

APLIKASI PERANCANGAN GENERATOR SINKRON MAGNET PERMANEN MENGGUNAKAN MATLAB SIMULINK

Charles Ronald Harahap^{1*}, Noer Soedjarwanto², Yuliana Fistriyani Hayon³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Elektro, Universitas Lampung, Jl. Prof. Brojonegoro, Bandar Lampung 35145

Riwayat artikel:

Received: 22 November 2022

Accepted: 29 Desember 2023

Published: 1 Januari 2024

Keywords:

Generator Sinkron Magnet Permanen, PLTB, dan MPPT (Maximum Power Point Tracking)

Correspondent Email:

charles.harahap69@gmail.com

Abstrak. Peningkatan penggunaan energi listrik menjadi salah satu faktor pendorong pemanfaatan energi terbarukan. Salah satunya dengan memanfaatkan angin untuk Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). Komponen utama yang menjadi penghasil energi listrik alternatif adalah generator yang akan dirancang pada penelitian ini. Dalam merancang sebuah generator dengan kapasitas tertentu dibutuhkan perencanaan yang baik. Penelitian ini mengusulkan untuk mengaplikasikan generator yang dirancang pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). Adapun tahapan-tahapan penelitian adalah melakukan perancangan generator sinkron magnet permanen menggunakan *Matlab*, membuat desain generator sinkron magnet permanen menggunakan *Magnet Involtyca*, dan mengaplikasikan generator yang dirancang pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) menggunakan *Matlab Simulink*. Penelitian ini dilakukan dengan beberapa perangkat lunak atau *software* yaitu *Magnet Involtyca* untuk melakukan simulasi medan elektromagnetik 2D dan 3D pada generator sinkron magnet permanen, perangkat lunak *Matlab* digunakan untuk membantu proses pemrograman perancangan generator sinkron magnet permanen dikarenakan perhitungan yang berulang dan melelahkan jika dilakukan secara manual, dan perangkat lunak *Matlab Simulink* digunakan untuk simulasi sistem kerja Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). Proses perancangan generator sinkron magnet permanen 12 Slot 8 Kutub terdapat beberapa parameter yang harus ditentukan yaitu dimensi utama generator sinkron magnet permanen, dimensi stator, dimensi kumparan stator, dimensi rotor, dimensi magnet, parameter arus, tegangan, daya dan efisiensi. Hasil rancangan generator kemudian diaplikasikan dan dilakukan pengujian rangkaian dengan menggunakan MPPT dan tanpa MPPT. MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) dengan metode *Peturb and Observe* adalah salah satu komponen elektronik yang digunakan untuk memaksimalkan daya keluaran suatu pembangkit. Hasil perancangan generator sinkron magnet permanen dapat digunakan dengan baik pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB).

Abstract. The increased use of electrical energy is one of the driving factors for renewable energy utilization. One of them is by utilizing wind for the wind power plant. The main component that produces alternative electrical energy is the generator. In designing a generator with a certain capacity, good planning is needed. The research proposes to apply a generator that is designed on the wind power generation system. The stages of the research are designing permanent magnet synchronous generator using *Matlab*, making its designs using *Infolytica's MagNet*, and applying generator designed in the wind power generation system using *Simulink Matlab*. This research was conducted with some software, namely *Infolytica's MagNet* to simulate 2D and 3D electromagnetic fields on permanent magnet

synchronous generator, Matlab software is used to help the programming process of designing the permanent magnet synchronous generator due to repeated and tiring calculations if it carried out manually, and devices software is Simulink Matlab used to simulate the working system of wind power plants. The process of designing permanent magnet synchronous generator 12 Slot 8 Pole, there are several parameters that must be determined, namely the main dimensions of permanent magnet synchronous generator, stator dimensions, stator coil dimensions, rotor dimensions, magnet dimensions, current parameters, voltage, power, and efficiency. The results of the generator design are then applied and tested using MPPT and without MPPT. MPPT (Maximum Power Point Tracking) with Perturb and Observe method is one of the electronic components used to maximize the output power of a generator. The results of the design of permanent magnet synchronous generator can be used well in wind power plant (PLTB).

1. PENDAHULUAN

Pemanfaatan teknologi angin sudah dikenal sejak 2000 tahun yang lalu dan berkembang hingga saat ini. Menurut data dari *American Wind Energy Association* (AWEA) telah mencatat 20.000 turbin angin beroperasi dan menghasilkan listrik [1]. Menurut Kementerian Koordinator bidang kemaritiman dengan melibatkan Badan Informasi Geospasial (BIG) menunjukkan bahwa panjang garis pantai di Indonesia tahun 2018 adalah 108.000 Km [2]. Kondisi ini yang menjadikan Indonesia memiliki potensi yang besar terhadap energi angin untuk pengembangan pembangkit listrik. Kecepatan angin yang fluktuatif di Indonesia tetap dapat dimanfaatkan sehingga memerlukan generator yang sesuai dengan karakteristik kecepatan angin tersebut [3].

