by every level of society for everyday life. Along with the development of technology and population growth, the electricity needs are increasing. The source of electrical energy is still dependent on non-renewable energy materials such as coal, natural gas and fuel oil (BBM). One alternative energy that has the potential to be developed in Indonesia is wind energy. Areas with low wind speeds can utilize Permanent Magnet Synchronous Generators (PMSG) as electricity producers in Wind Power Plants. Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) has a better level of efficiency than an induction generator because there is no excitation loss produced so that it is suitable for the use of Wind Power Plants.

Permanent Synchronous Generator 1 Phase Radial Flux using a hanging fan stator model NK-562. The permanent magnet material used is the Neodymium Iron Boron magnet. The number of slots and poles for the design made are 14 slots and 14 poles. Each coil in each slot consists of 800 turns with a wire diameter of 0.15 mm. The load combination for testing the tool uses a bulb lamp of 15 watts, 25 watts, 40 watts and 75 watts. The first test to measure the resistance of a bulb lamp. Then test the generator voltage without the lamp load. Then testing the generator using prime mover at speeds of 430 rpm with a frequency of 50 Hz with variations in load. Testing the tool using prime mover at speeds of 200 rpm, 400 rpm, 600 rpm, 800 rpm, 1000 rpm, 1200 rpm, 1400 rpm and 1600 rpm.

In the Lamp Load Test a 15-watt bulb is produced by a bulb resistance of 281.2 Ω . On Lamp Load The 25-watt bulb is produced with a bulb resistance that is greater than 157.1 Ω . On Lamp Load The 40 watt bulb is produced by bulb resistance of 99.8 Ω . Then on Lamp Load The 75 watt bulb is produced by a bulb resistance of 65.4 Ω . In testing the voltage without load is generated at a speed of 200 rpm produces a voltage of 67 volts and at a speed of 1200 rpm produces a

voltage of 554 volts. Then in testing the generator speed 430 rpm with a frequency of 50 Hz at a 15 watt lamp load produced a voltage of 151 volts, the current is 0.05 amperes and the power is 7.55 watts. In the largest test 75 watts are produced by 40 volts, the current is 0.09 amperes and the power produced is 3.6 watts.

Then testing with load variations using a 15 watt lamp load generator speed 200 rpm to generator speed 1600 rpm. At the largest generator speed of 1600 rpm it produces a voltage of 533 volts, a current of 0.15 amperes and a power of 79.5 watts. Then testing with load variations using a 25 watt lamp load generator speed 200 rpm to a speed of 1600 rpm. At a speed of 1600 rpm it produces a voltage of 533 volts, a current of 0.15 amperes and a power of 79.5 watts. Then testing with load variations using a 40 watt lamp load generator speed 200 rpm to generator speed 1600 rpm. At the largest generator speed of 1600 rpm it produces a voltage of 294 volts, a current of 0.2 amperes and a power of 53 watts. Then testing with load variations using 75 watt lamp loads generator speed 200 rpm to speed 1600 rpm. At a speed of 1600 rpm it produces a voltage of 126 volts, a current of 0.22 amperes and a power of 27.5 watts.

Based on several tests of Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) that have been carried out, it can be seen that without load testing the voltage increases as the generator speed value increases. When adding load variations, the test results are obtained, the greater the generator rotation speed, the greater the voltage, current and power produced.

PRAKATA

Puji syukur ke hadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat, taufik, serta hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian sekaligus penyusunan skripsi yang berjudul “Rancang Bangun *Permanent Magnet Synchronous Generator* 1 Fasa Fluks Radial”. 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 materil. Oleh karena itu penulis menyampaikan terimakasih kepada :

1. Ibu Dr. Ir. Entin Hidayah, M.UM. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember;
2. Bapak Bambang Srikaloko S.T., M.T selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Jember;
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Bambang Sujanarko, M.M. selaku Dosen Pembimbing Utama dan Bapak R.B. Moch. Gozali, 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;
4. Bapak Dr. Triwahju Hardianto S.T., M.T. selaku dosen penguji utama dan Bapak Andi Setiawan, 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 Sumardi ST., MT. selaku dosen pembimbing akademik yang telah membimbing dan menanamkan rasa disiplin dan tanggung jawab dengan apa yang dilakukan selama penulis menjadi mahasiswa;
6. Kedua orang tua saya Ibunda Ida Farida, Ayahanda Kusnadi, Kakak Ahmad Tajuddin Nur, Adik Basirotin Nadiro, Mbah Muhammad Rifa'i dan Mbah Siti Hosna Rosida serta keluarga besar tercinta, terima kasih atas pengorbanan, usaha, kasih sayang, dorongan, nasehat, dan air mata yang menetes dalam setiap

untaian doa yang senantiasa mengiringi setiap langkah bagi perjuangan dan keberhasilan saya;

7. Guru-guruku dari taman kanak-kanak hingga perguruan tinggi dan guru ngaji;
8. Almamaterku Universitas Jember yang aku cintai dan banggakan;
9. Tim skripsi Laboratorium *Renewable Energy* : Bayu Sofan S.T., Mas Nopek, Sita Agustina, Ani Rohani, Hafifur Rohman, Muhammad Taufik, Muhammad Zainul Hasan, Muhammad Sodiq, Novial Azhar, Muhammad Rifqi Assarifi, Aqiyas Muhammad Diqri, Ricto Yudi Wicaksono yang telah menemani dan membantu penelitian skripsi penulis;
10. Dulur- dulurku Distorsi 2015.
 1. Anak Buah Cries (ABC): Danang Aditya Mahendra, Ade Widya Yuwono, Aqiyas Muhammad Diqri, Cries Avian yang telah menemani dan membantu penelitian skripsi penulis; Badan Perwakilan Mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Jember (BPM FT UNEJ) yang telah memberikan pengalaman organisasi untuk mengkritik dan memberikan saran kepada Fakultas Teknik Universitas Jember.
 2. UKM Einstein yang yang telah memberikan pengalaman organisasi dibidang penelitian dan teknologi.
 3. UKM Olahraga Ester yang yang telah memberikan pengalaman organisasi dibidang olahraga.
11. Serta seluruh pihak yang tidak dalam lembar persembahan ini, kusampaikan terimakasih.

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, 29 Mei 2019

Penulis

DAFTAR ISI

BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan	3
1.5 Manfaat	4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)	5
2.2 Konstruksi Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)	6
2.3 Prinsip Kerja Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)	11
2.4 Jenis- Jenis Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)	15
2.5 Pembangkit Listrik Tenaga Angin	16
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN	18
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian	18
3.2 Alat dan Bahan	19
3.3 Tahapan Penelitian	20
3.4 Blok Diagram dan Perancangan Sistem	22
3.5 Gambaran Desain Alat	23
3.6 Analisis Perhitungan Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)	23
3.7 Pengujian Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)	27
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	28
4.1 Pengujian dan Analisis Karakteristik keluaran Permanent Magnet Synchronous Generator 1 Fasa Fluks Radial	29
4.2 Analisis Perhitungan keluaran Permanent Magnet Synchronous Generator 1 Fasa Fluks Radial	44
BAB 5. PENUTUP	63
5.1 Kesimpulan	63
5.2 Saran	63

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>permanent magnet synchronous generator (PMSG)</i>	5
Gambar 2.2 Konstruksi <i>Permanent Magnet Synchronous Generator</i>	6
Gambar 2.3 Stator	7
Gambar 2.4 Konstruksi posisi magnet permanen pada rotor	8
Gambar 2.5 Kurva histerisis magnetik.....	9
Gambar 2.6 Kurva karakteristik bahan magnet permanen pada suhu 20°C	10
Gambar 2.7 Aliran fluks magnet pada desain generator	11
Gambar 2.8 Arah arus induksi berdasarkan hukum Lenz	12
Gambar 2.9 perbandingan arah fluks magnetik generator tipe radial dan aksial ..	15
Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> Tahapan Penelitian	19
Gambar 3.2 Gambar 3.2 Blok Diagram Sistem	21
Gambar 3.3 Desain Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)	22
Gambar 3.4 Kipas Angin Gantung model NK-562.....	22
Gambar 3.5 Keterangan Dimensi Permanent Magnet Synchronous Generator....	24
Gambar 4.1 Rancang Bangun Permanent Magnet Synchronous Generator	27
Gambar 4.2 Grafik Hubungan Tahanan Lampu terhadap Kecepatan Generator ..	29
Gambar 4.3 Grafik Hubungan Tahanan Lampu terhadap Kecepatan Generator ..	30
Gambar 4.4 Grafik Hubungan Kecepatan Generator terhadap Tegangan keluaran dengan variasi beban dan kecepatan 430 rpm.....	32
Gambar 4.5 Grafik Hubungan Kecepatan Generator terhadap arus keluaran dengan variasi beban dan kecepatan 430 rpm	32
Gambar 4.6 Grafik Hubungan Kecepatan Generator terhadap daya dengan variasi beban dan kecepatan 430 rpm	33
Gambar 4.7 Grafik Hubungan antara Kecepatan Generator terhadap tegangan keluaran pada beban 15 watt	35
Gambar 4.8 Grafik Hubungan antara Kecepatan Generator terhadap arus keluaran pada beban 15 watt.....	35

Gambar 4.9 Grafik Hubungan antara Kecepatan Generator terhadap daya keluaran pada beban 15 watt.....	35
Gambar 4.10 Grafik Hubungan antara Kecepatan Generator terhadap tegangan keluaran pada beban 25 watt.....	37
Gambar 4.11 Grafik Hubungan antara Kecepatan Generator terhadap arus keluaran pada beban 25 watt.....	38
Gambar 4.12 Grafik Hubungan antara Kecepatan Generator terhadap daya keluaran pada beban 25 watt.....	38
Gambar 4.13 Grafik Hubungan antara Kecepatan Generator terhadap tegangan keluaran pada beban 40 watt.....	40
Gambar 4.14 Grafik Hubungan antara Kecepatan Generator terhadap arus keluaran pada beban 40 watt.....	41
Gambar 4.15 Grafik Hubungan antara Kecepatan Generator terhadap daya keluaran pada beban 40 watt.....	41
Gambar 4.16 Grafik Hubungan antara Kecepatan Generator terhadap tegangan keluaran pada beban 75 watt.....	43
Gambar 4.17 Grafik Hubungan antara Kecepatan Generator terhadap arus keluaran pada beban 75 watt.....	44
Gambar 4.17 Grafik Hubungan antara Kecepatan Generator terhadap daya keluaran pada beban 75 watt.....	44