Generator merupakan sebuah mesin listrik yang dapat mengkonversi energi putaran menjadi energi listrik. Generator yang banyak dikembangkan saat ini adalah jenis generator sinkron magnet permanen atau *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG). Dalam merancang turbin angin dengan kapasitas tertentu memerlukan perencanaan yang baik. Salah satunya adalah merancang sebuah generator yang akan digunakan pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). Hasil perancangan generator banyak ditemukan pada kumpulan jurnal-jurnal untuk Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) seperti : Perancangan mini generator turbin angin 200 Watt untuk energi angin kecepatan rendah [3]; Perancangan generator 100 Watt menggunakan *software* Elektromagnetik *Infolityca* [4]; Aspek rancangan generator magnet permanen fluks radial kecepatan rendah dengan kapasitas 400 Watt [5]; Simulasi magnetik dan analisis generator magnet permanen fluks radial menggunakan metode finite elemen dengan memanfaatkan perangkat lunak FEMM [6]; Analisis perancangan dan simulasi generator sinkron magnet permanen dengan rotor berlubang menggunakan perangkat lunak FEMM

[7]; *Analytical Design Method of 3kw,200 rpm Permanent Magnet Generator for Renewable Energy Power Plant Applications* [8].

Beberapa penelitian hanya sebatas merancang dan tidak melanjutkan ketahapan pengaplikasian generator. Hal ini dikarenakan beberapa faktor yaitu kurang banyaknya dukungan dalam membuat Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) dan minimnya dana untuk mengaplikasikan generator pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan perancangan generator sekaligus pengaplikasian generator pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) dengan bantuan *software Magnet Involityca* dan *Matlab Simulink*.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Konstruksi generator sinkron magnet permanen pada umumnya sama dengan konstruksi generator sinkron yaitu memiliki stator dan rotor. Stator merupakan bagian generator yang diam dan berfungsi sebagai tempat untuk menerima induksi fluks magnet dari magnet permanen yang melekat pada rotor. Rotor merupakan tempat tertanamnya magnet permanen sebagai penghasil fluks magnet. Celah udara atau *air gap* merupakan bagian yang terletak di antara stator dan rotor. Celah udara ini yang memungkinkan pergerakan rotor terhadap stator. Material utama *air gap* adalah udara. *Coil* merupakan sebuah gulungan kawat berisolasi yang dililitkan pada inti untuk dialirkan arus listrik. Magnet permanen merupakan sebuah material konduktor yang dapat menghantarkan listrik dengan baik sebagai penghasil medan magnet utama. Pada penelitian ini menggunakan Neodymium Iron Boron Magnet (NdFeb) yang memiliki saturasi magnet yang tinggi, ketahanan terhadap demagnetisasi yang baik dan memiliki maximum produksi energi paling tinggi yaitu 440 KJ/m³ [10].

3. METODE PENELITIAN

Tahapan studi literatur ini bertujuan untuk memahami dan mengerti tentang penelitian yang akan dilakukan yaitu mendesain generator. Tahapan dalam merancang generator sinkron magnet permanen yaitu :

3.1 Melakukan pemodelan matematis desain generator

Adapun langkah-langkah perhitungan matematis untuk mendesain generator sinkron permanen Magnet fluks radial adalah sebagai berikut:

- Menghitung dimensi utama PMSG
- Mendesain dimensi stator
- Mendesain kumparan stator
- Mendesain dimensi rotor
- Mendesain rangkaian Magnet
- Menghitung rugi-rugi generator
- Menghitung tegangan, arus, daya perhitungan

3.2 Pemodelan generator sinkron magnet permanen dengan *software* magnet *involityca*

Tahapan pemodelan generator sinkron magnet permanen ini untuk menentukan desain bagian-bagian generator yang telah didesain dalam penelitian. Model yang dibuat berdasarkan referensi yang didapatkan sebagai pembandingan untuk mendapatkan nilai yang optimal.

3.3 Pengujian

Tahapan pengujian ini dilakukan dengan model desain yang telah dibuat dan untuk mengetahui apakah desain secara keseluruhan menghasilkan nilai yang optimal atau tidak. Adapun tahap pengujian yang dilakukan yaitu :

- Pengujian tampilan 2D dan 3D *mesh*
- Pengujian model generator

3.4 Pengaplikasian

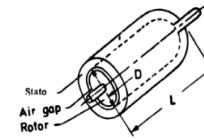
Tahap ini dilakukan agar hasil perancangan generator sinkron permanen dapat diaplikasikan pada sistem pembangkit listrik tenaga angin sederhana dengan bantuan *software* Matlab *simulink*.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Perhitungan matematis perancangan generator sinkron magnet permanen

Adapun beberapa parameter yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

4.1.1 Mendesain dimensi utama generator sinkron magnet permanen



Gambar 1. Dimensi utama generator [11]

- Menghitung nilai daya semu listrik [12]

$$Q = P / (\cos \theta) \quad (1)$$

- Menentukan nilai a_c dan B_g [12]

Nilai *electric loading* ditentukan oleh beberapa hal yaitu kenaikan suhu, rating tegangan mesin, ukuran mesin, kerapatan arus. Nilai khas *specific electric loading (ac)* untuk mesin listrik skala kecil berada pada rentang 8000 – 24000 A/m.

- Menentukan B_{av} [12]

$$B_{av} = B_g \cdot \psi \quad (2)$$

Keterangan :

ψ = Psi memiliki nilai sekitar 0.6-0.75

yang digunakan pada simulasi sebesar 0.72

B_g = Bervariasi 0.3- 0.8 T untuk ukuran mesin ukuran kecil.

- Menghitung nilai koefisien *output* (Co) [12]

$$Co = 1.11 \cdot \pi^2 \cdot B_{av} \cdot a_c \cdot k_w \cdot 10^{-3} \quad (3)$$

- Menghitung produk D^2L [12]

$$D^2L = Q / (Co \cdot Nrps) \quad (4)$$

Keterangan :

D = Diameter *armature*

L = Panjang inti stator

4.1.2 Mendesain dimensi stator

- Menghitung derajat *slot*, θ_s [5]

$$\theta_s = \frac{(2 \times \pi)}{N_s} \quad (5)$$

- Menghitung *slot pitch*, τ_s [5]

$$\tau_s = r_{si} \cdot \theta_p \quad (6)$$

Keterangan :

Db = Diameter dalam stator yaitu 130 mm

r_{si} = Jari-jari dalam stator yaitu 65 mm.

- Menghitung *coil pitch*, τ_c [5]

$$\tau_c = coilspan \cdot \tau_s \quad (7)$$

Keterangan :

Nilai dari *coil span* adalah 1

$$coilspan = \text{int} \left(\frac{N_s}{p} \right)$$

- Menghitung *effective core length*, L_i [5]

$$L_i = L \cdot k_{stack} \quad (8)$$

Keterangan :

k_{stack} = faktor penumpukan stator laminasi

0,9-0,95 apabila ketebalan

laminasi pada stator dan rotor berkisar 0,35-0,5mm [14].

Pada penelitian ini menggunakan $k_{stack} = 0,95$

karena material inti yang digunakan untuk stator dan rotor yaitu M250-50A (ketebalan laminasi 0,5 mm).

- e. Menghitung total konduktor pada stator, S [15]

$$S = 6 \cdot T_{ph} \quad (9)$$

- f. Menghitung jumlah lilitan stator per fasa, T_{ph} [15]

$$T_{ph} = \frac{E_{ph}}{4.44 \cdot \Phi \cdot f \cdot k_w} \quad (10)$$

- g. Menghitung lebar gigi stator, W_{ts} [5]

$$W_{ts} = \frac{(p \cdot \phi) / S}{1.7 \cdot L_i} \quad (11)$$

- h. Menghitung stator yoke Y_s , [5]

$$Y_s = \frac{\phi}{2 \cdot L_i \cdot B_{ts}} \quad (12)$$

Keterangan:

Nilai dari kerapatan fluks di gigi

stator B_{ts} adalah 1,55T [5]

- i. Menghitung luas penampang konduktor atau kawat tembaga, Aw [15]

$$Aw = I_{ph} / 5 \quad (13)$$

- j. Menghitung *pitch* stator pada permukaan celah udara, Y_{ss} [15]

$$Y_{ss} = \frac{3.14 \cdot D}{S} \quad (14)$$

- k. Menghitung panjang rata-rata lilitan, L_{mt} [15]

$$L_{mt} = (2 \cdot L) + (2.3 \cdot T_p) + 0.24 \quad (15)$$

- l. Menghitung resistansi belitan stator per fasa, R_s [15]

$$R_s = \frac{P_c \cdot L_{mt} \cdot T_{ph}}{A_s} \quad (16)$$

- m. Menghitung *d-axis inductance*, L_d [16]

$$L_d = \frac{2}{3} \frac{1}{2\pi f} R_s T_g \theta_s \quad (17)$$

- n. Menghitung *q-axis inductance*, L_q [16]

$$L_q = \frac{2}{3} \frac{1}{2\pi f} \frac{V}{I} \sin \theta_s \quad (18)$$

4.1.3 Mendesain kumparan stator

- a. Menghitung luas lubang *slot*, A_s [18]

$$A_s = \left(\pi \frac{D_c^2 - D_c^2}{4} \cdot \frac{1}{Q_s} - L_{g_s} \cdot \frac{D_c - D_c}{2} - \frac{\pi \cdot D_c - L_{g_s} \cdot Q_s}{Q_s} \cdot L_i - L_w \cdot \frac{D_c - D_c - 2 \cdot L_i}{2} \right) \cdot \frac{1}{2} \quad (19)$$