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Rencana dan Jadwal Pelaksanaan Penelitian	17
Tabel 4.1 Pengukuran dimensi Permanent Magnet Synchronous Generator.....	28
Tabel 4.2 Hasil Pengujian Tahanan Lampu Bohlam	29
Tabel 4.3 Hasil Pengujian Generator Tanpa Beban	30
Tabel 4.4 Hasil Pengujian Generator kecepatan 430 rpm	31
Tabel 4.5 Hasil Pengujian Keluaran Beban 15 watt	34
Tabel 4.6 Hasil Pengujian Keluaran Beban 25 watt	36
Tabel 4.7 Hasil Pengujian Keluaran Beban 40 watt	39
Tabel 4.8 Hasil Pengujian Keluaran Beban 75 watt	42
Tabel 4.9 Hasil Perhitungan Generator Tanpa Beban.....	46
Tabel 4.10 Hasil Perhitungan Generator kecepatan 430 rpm	47
Tabel 4.11 Hasil Perhitungan Keluaran Beban 15 watt	48
Tabel 4.12 Hasil Perhitungan Keluaran Beban 25 watt	49
Tabel 4.13 Hasil Perhitungan Keluaran Beban 40 watt	51
Tabel 4.14 Hasil Perhitungan Keluaran Beban 75 watt	52
Tabel 4.15 Pengujian keluaran bentuk gelombang AC kecepatan 430 rpm	52
Tabel 4.16 Pengujian bentuk gelombang AC Beban 15 watt 220-240 volt.....	53
Tabel 4.17 Pengujian bentuk gelombang AC Beban 25 watt 220-240 volt.....	56
Tabel 4.18 Pengujian bentuk gelombang AC Beban 40 watt 220-240 volt.....	58
Tabel 4.19 Pengujian bentuk gelombang AC Beban 75 watt 220-240 volt.....	60

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Listrik merupakan energi primer yang dipakai oleh setiap lapisan masyarakat untuk kehidupan sehari-hari. Seiring berkembangnya teknologi dan pertumbuhan penduduk maka kebutuhan listrik semakin bertambah. Dewasa ini, bahan sumber energi listrik masih bergantung pada bahan energi yang tidak dapat diperbaharui seperti batu bara, gas bumi dan Bahan Bakar Minyak (BBM). Menurut Kementerian Energi dan Sumber Daya mineral (ESDM) mencatat, konsumsi batubara di Indonesia mencapai 15,6 juta metrik ton selama Februari 2018. Mayoritas konsumsi batubara tersebut digunakan untuk sektor kelistrikan. Kemudian berdasarkan data hingga akhir 2017, penggunaan batubara dalam bauran energi pembangkit listrik tercatat sebesar 57,22 %, gas bumi sebesar 24,82 %, Bahan Bakar Minyak (BBM) sebesar 5,81 %. Sedangkan untuk sumber energi listrik dari Energi Baru Terbarukan (EBT) hanya sebesar 12,15 %.

Dari data tersebut dapat diketahui bahwa mayoritas untuk penggunaan bahan sumber energi listrik berasal dari bahan energi yang tidak dapat diperbarui. Sedangkan persediaan bahan-bahan tersebut, semakin lama akan berkurang bahkan akan habis. Maka dari itu, perlu adanya penggunaan energi alternatif yang dapat diperbaharui agar produksi energi listrik dapat berkelanjutan. Salah satu energi alternatif yang berpotensi untuk dikembangkan di Indonesia adalah energi angin. Daerah dengan kecepatan angin rendah dapat memanfaatkan *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) sebagai penghasil listrik pada Pembangkit Listrik Tenaga Angin. PMSG memiliki tingkat efisiensi yang lebih baik dibandingkan dengan generator lainnya karena tidak ada rugi-rugi eksitasi yang dihasilkan oleh penggunaan catu daya DC untuk magnet induksi. PMSG juga tidak memiliki *slip ring* atau cincin geser dan sikat arang yang biasanya digunakan untuk mengalirkan arus penguat magnet pada lilitan magnet rotor.

PMSG menggunakan magnet permanen *Neodymium Iron Boron* karena memiliki yang paling baik diantara magnet permanen lainnya. Generator magnet permanen fluks radial (GMPFR) mempunyai manufaktur sederhana yaitu hanya

memerlukan sebuah inti besi pada statornya. Apabila dilihat dari konfigurasinya, GMPFR lebih mudah dimodifikasi untuk menghasilkan tegangan keluaran juga torsi lebih besar dibandingkan generator magnet permanen fluks aksial. Dalam merintis pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Angin, kelebihan dari generator magnet permanen fluks radial ini sangat menguntungkan (Adeguna, 2010).

Penelitian sebelumnya digunakan perangkat lunak untuk mensimulasikan desain PMSG menggunakan perangkat lunak *MagNet Infolytica*. Pada pembuatan desain PMSG terlebih dahulu digunakan perangkat lunak CAD seperti *SolidWorks*, kemudian di *import* ke perangkat lunak *MagNet Infolytica* untuk selanjutnya mensimulasikan dan menganalisis hasil simulasi. Hal tersebut karena pada penelitian tersebut menggunakan perangkat lunak *MagNet Infolytica* yang memiliki kekurangan pada *tool* untuk mendesain (Umami dkk., 2017). Kemudian penelitian selanjutnya yaitu merancang bangun PMSG 1 KW 3 fasa rotor interior dengan detail analisis rumus dan hasil keluaran yang dihasilkan melalui pengukuran (Hebala *et al.*, 2018). Penelitian kali ini untuk merancang bangun PMSG dengan menggunakan magnet permanen *Neodymium Iron Boron* untuk menghasilkan listrik AC satu fasa berbasis motor kipas angin gantung. Konstruksi dari PMSG menggunakan tipe fluks radial dengan konstruksi interior permanen magnet. Penelitian PMSG ini diharapkan dapat pada sistem secara langsung pada Pembangkit Listrik Tenaga Angin.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, dapat dirumuskan beberapa permasalahan sebagai berikut :

1. Bagaimana merancang *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) fluks radial dengan menggunakan magnet permanen *Neodymium Iron Boron* berbasis motor kipas angin?
2. Bagaimana analisis dan perbandingan *output* tegangan, arus, dan daya *output* yang dihasilkan pada *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG)?
3. Bagaimana hasil keluaran tegangan, arus, dan daya dengan variasi beban?

1.3 Batasan Masalah

Untuk memfokuskan pembahasan dalam penelitian ini, maka diberikan beberapa batasan masalah sebagai berikut:

1. Tipe generator yang dirancang adalah *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) satu fasa dengan tipe *fluks radial* berbasis motor kipas angin gantung.
2. Material magnet permanen yang digunakan adalah magnet *Neodymium Iron Boron*.
3. Jumlah *slot* dan *pole* untuk desain yang dibuat adalah 14 *slot* dan 14 *pole*.
4. Setiap kumparan pada masing- masing *slot* terdiri dari 800 lilitan dengan diameter kawat 0,15 mm.
5. Variasi beban untuk pengujian alat menggunakan lampu bohlam sebesar 15 watt, 25 watt, 40 watt dan 75 watt.
6. Pengujian alat menggunakan *prime mover* pada kecepatan 200 rpm, 400 rpm, 600 rpm, 800 rpm, 1000 rpm, 1200 rpm, 1400 rpm dan 1600 rpm.
7. Pengujian alat dilakukan pada frekuensi 50 Hz dengan kecepatan 428,57 rpm setara 430 rpm.
8. Rangka generator menggunakan *housing* dan stator motor kipas gantung 60 watt merk NIKO model NK-562.

1.4 Tujuan

Adapun tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah :

1. Merancang yang baik untuk *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) satu fasa dengan tipe fluks radial berbasis motor kipas.
2. Menganalisis pengaruh kecepatan terhadap keluaran tegangan, arus, dan daya yang dihasilkan oleh *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG).
3. Menganalisis pengaruh kecepatan terhadap tegangan yang dihasilkan oleh *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) tanpa beban.
4. Menganalisis keluaran tegangan, arus, dan daya yang dihasilkan untuk beban yang bervariasi.

1.5 Manfaat

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Dapat diterapkan dalam kehidupan sehari-hari sebagai pemanfaatan energi terbarukan.
2. Dapat membantu untuk perancangan sistem keseluruhan pada Pembangkit Listrik Tenaga Angin sehingga diharapkan mampu mengurangi pemakaian bahan bakar fosil yang semakin menipis.
3. Penelitian ini dapat dijadikan referensi awal untuk perancangan *Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)* satu fasa dengan tipe fluks radial.
4. Dapat digunakan pada sistem pembangkit listrik tenaga angin untuk menghasilkan listrik 1 fasa.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pendahuluan tentang *Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)*

Generator adalah sebuah mesin konversi energi yang dapat mengubah energi gerak (mekanik) menjadi energi listrik (elektrik) dengan memanfaatkan prinsip induksi elektromagnetik. Sumber energi mekanik yang menggerakkan generator tersebut bermacam-macam. Generator pada pembangkit listrik tenaga angin dihubungkan dengan turbin angin.

Salah satu jenis generator yang banyak digunakan untuk dikopel dengan turbin angin adalah *Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)*. Perbedaan dari generator biasa adalah sistem penguatan yang digunakan menggunakan magnet permanen bukan menggunakan kumparan. Magnet permanen yang diletakkan pada rotor yang berputar dengan stator yang diam untuk menghasilkan GGL induksi sehingga menghasilkan listrik tanpa penggunaan catu daya DC sehingga tidak ada rugi-rugi eksitasi. Makna sinkron pada PMSG artinya frekuensi listrik yang dihasilkannya sinkron dengan putaran mekanis generator tersebut, bisa dilihat dari gelombang sinus yang dihasilkan menggunakan osiloskop. Kemudian makna sinkron juga menunjukkan bahwa medan magnet putar antara stator dan rotor adalah sinkron (sama) sehingga tidak ada slip dan *fluks* yang dibangkitkan secara bersamaan antara stator dan rotor.