- b. Menghitung luas *slot*, A_o [18]

$$A_o = A_s \cdot \frac{S_f}{100} \quad (20)$$

Keterangan :

S_f = faktor ruang kawat dalam (%) yaitu 40%
 Besar nilai *coil fill factor* (S_f) ditentukan berdasarkan cara melilit kumparan pada *teeth* stator.

4.1.4 Mendesain dimensi rotor

- a. Menghitung derajat *pole*, θ_p [5]

$$\theta_p = \frac{(2 \times \pi)}{p} \quad (21)$$

- b. Menghitung *pole pitch*, τ_p [5]

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D_b}{p} \quad (22)$$

- c. Menghitung rotor *pole pitch*, τ_r [5]

$$\tau_r = \tau_p \cdot 0.75 \quad (23)$$

- d. Menghitung luas kutub rotor, A_{pr} [5]

$$A_{pr} = \tau_r \cdot L_i \quad (24)$$

- e. Menghitung rotor diameter, D_r [5]

$$D_r = D_b - 2 \cdot l_g \quad (25)$$

Keterangan :

l_g = Panjang celah udara yaitu 0,75 mm

- f. Menghitung fluks medan magnet per *pole*, ϕ [7]

$$\phi = \frac{D \cdot L \cdot \pi \cdot B_{av}}{p} \quad (26)$$

4.1.5 Mendesain rangkaian magnet

- a. Menghitung luas perkutub, S_m [18]

$$S_m = \pi \cdot \frac{D_i + D_a}{2} \cdot \frac{1}{p} \cdot L_h \quad S_m = W_d \cdot L_h \quad (27)$$

- b. Menghitung luas ekuivalen *air gap*, S_g [18]

$$S_g = \pi \cdot \frac{D_i + D_a}{2} \cdot \frac{1}{N_s} \cdot L_h \quad (28)$$

- c. Menghitung koefisien *permeance*, P_c [18]

$$P_c = \frac{L_m \cdot S_g \cdot k_f}{l_g \cdot S_m \cdot k_r} \quad (29)$$

- d. Menghitung kemiringan kurva demagnetisasi, μ_r [5]

$$\mu_r = \frac{B_r}{H_c} \cdot \frac{10^7}{4 \cdot \pi} \quad (30)$$

- e. Menghitung nilai kerapatan fluks di titik pengoperasian, B_d [18]

$$B_d = \frac{P_c \cdot B_r}{P_c + \mu_r} \quad (31)$$

- f. Menghitung kerapatan fluks dalam cerah udara [18]

$$B_g = \frac{B_d \cdot S_m}{k_f \cdot S_g} \quad (32)$$

4.1.6 Menghitung rugi-rugi generator

- a. Menghitung rugi-rugi inti [8]

$$L_{oss1} = [Ch \cdot f \cdot B_p^{(a+b)} + Ce \cdot f^2 \cdot B_p^2] \quad (33)$$

Keterangan :

Ch = 0.0025 (Koefisien rugi-rugi *hysteresis*)

Ce = 7.94×10^{-5} (Koefisien rugi-rugi arus *eddy*)

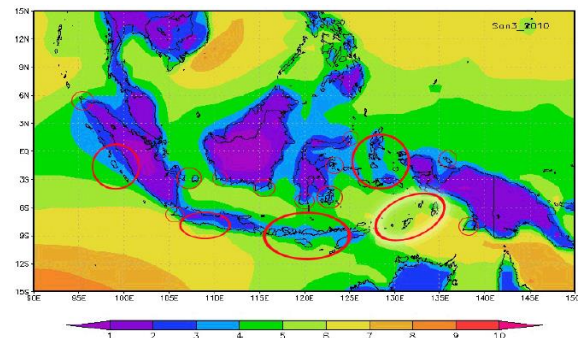
- $a = 1.8317$ (Konstanta material *magnetic* 1)
 $b = 0.0035$ (Konstanta material *magnetic* 2)
 $Bp = 7$ (Puncak kerapatan fluks sinusoidal)
 b. Menghitung rugi-rugi *stray* [8]
 $L_{oss2} = 0.2 \cdot L_{oss2}$ (34)
 c. Menghitung rugi-rugi tembaga pada belitan stator[8]
 $L_{oss3} = (3 \cdot I_{ph}^2 \cdot R_s)$ (35)