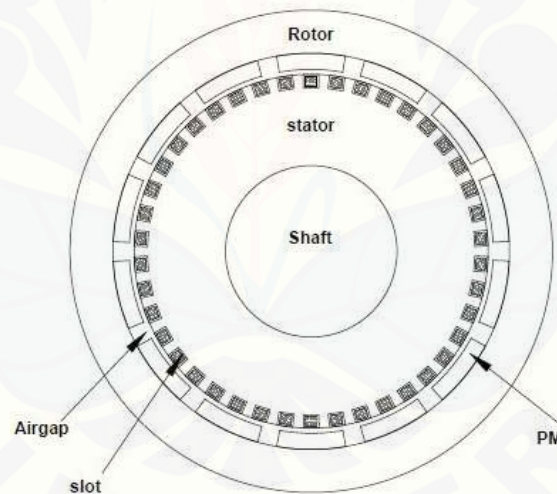
Gambar 2.1 *permanent magnet synchronous generator (PMSG)*

(Sumber: Wijk, 2012)

Permanent magnet synchronous generator (PMSG) banyak digunakan untuk berbagai aplikasi, seperti mesin elektrik, pompa, kipas, kontrol katup, hingga peralatan industri. Tetapi untuk saat ini, pengembangan permanen magnet *synchron* generator banyak diaplikasikan sebagai pembangkit energi listrik terbarukan (menggunakan tenaga alam) yang handal dan berbiaya rendah (Rukslin dkk., 2015).

2.2 Konstruksi *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG)

Konstruksi generator sinkron magnet permanen sama dengan generator sinkron pada umumnya yakni terdapat stator dan rotor. Perbedaannya terdapat pada sumber eksitasi dimana generator sinkron magnet permanen menggunakan medan magnet permanen sebagai sumber eksitasi medan magnet yang menuju stator sehingga tidak ada rugi-rugi eksitasi.



Gambar 2.2 Konstruksi *Permanent Magnet Synchronous Generator*

(Sumber: Rastogi S. dkk., 2016)

1. Stator

Stator merupakan bagian generator yang diam dan berfungsi sebagai tempat untuk menerima induksi fluks magnet dari magnet permanen yang melekat pada rotor. Stator juga sebagai tempat untuk menghasilkan arus listrik yang menuju ke beban. Stator berbentuk sebuah rangka silinder yang memiliki lilitan kawat konduktor yang banyak. Pada stator terdapat beberapa bagian, yaitu :

a. Rangka Stator

Rangka stator merupakan rangka luar dan berfungsi untuk menyokong struktur stator dan mempunyai kaki-kaki yang dipasang pada bagian fondasi. Rangka stator ini dibuat kokoh untuk mengatasi perubahan beban secara tiba-tiba atau hubung singkat.

b. Inti Stator

Inti stator terbuat dari segmen-segmen dimana tiap segmen tersebut terdiri dari laminasi lembaran plat baja silikon yang memiliki sifat kemagnetan sangat baik. Inti stator dibuat berlaminasi untuk mengurangi rugi arus *eddy* dan juga rugi histerisis.

c. Slot

Slot merupakan tempat untuk meletakkan kumparan stator yang dibentuk dengan sistem berbuku-buku.

d. Kumparan stator

Kumparan stator merupakan tempat terbentuknya tegangan induksi pada generator dan didesain untuk menghasilkan kutub-kutub elektromagnetik stator yang sinkron dengan kutub magnet rotor.

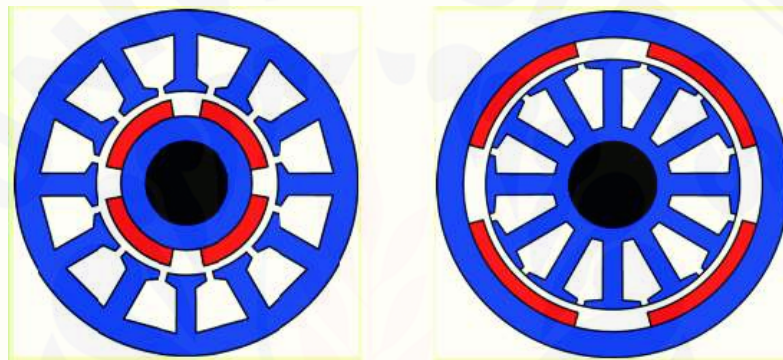


Gambar 2.3 Stator

(Sumber: Nusantara, 2014)

2. Rotor

Rotor merupakan bagian yang ikut berputar pada generator, karena terdapat poros yang terhubung langsung dengan rotor. Pada generator sinkron magnet permanen, rotor juga merupakan tempat untuk diletakkannya magnet permanen sebagai penghasil *fluks* magnet yang menuju stator. Ada beberapa cara untuk meletakkan magnet permanen pada rotor, yaitu dengan cara meletakkan magnet permanen pada permukaan rotor (*Surface Mounted Permanent Magnet*) atau dengan meletakkan magnet permanen didalam inti rotor (*Interior Permanent Magnet*).



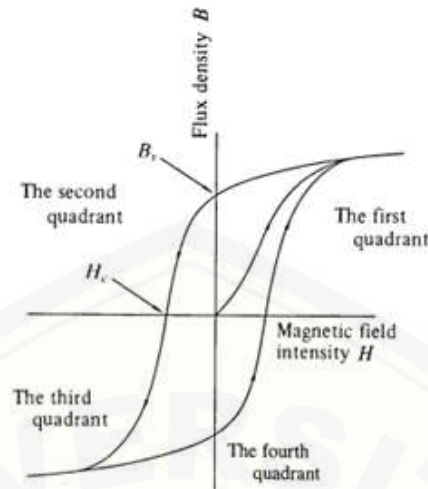
(a) *Surface Mounted Permanent Magnet* (b) *Interior Permanent Magnet*

Gambar 2.4 Konstruksi posisi magnet permanen pada rotor

(Sumber: Madani, 2011)

3. Magnet Permanen

Magnet permanen merupakan material yang memiliki banyak manfaat terutama dalam bidang konversi energi, yaitu digunakan untuk mengubah energi kinetik menjadi energi listrik maupun sebaliknya. Pengembangan material magnet permanen menjadi perhatian penting para peneliti dan akademisi untuk menghasilkan magnet dengan kualitas terbaik dan efisiensi yang tinggi dalam aplikasinya. Sebagai penghasil medan magnet utama, medan magnet pada rotor merupakan medan magnet permanent yang kuat. Magnet permanen tidak memiliki kumparan penguat dan tidak menghasilkan disipasi daya elektrik (hilangnya daya elektrik).



Gambar 2.5 Kurva histeresis magnetik

(Sumber: Kenjo dkk, 1985)

Magnet permanen merupakan material feromagnetik yang memiliki *hysteresis loop* yang lebar. *Hysteresis loop* yang lebar menunjukkan sedikitnya pengaruh induksi dari luar terhadap magnet tersebut. Bahan awal magnet yang diproduksi adalah baja. Magnet yang terbuat dari baja mudah dimagnetisasi, tetapi bahan tersebut dapat menyimpan energi yang rendah sehingga mudah didemagnetisasi sehingga dikembangkan material lain agar mampu menyimpan energi yang lebih besar untuk menghasilkan peralatan yang lebih baik. Terdapat tiga jenis pembagian magnet permanen yang digunakan untuk mesin elektrik, diantaranya yaitu:

a. *Magnet Alnico*

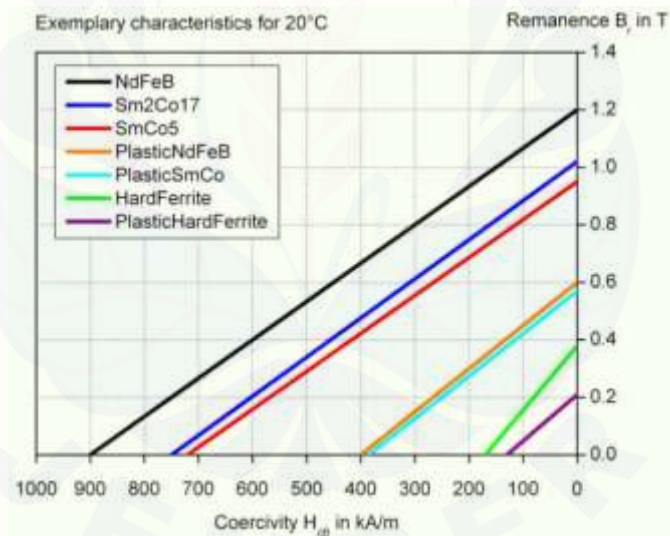
Magnet jenis ini memiliki kerapatan *fluks* yang tinggi dengan gaya koersif yang rendah. Ketika koersifitasnya rendah dan dua kutub magnet saling berlawanan berada pada jarak dekat, maka kutub-kutub tersebut dapat saling melemahkan.

b. *Magnet Ceramic* atau Magnet Keramik

Tidak seperti *magnet Alnico*, *magnet Ceramic* memiliki kerapatan fluks yang rendah namun memiliki gaya koersif yang tinggi. *Magnet Ceramic* banyak digunakan karena memiliki biaya produksi yang rendah.

c. Magnet Rare-Earth

Terdapat dua tipe dari magnet langka yang masih ada di bumi yaitu magnet SmCo (*Samarium-Cobalt*) dan magnet NdFeB (*Neodymium-Iron-Boron*). Penggunaan magnet NdFeB magnet dapat memberikan *power density* yang tinggi dalam volume material yang kecil sehingga mampu menghasilkan mesin berkualitas terbaik dengan sedikit rugi-rugi daya dengan material yang lebih ringan. Berdasarkan pada kurva karakteristik dibawah, magnet permanen jenis *Neodymium Iron Boron* menjadi bahan yang paling baik dari bahan-bahan magnet permanen lainnya. *Neodymium Iron Boron* mempunyai nilai fluks permanen yang paling besar dibandingkan bahan feromagnetik yang lain. Magnet permanen jenis *Neodymium Iron Boron* memiliki fluks remanen senilai 1,2 Tesla magnet permanen jenis *Samarium Cobalt* memiliki fluks remanen senilai 1 Tesla, dan magnet permanen jenis *Ceramic* memiliki fluks remanen senilai 0,4 Tesla.



Gambar 2.6 Kurva karakteristik bahan magnet permanen pada suhu 20°C

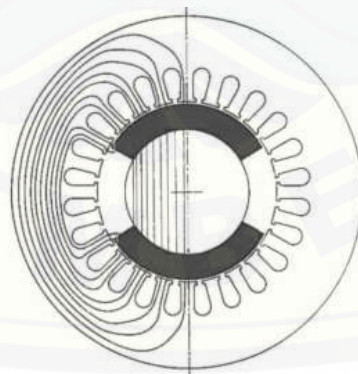
(Sumber: Azka, 2013)

Generator dengan magnet permanen memiliki tingkat efisiensi yang lebih baik dibandingkan dengan generator dengan sistem eksitasi sumber DC, karena tidak ada rugi-rugi eksitasi yang dihasilkan sehingga banyak digunakan terutama untuk turbin angin. Bentuknya yang lebih sederhana membuat generator magnet permanen menjadi lebih rapi, ringan, dan tersusun padat. Akan tetapi, generator

magnet permanen tidak dapat diatur seberapa besar eksitasi yang diberikan kepada generator, karena fluks magnetik yang dihasilkan magnet ini tetap sehingga arus eksitasi yang dihasilkan pun tidak dapat diubah sesuai kebutuhan. Dengan menggunakan magnet permanen sebagai penghasil medan magnet utama, generator ini tidak membutuhkan lagi adanya pencatuan arus DC sehingga biaya dan tenaga untuk merawat serta mengganti komponen-komponen pencatuan tersebut dapat dihilangkan.