4.1.7 Menghitung tegangan, arus, dan daya

- a. Menghitung besar tegangan per fasa, E_{ph} [21]
 $E_{ph} = 4.44 \cdot T_{ph} \cdot f \cdot kw \cdot \Phi$ (36)
 b. Menghitung frekuensi PMSG, f [5]
 $f = \frac{N_s \cdot p}{120}$ (37)
 c. Menghitung besar tegangan tiga fasa rangkaian star generator, V_T [10]
 $V_T = \sqrt{3} \cdot E_{ph}$ (38)
 d. Menghitung arus fasa nominal, I_{ph} [15]
 $I_{ph} = \frac{Q}{N_{ph} \cdot E_{ph} \cdot \cos \theta}$ (39)
 e. Menghitung kecepatan sudut, ω [5]
 $\omega = \frac{N_{rpm} \times 2 \times \pi}{60}$ (40)
 f. Menghitung koefisien gesek, K_e [5]
 $K_e = \frac{E_{ph}}{\omega}$ (41)
 g. Menghitung torsi generator, τ [22]
 $\tau = I_{ph} \cdot K_e$ (42)
 h. Menghitung momen inersia, I [22]
 $I = \frac{W}{2g} r^2$ (43)
 i. Kecepatan sudut (ω) [5]
 $\omega = \frac{2 \pi n_{rpm}}{60}$ (44)
 j. Menghitung daya keluaran generator [5]
 $P_{out} = V_t I_{ph}$ (45)
 k. Menghitung daya total [8]
 $P_{Total} = P_{out} + Loss1 + Loss2 + Loss3$ (46)
 l. Menghitung Efisiensi generator (η) [5]
 $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \%$ (47)

4.2 Potensi angin

Menurut letak tempat, Indonesia merupakan negara kepulauan dan salah satu negara yang dilewati garis khatulistiwa. Hal ini menjadikan Indonesia memiliki potensi energi angin yang cukup untuk mengembangkan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). Potensi angin di Indonesia memiliki kecepatan angin rata-rata berkisar 3,5 m/s – 7 m/s. Daerah yang memiliki kecepatan angin di atas 3 m/s banyak ditemui pada pesisir selatan Jawa, Sumatera dan pulau-pulau di Indonesia bagian timur [17].



Gambar 4. Kecepatan angin rata-rata berdasarkan kriteria turbin angin TSD-500 LAN[17]

4.3 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)

Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) merupakan sebuah pembangkit energi listrik yang memanfaatkan energi angin. Prinsip kerja PLTB adalah dengan memanfaatkan energi kinetik untuk memutar baling-baling atau kincir angin yang kemudian energi putar ini diteruskan untuk menggerakkan rotor sehingga dapat membangkitkan energi listrik. Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) tersusun atas beberapa bagian yaitu sistem *wind turbine*, PMSG, *rectifier* atau penyearah, *boost converter*, MPPT, baterai, inverter, dan beban atau *Load*.

4.4 Hasil perhitungan matematis perancangan generator

Tahapan perancangan matematis menggunakan pemrograman matlab untuk memudahkan dalam proses perhitungan dan meminimalisir terjadinya *error* atau kesalahan dalam menghitung. Berdasarkan pemrograman didapatkan hasil nilai perhitungan :

Tabel 1. Spesifikasi input generator 12S8P

Daya Aktif	1000 Watt
Faktor Daya	0.85
Effisiensi	0.8
Daya Semu Listrik	1470.5882 VA
Kecepatan Putar Rotor	1000 Rpm
Kecepatan Putar Rotor	16.6667 Rps
Tegangan Nominal	380 Volt
Besar Tegangan Induksi	219.3931 V
Faktor Daya	0.85
Jumlah Slot	12
Jumlah Pole	8
Banyak Fasa	3
Frekuensi PMSG	66.7 Hz

Tabel 2. Dimensi desain generator

Diameter Luar Stator	130 mm
Diameter Dalam Stator	78.5 mm
Diameter Luar Magnet	77 mm
Diameter dalam Magnet	70 mm
Diameter Lubang Slot	113 mm
Tebal Magnet	3 mm
Panjang Magnet	50 mm
Jarak Antar Slot	2 mm
Tinggi Teeth	0.5 mm

Air Gap	0.75 mm
Lebar Magnet	12 mm
Koefisien kebocoran fluks	1.7
Koefisien Kebocoran emf	1.04
Kerapatan Fluks Remanen	1.39
Coercive Force	875000