2.3 Prinsip Kerja *Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)*

Prinsip kerja generator sinkron dengan generator sinkron magnet permanen sesungguhnya tidak jauh berbeda pada umumnya. Penggunaan magnet permanen menghasilkan medan magnet tetap sehingga tidak memerlukan pencatuan arus searah untuk menghasilkan medan magnet dan magnet induksi. Fluks dihasilkan dari medan magnet yang menembus bidang stator dari kutub magnet. Tipe fluks terdiri dari fluks radial dan fluks aksial. Generator ini memiliki konstruksi umum yang sama seperti generator lainnya yaitu terdiri dari memiliki lilitan stator sebagai tempat terjadinya induksi elektromagnetik, rotor tempat meletakkan magnet permanen sebagai sumber medan magnet, dan celah udara sebagai tempat mengalirnya fluks udara dari rotor ke stator.



Gambar 2.7 Aliran fluks magnet pada desain generator
(Sumber: Hendershot dkk, 1994)

Prinsip kerja sebuah generator umumnya berdasarkan hukum Faraday adalah bahwa perubahan fluks magnetik akibat terhadap waktu ($d\Phi/dt$) diakibatkan

putaran rotor yang akan menyebabkan fluks magnet yang diterima oleh kumparan stator akan menyebabkan timbulnya beda potensial antara ujung kumparan. Berdasarkan dengan hukum Induksi Faraday, tegangan akan terinduksi pada kumparan fasa stator sebesar (Budiman A. dkk., 2012):

$$E = - N \frac{d\Phi}{dt}$$

$$E = - \frac{d(N\Phi)}{dt} = - \frac{d\lambda}{dt} \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan:

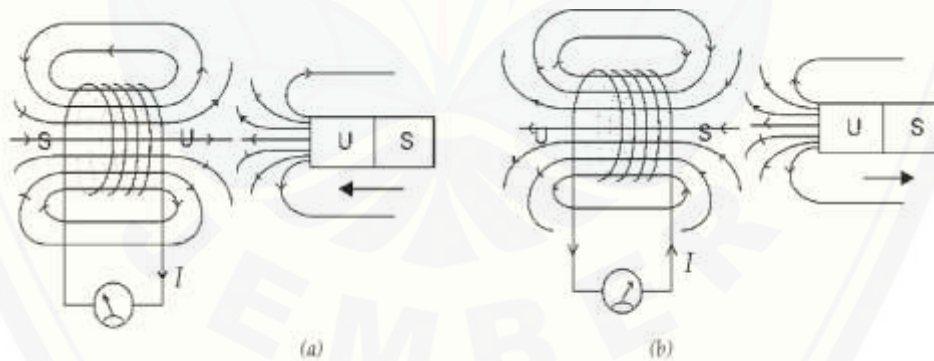
E = Tegangan yang dihasilkan (V)

dΦ = Perubahan besarnya fluks magnet (Wb)

dt = Perubahan waktu (t)

N = Jumlah lilitan

Tanda (-) merupakan hasil dari hukum *Lenz* yang menyatakan bahwa arah polaritas dari tegangan/ arus yang terinduksi pada kumparan akan menghasilkan arah fluks yang berlawanan dengan arah fluks yang menginduksikan tegangan tersebut. Sedangkan λ merupakan hasil perkalian dari banyaknya lilitan dengan besar fluks yang ditangkap tiap lilitan untuk suatu saat.



Gambar 2.8 Arah arus induksi berdasarkan hukum Lenz (a) magnet mendekati kumparan, (b) magnet menjauhi kumparan.

(Sumber: Pradipta dkk. 2015)

Kemudian Apabila kedua ujung kumparan itu dihubungkan dengan suatu penghantar yang memiliki hambatan tertentu akan mengalir arus yang disebut arus induksi dan beda potensial yang terjadi disebut GGL induksi. Gaya gerak listrik

induksi sangat bergantung pada waktu, yaitu semakin cepat terjadinya perubahan medan magnetik, gaya gerak listrik yang diinduksi semakin besar. Di sisi lain, gaya gerak listrik tidak sebanding dengan laju perubahan medan magnetik (B) tetapi sebanding dengan laju perubahan fluks magnetik (Φ) yang bergerak melintasi loop seluas A, yang secara matematis fluks magnetik tersebut dinyatakan sebagai berikut (Sumiati R., 2013):

$$\Phi = B \cdot A \cos \theta \dots\dots\dots (2.2)$$

Keterangan:

- Φ = Fluks medan magnet (Wb)
- B = Medan magnet rotor (T)
- A = Luas permukaan bidang kumparan stator (m^2)
- θ = sudut antara garis gaya medan magnet

Jika permukaan kumparan tegak lurus medan magnet rotor (B) maka sudut antara garis gaya medan magnet sebesar 90° sehingga fluks medan magnet (Φ) yang dihasilkan sebesar 0 Wb. Sebaliknya jika medan magnet rotor (B) sejajar terhadap kumparan maka sudut antara garis gaya medan magnet sebesar 0° sehingga besar nilai fluks medan magnet (Φ) merupakan hasil perkalian antara medan magnet rotor (B) dan luas permukaan bidang kumparan stator (A).

Kemudian untuk mengetahui arah vektor dari ketiga komponen hukum Faraday yaitu arah gaya gerak kumparan kawat, arah medan magnet, serta arah arus listrik menggunakan Kaidah tangan kanan *fleming*. Rumus dari kaidah tangan kanan yaitu (Setyaningsih A. dkk., 2018):

$$e = B \cdot l \cdot v \dots\dots\dots (2.3)$$

Keterangan:

- e = Tegangan
- B = Medan Magnet
- l = arah arus
- v = arah gerakan

Pada generator ketika rotor berputar, medan magnet yang dihasilkan juga berputar dengan kecepatan yang sama. Karena medan magnet putar tersebut diinduksikan pada kumparan jangkar (stator), maka pada stator muncul tegangan

dengan frekuensi elektrik yang sama (sinkron). Frekuensi elektris yang dihasilkan generator sinkron adalah sinkron dengan kecepatan putar generator. Hubungan antara kecepatan putar medan magnet pada mesin dengan frekuensi elektrik pada stator adalah (Chapman, 2002):

$$f = \frac{n_r \cdot p}{120} \dots\dots\dots (2.4)$$

Keterangan:

- f = Frekuensi
- n_r = Kecepatan Rotor
- p = Jumlah Kutub

2.4 Jenis- Jenis *Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)*

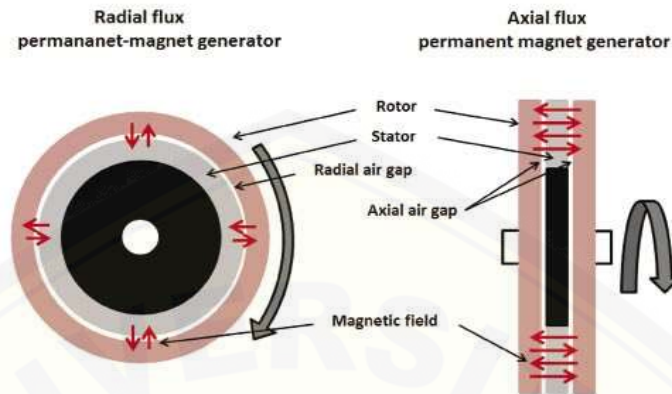
1. Generator *Fluks Radial*

Generator *Fluks Radial* merupakan generator permanen magnet yang memiliki arah *Fluks Radial* terhadap sumbu putar sehingga arah fluks searah dengan arah putaran rotor, hal ini dikarenakan fluks dihasilkan oleh magnet permanen yang letaknya melingkari bagian rotor, sedangkan lilitan melekat pada inti yang terhubung pusat stator. Generator *Fluks Radial* memiliki keunggulan yaitu mudah dalam pemasangan magnet permanen ke rotor. *Fluks Radial* permanen magnet ini strukturnya mirip dengan motor DC maupun motor AC yang digunakan sehari-hari (Ugmmartika, 2014).

2. Generator *Fluks Aksial*

Generator *Fluks Aksial* merupakan generator permanen magnet yang memiliki arah medan fluks sejajar dengan sumbu putar. Fluks tersebut merupakan hasil dari gaya tarik menarik antara dua buah magnet permanen yang memiliki kutub yang berbeda. Penggunaan dua buah magnet yang terletak diantara dua buah *slot disk* rotor sehingga bahan stator merupakan bahan non-magnetik. Generator fluks aksial memiliki sejumlah keunggulan yang berbeda dari *Fluks Radial*, yaitu dirancang untuk memiliki daya tinggi, sehingga rasio bahan inti berkurang, mudah disesuaikan dengan kondisi udara, mengurangi kebisingan dan tingkat getaran.

Selain itu, arah jalan *airgap* fluks dapat bervariasi (Ugmmartika, 2014). Berikut merupakan perbandingan arah fluks magnetik generator tipe radial dan aksial:



Gambar 2.9 Perbandingan arah fluks magnetik generator tipe radial dan aksial
(Sumber: Ugmmartika, 2014)

2.5 Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Pusat pembangkitan energi listrik yang mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik oleh turbin dan diubah lagi menjadi energi listrik oleh generator dengan memanfaatkan kecepatan dan tekanan angin. Pembangkit energi listrik tenaga angin merupakan pembangkit listrik nonkonvensional di Indonesia yang masih dalam tahap riset sehingga belum dapat dikomersialkan. Angin adalah salah satu bentuk energi yang tersedia di alam, Pembangkit Listrik Tenaga Angin mengkonversikan energi angin menjadi energi listrik dengan menggunakan turbin angin atau kincir angin.