Tabel 3. Parameter utama generator

Faktor Belitan	0.866
Max Flux density in the air gap	0.47 Tesla
Specific Electric Loading	11000 A/m
Rasio Pole Arch/Pole Pitch	0.72
Specific Magnetic Loading	0.3384 T
Output coefficient	35279.5638
Produk D2L	0.002501 m
Diameter Armature(m)	0.13 m
Diameter Armature(mm)	130 mm
Lm	0.1480
Panjang Inti Stator(m)	0.14799 m
Panjang Inti Stator(mm)	147.99 mm
KL	1.1384
Rasio Koefisien	1.1384 m

Tabel 4. Desain stator

Pole Pitch	0.051025 mm
Arus Fasa Nominal	2.6286 A
Fluks Medan Magnet	0.0025553 Weber
Jumlah Lilitan Stator per Fasa	334.9404
Derajat Slot	30 rad
Derajat Pole	45 rad
Jari-jari Dalam Stator	65 mm
Faktor Penumpukan Stator	0.95
Coil Spain	1
Resistivity Copper	1.72e-08
Slot Pitch	2925 mm
Coil Pitch	2925 mm
Panjang Efektif Inti	0.14059 mm
Nilai Kerapatan fluks di gigi stator	1.55
Jumlah Lilitan Stator per Fasa	334.9404
Total Konduktor pada Stator	2009.6426
Lebar Gigi Stator	4.2561e-05 mm
Stator Yoke	0.0058631 mm
Luas Penampang Konduktor	0.52572 mm
Pitch Stator in Airgap	0.20312
Panjang Rata-rata Lilitan	296.3374
Resistensi Belitan Stator per Fase	9.6952
Tg Teta	1
Sin Teta	1
Besar Tegangan 3 Fasa	380 V
d-axis inductance	0.015438
q-axis inductance	0.16275
Luas Lubang Slot	421.9204 mm
Fill Factor	40 %
A0	168.7682
Luas Area Slot	168.7682 mm
Jumlah Lilitan	278.1835 Lilitan

Tabel 5. Dimensi rotor

Derajat Pole	45 rad
Pole Pitch	0.051025 mm
Rotor Pole Pitch	0.038269 mm
Area Kutub Rotor	0.0053802 mm
Diameter Rotor	128.5 mm
Fluks Medan Magnet	0.0025553 Weber

Tabel 6. Rangkaian magnet

Luas Area Perkutub	1442.4375 mm
Luas Ekuivalen gap	1354.125 mm
Luas Koefisien permeance	0.30279 mm
Kurva demagnetisasi	1.2648
Kerapatan Fluks Titik Pengoperasian	0.268 T
Kerapatan Fluks Dalam Celah Udara	0.168 T

Tabel 7. Jenis pilihan material magnet

1.	Samarium Cobalt Permanent Magnet
2.	Neodymium Iron Boron
3.	Nickel-Iron and Cobalt-Iron Alloy

Tabel 8. Jenis pilihan material stator dan rotor

1.	Silicon Iron Aluminium/M250-50A
2.	Carpenter: Silicon Steel
3.	Copper: 5.77e7 Siemens/meter
4.	PM12: Br 1.2 mur 1.0

Tabel 9. Rugi-rugi generator

Koefisien Rugi-rugi hysteresis	0.0025
Koefisien Rugi-rugi arus eddy	7.94e-05
constans magentic material I	1.8317
constans magentic material II	0.0035
Puncak kerapatan fluks sinusoidal	1.7
Rugi-rugi inti	1.4612
Stray loss	0.2922
Rugi-rugi Tembaga pada Belitan Stator	200.971

Tabel 10. Tegangan, arus, daya hasil perhitungan

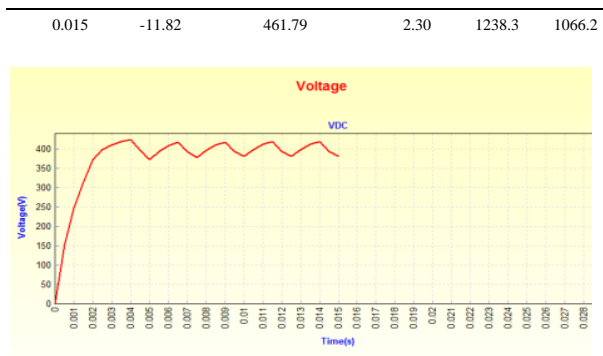
Besar Tegangan Induksi	219.3V
Besar Tegangan 3 Fasa	380 V
Arus Fasa Nominal	2.62 A
Kecepatan Sudut	104.67rad/s
Koefisien gesek	2.0961
Torsi	5.509 N/m
Daya Output Generator	998.8 Watt
Total rugi-rugi pada generator	1201.60 W
Efisiensi Generator	83.1288

4.5 Hasil simulasi dan analisis model generator sinkron magnet permanen 12 slot 8 pole

Pada bagian ini akan dilakukan simulasi menggunakan *software* magnet dengan parameter masukan yang sama dengan perhitungan matematis desain generator yang telah dilakukan. Hasil data simulasi yang didapatkan akan digunakan untuk membandingkan hasil perhitungan matematis desain generator sinkron magnet permanen fluks radial. Simulasi dilakukan untuk mengetahui tegangan keluaran dari sebuah rancangan generator.

Tabel 11. Hasil simulasi generator sinkron magnet permanen dengan perangkat lunak magnet

Time(s)	Torsi (Nm)	Voltage(V)	Current(A)	Input	Output
0	-1.01	0	0	0	0
0.0005	-10.78	250.46	1.25	1128.9	313.6
0.001	-15.68	357.86	1.78	1642.1	640.3
0.0015	-10.50	456.95	2.28	1100.2	1044
0.002	-10.37	496.86	2.48	1086.6	1234.3
0.0025	-12.51	488.25	2.44	1310.4	1191.9
0.003	-14.74	468.81	2.34	1543.9	1098.9
0.0035	-15.36	462.74	2.31	1608.7	1070.6
0.004	-7.82	446.64	2.23	819.1	997.4
0.0045	-9.37	465.30	2.32	981.8	1082.5
0.005	-11.81	461.70	2.30	1236.9	1065.8
0.0055	-14.47	456.75	2.28	1516.0	1043.1
0.006	-15.26	457.18	2.28	1598.5	1045.1
0.0065	-7.97	443.64	2.21	835.5	984.1
0.007	-9.54	474.38	2.37	999.6	1125.2
0.0075	-11.86	461.87	2.30	1242.9	1066.6
0.008	-14.49	456.30	2.28	1518.1	1041
0.0085	-15.34	457.01	2.28	1607	1044.3
0.009	-7.96	443.60	2.21	833.9	983.9
0.0095	-9.52	473.54	2.36	997.6	1121.2
0.01	-11.82	461.78	2.30	1238.3	1066.2
0.0105	-14.46	456.30	2.28	1514.4	1041
0.011	-15.25	457.01	2.28	1596.9	1044.3
0.0115	-7.96	443.60	2.21	833.6	983.9
0.012	-9.53	473.62	2.36	998.0	1121.6
0.0125	-11.86	461.79	2.30	1242.6	1066.2
0.013	-14.49	456.29	2.28	1518.2	1041
0.0135	-15.34	457.01	2.28	1607.1	1044.3
0.014	-7.96	443.60	2.21	834.1	983.9
0.0145	-9.52	473.61	2.36	997.8	1121.5



Gambar 13. Tegangan *output* simulasi magnet *involytica*

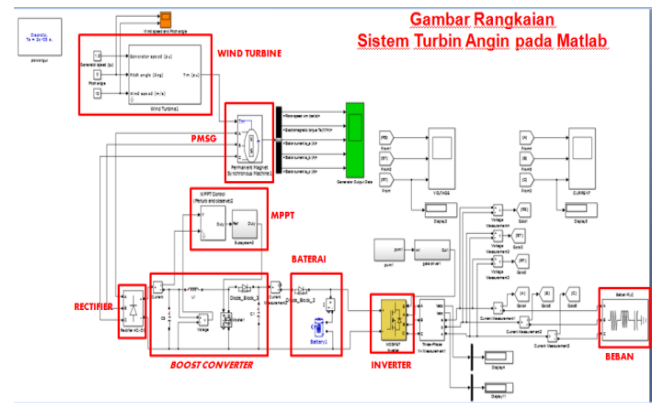
Tabel 12. Perbandingan data hasil perhitungan dan data hasil simulasi.

Keterangan	Rancangan	Simulasi	Error (%)
Arus (A)	2,63	2.18	0,45
Tegangan(V)	380	436.33	56,33
Pin (Watt)	1201.59	1200.923	0,667
Pout (Watt)	998.87	992.75	31,02
Effisiensi	83.128 %	82.67 %	0.46 %

Berdasarkan tabel 12 hasil yang didapatkan yaitu nilai hasil rancangan yang dilakukan dengan menggunakan pemrograman *software matlab* dan nilai hasil simulasi dengan menggunakan *software magnet involytica*. Apabila ditinjau dari parameter efisiensi hasil yang didapatkan antara hasil rancangan dengan hasil simulasi selisih nilai efisiensinya memiliki error sebesar 0.46 %. Hal ini membuktikan bahwa generator hasil rancangan dapat disimulasikan dengan baik pada *software magnet involytica*. Tahapan selanjutnya yaitu mengaplikasikan generator yang dirancang pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) dengan bantuan *software matlab simulink*.