Gambar 2.10 Pembangkit Listrik Tenaga Angin di PT. Lentera Bumi Nusantara
(Sumber: PT. Lentera Bumi Nusantara, 2018)

Cara kerjanya cukup sederhana, energi angin yang memutar turbin angin, diteruskan untuk memutar rotor pada generator di bagian belakang turbin angin, sehingga akan menghasilkan energi listrik. Energi listrik ini biasanya akan disimpan ke dalam baterai sebelum dapat dimanfaatkan



BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

3.1.1 Tempat Penelitian

Adapun tempat untuk penelitian dilakukan secara umum dilakukan di :

Tempat : Laboratorium *Renewable Energy, Center for Development of Advanced Science and Technology* (CDAST) Universitas Jember.
 Alamat : Jl. Kalimantan No.37, Krajan Timur, Sumbersari, Kabupaten Jember, Jawa Timur.

3.1.2 Waktu Penelitian

Waktu penelitian ini dimulai pada bulan Maret 2019 – Mei 2019, dengan rincian sebagai berikut:

Tabel 3.1 Rencana dan Jadwal Pelaksanaan Penelitian

No	Kegiatan	Bulan/Minggu											
		Bulan 1				Bulan 2				Bulan 3			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1.	Studi literatur												
2.	Pembuatan Rancang Bangun Generator												
3.	Pengujian Respon Keluaran												
4.	Analisa data dan pembahasan												
5.	Penyusunan laporan												

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 membuat proposal dan mendesain generator, sedangkan untuk perangkat keras digunakan untuk proses rancang bangun serta pengukurannya.

3.2.1 Perangkat Lunak

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

1. Perangkat Lunak Microsoft Excel 2013, untuk membuat grafik persamaan sistematis parameter generator permanen tipe *radial*.
2. Perangkat Lunak Corel Draw X-7, untuk mendesain bentuk 2D generator sinkron permanen magnet.
3. Perangkat Lunak Microsoft Word 2013, untuk membuat proposal skripsi.

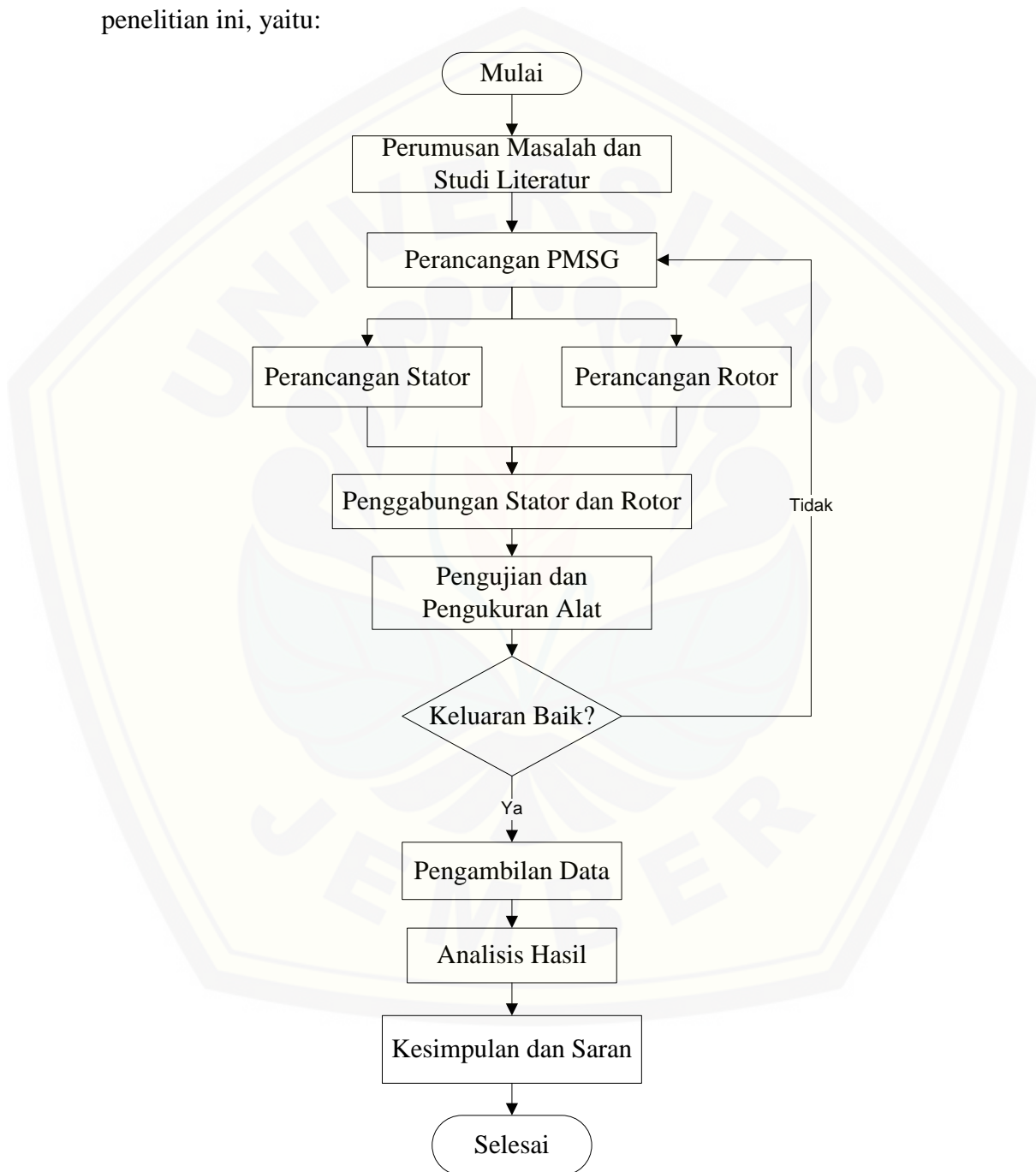
3.2.2 Perangkat Keras

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

1. Rangka Motor Kipas Angin Gantung
2. Magnet *Neodymium Iron Boron* (NdFeB) N52 30×10×5 mm
3. Kabel
4. *Bearing*
5. Baut
6. Timah
7. Solder
8. AVO meter
9. Tachometer
10. Motor bor *Couple*
11. Lampu Bohlam

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* Tahapan Penelitian

Dalam pembuatan skripsi dan penelitian ini, dibuat langkah-langkah atau tahapan penelitian sebagai berikut :

a. Perumusan Masalah dan Studi Literatur

Tahapan ini dilakukan dengan mengumpulkan literatur yang menunjang dalam penelitian sekaligus pengembangannya. Informasi yang didapat akan dijadikan acuan untuk melakukan perancangan dan pembuatan generator sinkron permanen magnet 1 fasa agar mendapatkan hasil penelitian yang maksimal.

b. Perancangan PMSG 1 Fasa

Merancang generator sinkron permanen magnet yang terdiri dari stator dan rotor untuk menghasilkan listrik 1 fasa yang maksimal. Pada perancangan terlebih dahulu mendesain menggunakan Corel Draw X7 untuk mendapatkan gambaran untuk perancangan generator sinkron permanen magnet secara keseluruhan.

c. Perancangan Stator

Pada perancangan stator dilakukan dengan membongkar kumparan kemudian dilakukan dengan cara melilit kembali sesuai dengan perhitungan jumlah lilitan.

d. Perancangan Rotor

Pada perancangan rotor dilakukan dengan menambahkan 14 Kutub dengan harapan generator menghasilkan keluaran tegangan dan arus. Pada perancangan rotor menggunakan magnet *Neodymium Iron Boron* (NdFeB) N52 yang mempunyai kekuatan magnet sebesar 1,43 mT.

e. Penggabungan Stator dan Rotor

Pada tahap ini dilakukan dengan cara menggabungkan stator dan rotor termasuk *housing* dari generator agar dapat dilakukan pengujian pada tahap berikutnya.

f. Pengujian dan Pengukuran Alat

Pada tahap ini dilakukan pengujian dan pengukuran alat untuk mengukur tegangan dan arus yang dihasilkan dengan variasi beban. Pada tahap ini juga menggunakan osiloskop untuk mengamati gelombang yang dihasilkan untuk menghasilkan gelombang sinus yang baik dan maksimal.

g. Pengambilan Data

Melakukan pengambilan data apabila keluaran yang dihasilkan sudah baik dan dapat dilakukan analisis dengan harapan eror persen kecil.

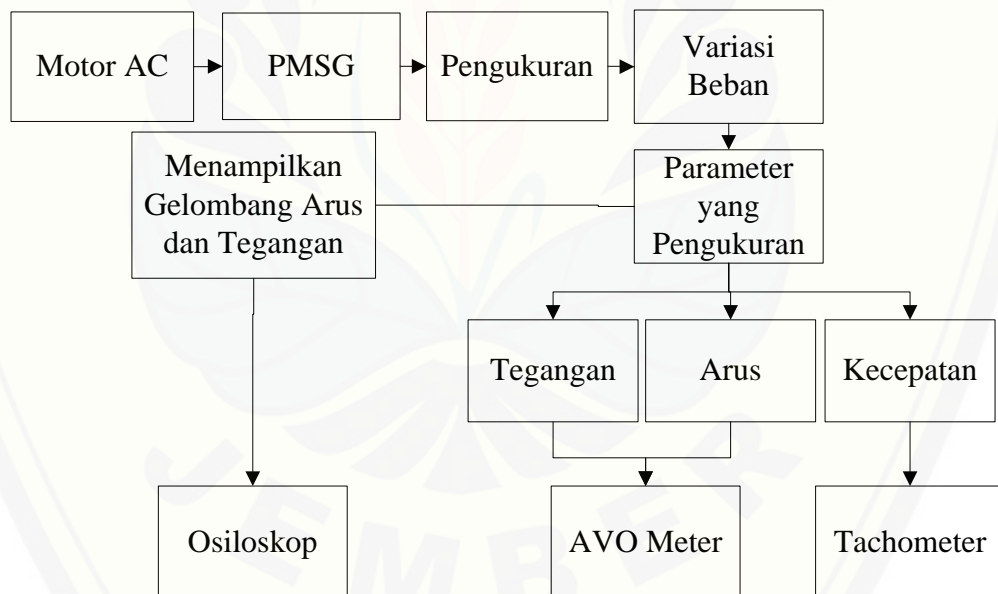
h. Analisis Hasil

Menganalisis *output* dari sistem yang telah dirancang untuk mengetahui sesuai tidak dengan keluaran yang diharapkan.

f. Pengambilan 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



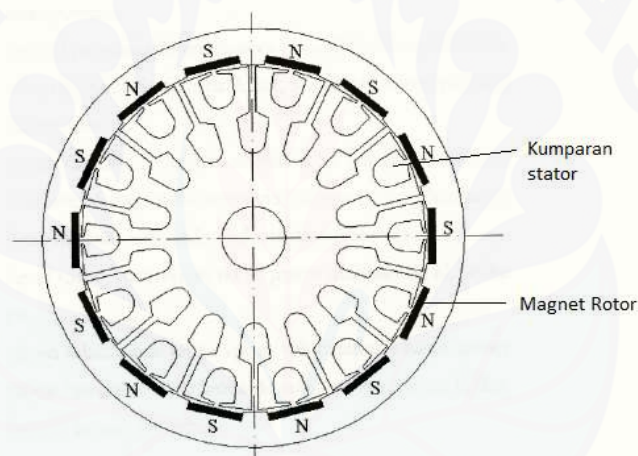
Gambar 3.2 Blok Diagram Sistem

Pada diagram blok sistem motor AC digunakan untuk memutar rotor dari *Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)* 1 fasa untuk menghasilkan listrik. Pada *Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)* 1 fasa menggunakan magnet *Neodymium Iron Boron (NdFeB)* berjumlah 14 buah pada rotor dan 14 buah kumparan pada stator. Pada *Permanent Magnet Synchronous*

Generator (PMSG) 1 fasa ini menggunakan stator tunggal dan rotor tunggal untuk menghasilkan listrik. Diharapkan listrik yang dihasilkan memiliki gelombang sinus yang baik. Kemudian pada sistem akan dilakukan pengujian dengan beberapa variasi beban dengan parameter pengukuran berupa arus, tegangan dan kecepatan rotasi permenit (rpm) serta menampilkan bentuk gelombang sinus menggunakan osiloskop. Pada pengukuran arus dan tegangan menggunakan AVO meter serta kecepatan menggunakan Tachometer.

3.5 Gambaran Desain Alat

Berikut merupakan desain perancangan alat *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) 1 fasa:



Gambar 3.3 Desain *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG)



Gambar 3.4 Kipas Angin Gantung model NK-562

Pada penelitian ini menggunakan Kipas Angin Gantung model NK-562 sebagai komponen utama membuat *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG). Pada alat tersebut memiliki 14 kumparan pada stator sehingga pada rotor akan dipasang 14 kutub magnet jenis *Neodymium Iron Boron* N52 (NdFeB) yang mempunyai kekuatan magnet sebesar 1,43 mT. Kemudian pada alat ini akan dilakukan pengujian arus, tegangan, kecepatan dan akan ditampilkan gelombang sinus yang dihasilkan oleh *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG).

3.6 Analisis Perhitungan *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG)

Pengujian kinerja *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) digunakan untuk mengetahui kemampuan dari *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) itu sendiri. Beberapa pengujian yang akan dilakukan pengukuran yaitu seperti frekuensi, arus, tegangan pada GGL induksi, dan daya yang dihasilkan generator. Hal tersebut dilakukan untuk mendapatkan keluaran maksimal pada *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG). Berikut merupakan rumus perhitungan untuk analisis keluaran pada *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG):

3.6.1 Menentukan Frekuensi

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):

$$f = \frac{n_r \cdot p}{120} \dots\dots\dots (3.1)$$

Keterangan:

n_r = putaran rotor (rpm)

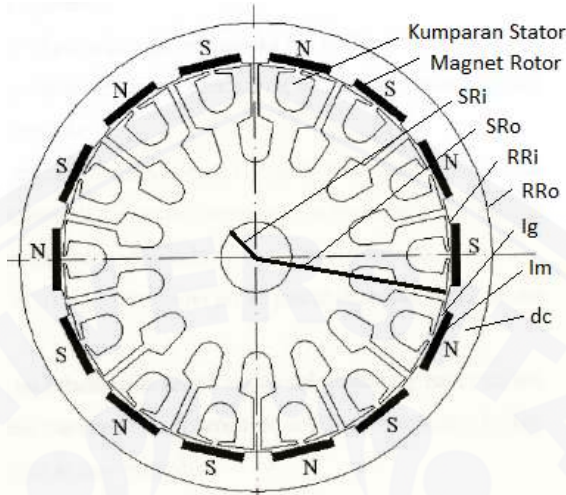
p = jumlah kutub magnet

f = frekuensi (Hz)

3.6.2 Perhitungan Dimensi Utama Generator

Tahap selanjutnya melakukan perhitungan Jari- Jari Rotor dalam (RRi) dan Jari- Jari Rotor luar (RRo). Terlebih dahulu memahami bagian- bagian dari

Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) untuk mempermudah menganalisis perhitungan yang akan dilakukan. Berikut detail perhitungan dimensi *Permanent Magnet Synchronous Generator* (Hebala A. et al., 2018):



Gambar 3.5 Keterangan Dimensi *Permanent Magnet Synchronous Generator*

Perhitungan untuk mencari Jari- Jari luar rotor (RRo):

$$RRo = SRo + Ig + Im + dc \dots\dots\dots (3.2)$$

Keterangan:

- RRo = Jari- jari luar rotor
- SRo = Jari- jari luar stator
- Ig = Jari- jari *airgap*
- Im = Jari- jari magnet
- dc = Tebal rotor

Perhitungan untuk mencari Jari- Jari dalam rotor (RRi):

$$RRi = SRo + Ig + Im \dots\dots\dots (3.3)$$

Keterangan:

- SRo = Jari- jari luar stator
- Ig = Jari- jari *airgap*
- Im = Jari- jari magnet

Untuk menentukan nilai jari- jari dalam stator (SRi) dan jari- jari luar stator (SRo) dapat dilakukan dengan mengukur menggunakan jangka sorong dari titik tengah dari generator.

3.6.3 Menentukan tegangan, arus dan daya

Tahap selanjutnya ialah menghitung tegangan, arus dan daya secara teori. Terlebih dahulu dilakukan perhitungan untuk menentukan spesifikasi lilitan dan pengkabelan. Persamaan Faktor lilitan dapat dicari dengan sebagai berikut (Hebala A. et al., 2018):

$$kw = \sin\left(\frac{\text{coil_span}}{2}\right) \times \frac{\sin(ncpp \frac{\text{slot_pitch}}{2})}{ncpp \sin\left(\frac{\text{slot_pitch}}{2}\right)} \dots\dots\dots (3.4)$$

Keterangan:

$ncpp$ = Jumlah coil per pole per fasa

Coil_span = Lebar coil

Slot_pitch = Jarak antar slot

Jumlah putaran efektif per coil (N_a) didapatkan menggunakan persamaan rumus (Hebala A. et al., 2018):

$$Na = \frac{V_{rated}}{(\sqrt{2} \omega m S R_i L_{stk} kw B_g)} \dots\dots\dots (3.5)$$

Keterangan:

V_{rated} = Nilai Tegangan

ωm = Kecepatan dalam rotasi per sekon

L_{stk} = Tebal stator

kw = faktor lilitan

B_g = kerapatan fluks pada *airgap*

Untuk menghitung arus per phasa rata-ratanya digunakan persamaan:

$$I = \frac{Prated}{V_{rated}.Q.PF} \dots\dots\dots (3.6)$$

Keterangan:

$Prated$ = Nilai daya

PF = Power Factor

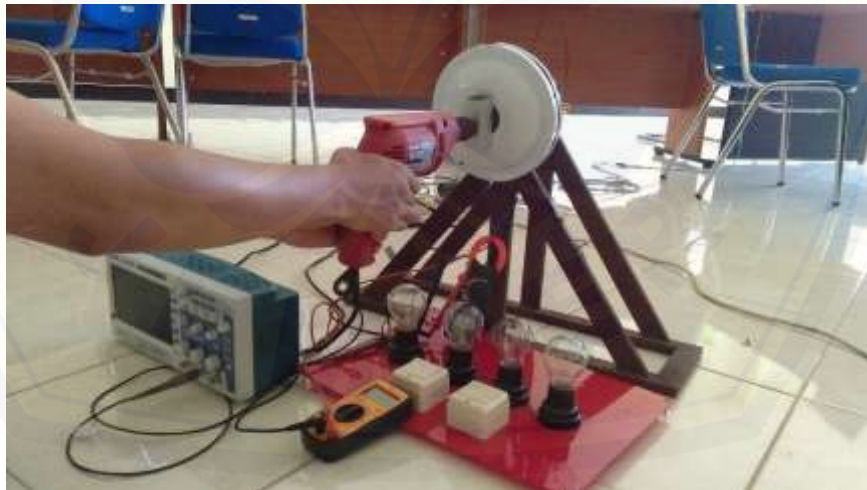
Q = Jumlah fasa

3.7 Pengujian *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG)

Pengujian *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) terdiri dari beberapa tahapan untuk dapat menganalisis kemampuan dari generator tersebut. Hal tersebut dilakukan untuk menganalisis keluaran tegangan, arus dan daya yang dihasilkan generator. Berikut merupakan tahapan pengujian PMSG:

1. Pengukuran tahanan lampu bohlam yang digunakan sebagai beban.
2. Pengukuran tegangan generator tanpa beban.
3. Pengukuran tegangan dan arus dengan variasi beban pada frekuensi 50 Hz dengan kecepatan pengujian generator pada 428,57 rpm \approx 430 rpm
4. Pengukuran tegangan dan arus dengan variasi beban pada kecepatan pengujian generator 200 rpm, 400 rpm, 600 rpm, 800 rpm, 1000 rpm, 1200 rpm, 1400 rpm dan 1600 rpm.

Pada pengujian PMSG ini menggunakan beberapa alat ukur untuk menguji kemampuan dari generator tersebut. Alat ukur yang digunakan terdiri dari AVO meter, tang meter, watt meter dan osiloskop untuk menampilkan sinyal sinus. Pada pengujian ini menggunakan *prime mover* berupa bor listrik untuk memutar rotor dari PMSG. Berikut merupakan gambar peralatan pengujian PMSG:



Gambar 3.6 Pengujian *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG)

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian rancang bangun rancang bangun *permanent magnet synchronous generator* 1 fasa fluks radial yang telah dilakukan pengujian maka dapat disimpulkan bahwa :

1. Perancangan *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) menggunakan rangka *housing* dan stator motor kipas gantung 60 watt merk NIKO model NK-562. Material magnet permanen yang digunakan adalah magnet *Neodymium Iron Boron*. Jumlah *slot* dan *pole* untuk desain yang dibuat adalah 14 slot dan 14 pole. Setiap kumparan pada masing- masing *slot* terdiri dari 800 lilitan dengan diameter kawat 0,15 mm.
2. Pada pengujian *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) tanpa beban menghasilkan tegangan semakin besar seiring semakin besar nilai kecepatan generator. Pada saat penambahan variasi beban didapatkan hasil pengujian semakin besar nilai kecepatan putaran generator maka tegangan, arus dan daya yang dihasilkan semakin besar.
3. Pada pengujian *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) dengan variasi beban dapat diketahui semakin besar nilai beban lampu bohlam yang digunakan maka arus yang dihasilkan semakin besar sedangkan tegangan yang dihasilkan semakin kecil. Pada perhitungan daya memiliki karakteristik yang berbeda dengan daya terbesar pada Beban Lampu Bohlam 25 watt.

5.2 Saran

Setelah dilakukannya penelitian ini maka peneliti menyarankan untuk penelitian selanjutnya yaitu.

1. Menggunakan magnet neodymium dengan luas penampang yang lebih besar disesuaikan dengan rotor dan panjang kumparan agar medan magnet menginduksi lilitan pada stator secara optimal.
2. Menggunakan rangka generator yang lebih besar dengan jumlah kutub yang lebih banyak agar mendapatkan daya hasil keluaran yang semakin besar.

3. *Air Gap* atau jarak celah udara perlu dipertimbangkan agar mendapatkan hasil daya optimal dan aman saat digunakan dilapangan.



DAFTAR PUSTAKA

- Hebala A. et al. 2018. Detailed Design Procedures for PMSG Direct-Driven by Wind Turbines. Egypt: Arab Academy for Science and Technology and Maritime.
- Umami M. I. dkk., 2017. Desain Generator Sinkron Magnet Permanen Jenis Neodymium Iron Boron Untuk PLTB Daya 500 Watt Menggunakan Perangkat Lunak MagNet Infolytica. Mataram: Universitas Mataram.
- Adeguna R. P. 2010. Desain Generator Magnet Permanen Fluks Radial Pada Turbin Angin Kecepatan Rendah Untuk Mengurangi Torsi Denyut. Thesis. Yogyakarta: Universitas Gajah Mada.
- Dzikri, N.M. 2016. Perancangan Pembangkit Listrik Dengan Mengkonversi Motor Induksi Sebagai Generator Induksi Magnet Permanen. Surakarta: Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Irfan, dkk., 2019. Disain Dan Simulasi Generator Magnet Permanen 3 Fasa Menggunakan Softwawre Magnet Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Angin Kecepatan Rendah. Riau: Universitas Riau.
- Wijk, J.H.V. 2012. Analysis and Design of a Double-sided Rotor Iron-Cored Radial Flux Permanent Magnet Synchronous Wind Turbine Generator. Stellenbosch: University of Stellenbosch.
- Andika, dkk., 2018. Perancangan Dan Pembuatan Generator Fluks Radial Tiga Fasa Magnet Permanen Kecepatan Rendah. Riau: Universitas Riau.
- Rastogi S., et al. 2016. Design, Analysis and Optimization Of Permanent Magnet Synchronous Generator. India: Department of Electrical Engineering IIT (BHU) Varanasi.
- Ali M., dkk. 2015. A Desain Pitch Angle Controller Turbin Angin Dengan Permanent Magnetic Synchronous Generator (PMSG) Menggunakan Imperialist Competitive Algorithm (ICA). Malang: Universitas Malang.

- Madani, Nima. 2011. Design of a Permanent Magnet Synchronous Generator for a Vertical Axis Wind Turbine. Sweden: Electrical Engineering Master of Science Stockholm
- Darijani A., dkk. 2019. Design of a Permanent-Magnet Synchronous Generator for a 2 MW Gearless Horizontal-Axis Wind Turbine According to its Capability Curves. Iranian Journal of electrical & electronic Engineering.
- Ghita C., dkk. 2015. Wind turbine permanent magnet synchronous generator magnetic field study. Romania: University Politehnica of Bucharest.
- Prof. M.J. Kamper. 2012. Modelling and design of an eddy current coupling for slipsynchronous permanent magnet wind generators. Stellenbosch. Stellenbosch University.
- Baktiono, Surya. 2013. A Study of Field-Oriented Control of a Permanent Magnet Synchronous Generator and Hysteresis Current Control for Wind Turbine Application. Thesis: Ohio State University.
- Prof. M.J. Kamper. 2012. Direct Grid Connection and Low Voltage Ride-Through for a Slip Synchronous-Permanent Magnet Wind Turbine Generator. Stellenbosch. Stellenbosch University.
- Budiman A. dkk. 2012. Desain generator magnet permanen untuk sepeda listrik. Surakarta: Universitas Surakarta.
- Pradipta dkk. 2015. Pengereman Dinamis Konvensional Pada Motor Induksi Tiga Fasa. Semarang: Universitas Dipenogoro.

LAMPIRAN 1

TEKNIK ELEKTRO UNIVERSITAS JEMBER

▪ Perhitungan Tanpa Beban

○ Kecepatan 200 rpm

$$kw = \sin\left(\frac{\text{coil_span}}{2}\right) \times \frac{\sin(ncpp \frac{\text{slot_pitch}}{2})}{ncpp \sin\left(\frac{\text{slot_pitch}}{2}\right)}$$

$$= \sin\left(\frac{30^\circ}{2}\right) \times \frac{\sin\left(1 \cdot \frac{0,03}{2}\right)}{1 \cdot \sin\left(\frac{0,03}{2}\right)}$$

$$= \sin 15^\circ$$

$$= 0,26$$

$$V_{\text{rated}} = Na \cdot \sqrt{2} \cdot \omega m \cdot SRi \cdot Lstk \cdot Kw \cdot Bg$$

$$= 800 \cdot \sqrt{2} \cdot 300 \cdot 0,015 \cdot 0,065 \cdot 0,26 \cdot 0,8$$

$$= 69$$

$$\text{Error Persen} = \left| \frac{\text{Tegangan Hitung} - \text{Tegangan Ukur}}{\text{Daya Hitung}} \right| \times 100 \%$$

$$= \left| \frac{69 - 67}{69} \right| \times 100 \%$$

$$= 2,9 \%$$

○ Kecepatan 400 rpm

$$kw = \sin\left(\frac{\text{coil_span}}{2}\right) \times \frac{\sin(ncpp \frac{\text{slot_pitch}}{2})}{ncpp \sin\left(\frac{\text{slot_pitch}}{2}\right)}$$

$$= \sin\left(\frac{30^\circ}{2}\right) \times \frac{\sin\left(1 \cdot \frac{0,03}{2}\right)}{1 \cdot \sin\left(\frac{0,03}{2}\right)}$$

$$= \sin 15^\circ$$

$$= 0,26$$

$$V_{\text{rated}} = Na \cdot \sqrt{2} \cdot \omega m \cdot SRi \cdot Lstk \cdot Kw \cdot Bg$$

$$= 800 \cdot \sqrt{2} \cdot 330 \cdot 0,015 \cdot 0,065 \cdot 0,26 \cdot 0,8$$

$$= 234 \text{ volt}$$

$$\text{Error Persen} = \left| \frac{\text{Tegangan Hitung} - \text{Tegangan Ukur}}{\text{Daya Hitung}} \right| \times 100 \%$$

$$= \left| \frac{234-229}{234} \right| \times 100 \%$$

$$= 2,13 \%$$

○ **Kecepatan 600 rpm**

$$kw = \sin\left(\frac{\text{coil_span}}{2}\right) \times \frac{\sin(ncpp \frac{\text{slot_pitch}}{2})}{ncpp \sin\left(\frac{\text{slot_pitch}}{2}\right)}$$

$$= \sin\left(\frac{30^\circ}{2}\right) \times \frac{\sin\left(1 \cdot \frac{0,03}{2}\right)}{1 \cdot \sin\left(\frac{0,03}{2}\right)}$$

$$= \sin 15^\circ$$

$$= 0,26$$

$$V_{\text{rated}} = Na \cdot \sqrt{2} \cdot \omega m \cdot SRi \cdot Lstk \cdot Kw \cdot Bg$$

$$= 800 \cdot \sqrt{2} \cdot 412 \cdot 0,015 \cdot 0,065 \cdot 0,26 \cdot 0,8$$

$$= 290$$

$$\text{Error Persen} = \left| \frac{\text{Tegangan Hitung} - \text{Tegangan Ukur}}{\text{Daya Hitung}} \right| \times 100 \%$$

$$= \left| \frac{290-273}{290} \right| \times 100 \%$$

$$= 5,8 \%$$

○ **Kecepatan 800 rpm**

$$kw = \sin\left(\frac{\text{coil_span}}{2}\right) \times \frac{\sin(ncpp \frac{\text{slot_pitch}}{2})}{ncpp \sin\left(\frac{\text{slot_pitch}}{2}\right)}$$

$$= \sin\left(\frac{30^\circ}{2}\right) \times \frac{\sin\left(1 \cdot \frac{0,03}{2}\right)}{1 \cdot \sin\left(\frac{0,03}{2}\right)}$$

$$= \sin 15^\circ$$

$$= 0,26$$

$$V_{\text{rated}} = Na \cdot \sqrt{2} \cdot \omega m \cdot SRi \cdot Lstk \cdot Kw \cdot Bg$$

$$= 800 \cdot \sqrt{2} \cdot 430 \cdot 0,015 \cdot 0,065 \cdot 0,26 \cdot 0,8$$

$$= 360$$

$$\text{Error Persen} = \left| \frac{\text{Tegangan Hitung} - \text{Tegangan Ukur}}{\text{Daya Hitung}} \right| \times 100 \%$$

$$= \left| \frac{360-391}{360} \right| \times 100 \%$$

$$= 8,6 \%$$

○ **Kecepatan 1000 rpm**

$$kw = \sin\left(\frac{\text{coil_span}}{2}\right) \times \frac{\sin(ncpp \frac{\text{slot_pitch}}{2})}{ncpp \sin\left(\frac{\text{slot_pitch}}{2}\right)}$$

$$= \sin\left(\frac{30^\circ}{2}\right) \times \frac{\sin\left(1 \cdot \frac{0,03}{2}\right)}{1 \cdot \sin\left(\frac{0,03}{2}\right)}$$

$$= \sin 15^\circ$$

$$= 0,26$$

$$V_{\text{rated}} = Na \cdot \sqrt{2} \cdot \omega m \cdot SRi \cdot Lstk \cdot Kw \cdot Bg$$

$$= 800 \cdot \sqrt{2} \cdot 450 \cdot 0,015 \cdot 0,065 \cdot 0,26 \cdot 0,8$$

$$= 493$$

$$\text{Error Persen} = \left| \frac{\text{Tegangan Hitung} - \text{Tegangan Ukur}}{\text{Daya Hitung}} \right| \times 100 \%$$

$$= \left| \frac{493-519}{493} \right| \times 100 \%$$

$$= 5,27 \%$$

○ **Kecepatan 1200 rpm**

$$kw = \sin\left(\frac{\text{coil_span}}{2}\right) \times \frac{\sin(ncpp \frac{\text{slot_pitch}}{2})}{ncpp \sin\left(\frac{\text{slot_pitch}}{2}\right)}$$

$$= \sin\left(\frac{30^\circ}{2}\right) \times \frac{\sin\left(1 \cdot \frac{0,03}{2}\right)}{1 \cdot \sin\left(\frac{0,03}{2}\right)}$$

$$= \sin 15^\circ$$

$$= 0,26$$

$$V_{\text{rated}} = Na \cdot \sqrt{2} \cdot \omega m \cdot SRi \cdot Lstk \cdot Kw \cdot Bg$$

$$= 800 \cdot \sqrt{2} \cdot 460 \cdot 0,015 \cdot 0,065 \cdot 0,26 \cdot 0,8$$

$$= 520$$

$$\text{Error Persen} = \left| \frac{\text{Tegangan Hitung} - \text{Tegangan Ukur}}{\text{Daya Hitung}} \right| \times 100 \%$$

$$= \left| \frac{520-554}{520} \right| \times 100 \%$$

$$= 6,5 \%$$

▪ **Perhitungan pada Beban 15 watt**

○ **Kecepatan 200 rpm**

$$kw = \sin\left(\frac{\text{coil_span}}{2}\right) \times \frac{\sin(ncpp \frac{\text{slot_pitch}}{2})}{ncpp \sin\left(\frac{\text{slot_pitch}}{2}\right)}$$

$$= \sin\left(\frac{30^\circ}{2}\right) \times \frac{\sin\left(1 \cdot \frac{0,03}{2}\right)}{1 \cdot \sin\left(\frac{0,03}{2}\right)}$$

$$= \sin 15^\circ$$

$$= 0,26$$

$$R = 281 \Omega$$

$$V_{\text{rated}} = Na \cdot \sqrt{2} \cdot \omega m \cdot SRi \cdot Lstk \cdot Kw \cdot Bg$$

$$= 800 \cdot \sqrt{2} \cdot 20,94 \cdot 0,015 \cdot 0,065 \cdot 0,26 \cdot 0,8$$

$$= 81$$

$$I = \frac{V}{R}$$

$$= \frac{81}{281}$$

$$= 0,01$$

$$Prated = I \cdot V_{\text{rated}} \cdot Q \cdot PF$$

$$= 0,01 \cdot 81 \cdot 1 \cdot 1$$

$$= 0,81$$

$$\text{Error Persen} = \left| \frac{\text{Daya Hitung} - \text{Daya Ukur}}{\text{Daya Hitung}} \right| \times 100 \%$$

$$= \left| \frac{0,81 - 0,9}{0,81} \right| \times 100 \%$$

$$= 11 \%$$

○ **Kecepatan 400 rpm**

$$kw = 0,26$$

$$R = 281 \Omega$$

$$\begin{aligned} V_{rated} &= N_a \cdot \sqrt{2} \cdot \omega m \cdot S_{Ri} \cdot L_{stk} \cdot K_w \cdot B_g \\ &= 800 \cdot \sqrt{2} \cdot 41,89 \cdot 0,015 \cdot 0,065 \cdot 0,26 \cdot 0,8 \\ &= 145 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I &= \frac{V}{R} \\ &= \frac{145}{281} \\ &= 0,05 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Prated &= I \cdot V_{rated} \cdot Q \cdot PF \\ &= 0,05 \cdot 145 \cdot 1 \cdot 1 \\ &= 7,25 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Error Persen} &= \left| \frac{\text{Daya Hitung} - \text{Daya Ukur}}{\text{Daya Hitung}} \right| \times 100 \% \\ &= \left| \frac{7,25 - 11,5}{7,25} \right| \times 100 \% \\ &= 5,3 \% \end{aligned}$$

o **Kecepatan 600 rpm**

$$k_w = 0,26$$

$$R = 281 \Omega$$

$$\begin{aligned} V_{rated} &= N_a \cdot \sqrt{2} \cdot \omega m \cdot S_{Ri} \cdot L_{stk} \cdot K_w \cdot B_g \\ &= 800 \cdot \sqrt{2} \cdot 62,83 \cdot 0,015 \cdot 0,065 \cdot 0,26 \cdot 0,8 \\ &= 250 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I &= \frac{V}{R} \\ &= \frac{250}{281} \\ &= 0,07 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Prated &= I \cdot V_{rated} \cdot Q \cdot PF \\ &= 0,07 \cdot 250 \cdot 1 \cdot 1 \\ &= 19 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Error Persen} &= \left| \frac{\text{Daya Hitung} - \text{Daya Ukur}}{\text{Daya Hitung}} \right| \times 100 \% \\ &= \left| \frac{19 - 20,1}{19} \right| \times 100 \% \\ &= 1,1 \% \end{aligned}$$

o **Kecepatan 800 rpm**

$$kw = 0,26$$

$$R = 281 \Omega$$

$$\begin{aligned} V_{rated} &= Na. \sqrt{2}. \omega m. SRi. Lstk. Kw. Bg \\ &= 800. \sqrt{2}. 83,77 . 0,015. 0,065,026. 0,8 \\ &= 315 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I &= \frac{V}{R} \\ &= \frac{315}{281} \\ &= 0,1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Prated &= I. V_{rated}. Q. PF \\ &= 0,1. 351. 1. 1 \\ &= 32 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Error Persen} &= \left| \frac{\text{Daya Hitung} - \text{Daya Ukur}}{\text{Daya Hitung}} \right| \times 100 \% \\ &= \left| \frac{32-29}{29} \right| \times 100 \% \\ &= 10,3 \% \end{aligned}$$

o **Kecepatan 1000 rpm**

$$kw = 0,26$$

$$R = 281 \Omega$$

$$\begin{aligned} V_{rated} &= Na. \sqrt{2}. \omega m. SRi. Lstk. Kw. Bg \\ &= 800. \sqrt{2}. 104,72 . 0,015. 0,065,026. 0,8 \\ &= 356 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I &= \frac{V}{R} \\ &= \frac{30}{281} \\ &= 0,11 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Prated &= I. V_{rated}. Q. PF \\ &= 0,11. 30. 1. 1 \\ &= 39,16 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Error Persen} &= \left| \frac{\text{Daya Hitung} - \text{Daya Ukur}}{\text{Daya Hitung}} \right| \times 100 \% \\ &= \left| \frac{29 - 32,5}{29} \right| \times 100 \% \\ &= 12 \% \end{aligned}$$

○ **Kecepatan 1200 rpm**

$$kw = 0,26$$

$$R = 281 \Omega$$

$$\begin{aligned} V_{\text{rated}} &= Na \cdot \sqrt{2} \cdot \omega m \cdot SRi \cdot Lstk \cdot Kw \cdot Bg \\ &= 800 \cdot \sqrt{2} \cdot 125,66 \cdot 0,015 \cdot 0,065 \cdot 0,26 \cdot 0,8 \\ &= 380 \text{ volt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I &= \frac{V}{R} \\ &= \frac{380}{281} \\ &= 0,15 \text{ ampere} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Prated &= I \cdot V_{\text{rated}} \cdot Q \cdot PF \\ &= 0,15 \cdot 380 \cdot 1 \cdot 1 \\ &= 57 \text{ watt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Error Persen} &= \left| \frac{\text{Daya Hitung} - \text{Daya Ukur}}{\text{Daya Hitung}} \right| \times 100 \% \\ &= \left| \frac{72,2 - 73,53}{72,2} \right| \times 100 \% \\ &= 1,8 \% \end{aligned}$$

○ **Kecepatan 1400 rpm**

$$kw = 0,26$$

$$R = 281 \Omega$$

$$\begin{aligned} V_{\text{rated}} &= Na \cdot \sqrt{2} \cdot \omega m \cdot SRi \cdot Lstk \cdot Kw \cdot Bg \\ &= 800 \cdot \sqrt{2} \cdot 146,6 \cdot 0,015 \cdot 0,065 \cdot 0,26 \cdot 0,8 \\ &= 450 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I &= \frac{V}{R} \\ &= \frac{450}{281} \\ &= 0,15 \end{aligned}$$

$$Prated = I \cdot V_{\text{rated}} \cdot Q \cdot PF$$

$$= 0,08 \cdot 450 \cdot 1 \cdot 1$$

$$= 67,5$$

$$\begin{aligned} \text{Error Persen} &= \left| \frac{\text{Daya Hitung} - \text{Daya Ukur}}{\text{Daya Hitung}} \right| \times 100 \% \\ &= \left| \frac{36 - 36,8}{36} \right| \times 100 \% \\ &= 2,2 \% \end{aligned}$$

○ **Kecepatan 1600 rpm**

$$kw = 0,26$$

$$R = 281 \Omega$$

$$V_{\text{rated}} = N_a \cdot \sqrt{2} \cdot \omega_m \cdot S R_i \cdot L_{\text{stk}} \cdot K_w \cdot B_g$$

$$= 800 \cdot \sqrt{2} \cdot 167,55 \cdot 0,015 \cdot 0,065 \cdot 0,26 \cdot 0,8$$

$$= 505$$

$$I = \frac{V}{R}$$

$$= \frac{505}{281}$$

$$= 0,17$$

$$Prated = I \cdot V_{\text{rated}} \cdot Q \cdot PF$$

$$= 0,09 \cdot 505 \cdot 1 \cdot 1$$

$$= 85,85$$

$$\begin{aligned} \text{Error Persen} &= \left| \frac{\text{Daya Hitung} - \text{Daya Ukur}}{\text{Daya Hitung}} \right| \times 100 \% \\ &= \left| \frac{45 - 47,79}{45} \right| \times 100 \% \\ &= 1,75 \% \end{aligned}$$

LAMPIRAN 2
TEKNIK ELEKTRO UNIVERSITAS JEMBER

- Dokumentasi Perancangan dan Pengujian Alat



Gambar 1. Hasil Generator *rewinding*



Gambar 2. Pemotongan Kawat Email sebelum *rewinding*



Gambar 3. Proses *rewinding*



Gambar 4. Rewinding alat



Gambar 4. Pengukuran Tahanan Beban Lampu 15 watt



Gambar 5. Pengukuran Tahanan Beban Lampu 25 watt



Gambar 6. Pengukuran Tahanan Beban Lampu 40 watt



Gambar 7. Pengukuran Tahanan Beban Lampu 75 watt



Gambar 8. Pengujian Alat



Gambar 9. Pengujian Alat



Gambar 10. Pengujian Alat