4.6 Pengaplikasian generator pada PLTB

Pengaplikasian generator pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) dilakukan dengan bantuan perangkat lunak *matlab simulink*. Pada gambar 14 menunjukkan gambar rangkaian *full sistem* pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB).



Gambar 14 . Simulasi sistem PLTB dengan *matlab simulink*

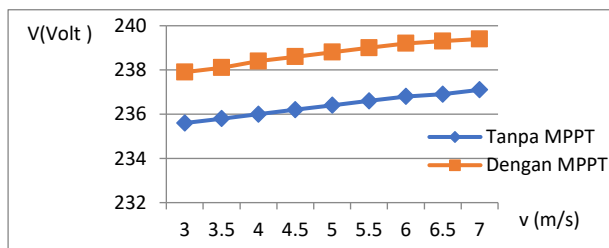
Simulasi ini dihubungkan dengan beban yang nilainya juga divariasikan mulai dari 50-300 Ohm. Pengujian dan analisis dilakukan dengan kecepatan angin yang bervariasi mulai dari 3 m/s sampai 7m/s.

4.7 Data tabel hasil pengujian menggunakan MPPT dan tanpa MPPT pada *matlab simulink*.

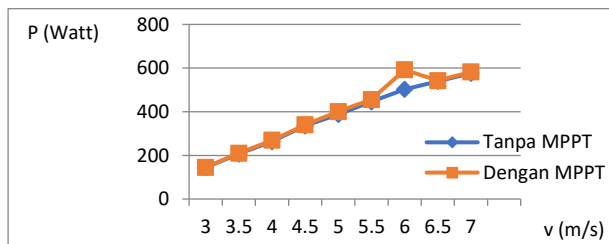
Simulasi ini dihubungkan dengan beban yang nilainya juga divariasikan mulai dari 50-300 Ohm. Pengujian dan analisis dilakukan dengan kecepatan angin yang bervariasi mulai dari 3m/s – 7 m/s. Berikut adalah hasil simulasi yang didapatkan :

Tabel 13. Percobaan dengan beban 50 ohm

No	v (m/s)	Variabel yang diamati					
		Tanpa MPPT			MPPT		
		(V)	(A)	(W)	(V)	(A)	(W)
1.	3	235.6	0.61	144.8	237.9	0.6	145
2.	3.5	235.8	0.88	206.6	238.1	0.88	210.3
3.	4	236	1.12	264	238.4	1.13	269.6
4.	4.5	236.2	1.42	336.1	238.6	1.49	340.2
5.	5	236.4	1.64	387.7	238.8	1.68	400.7
6.	5.5	236.6	1.93	445.9	239	1.97	455.5
7.	6	236.8	2.12	502.6	239.2	2.15	591.8
8.	6.5	236.9	2.28	539.7	239.3	2.3	542.8
9.	7	237.1	2.43	576.5	239.4	2.45	582.2
Rata-Rata		236.38	1.6	378.2	238.7	1.63	393.2



Gambar 15. Grafik hubungan tegangan dengan kecepatan angin pada beban 50 ohm

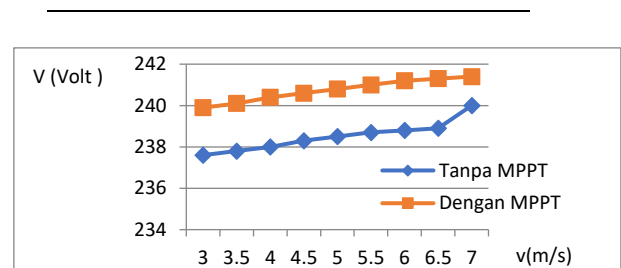


Gambar 16. Grafik hubungan daya dengan kecepatan angin pada beban 50 ohm

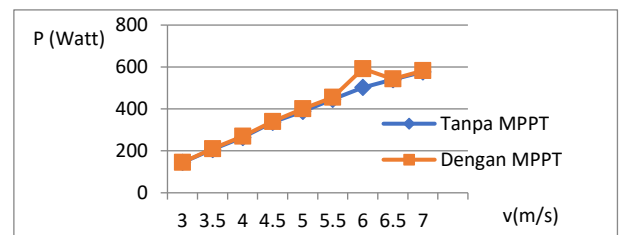
Berdasarkan tabel 14, hasil pengujian didapatkan nilai rata-rata tegangan *output*, arus *output* dan daya *output* dengan menggunakan MPPT dan tanpa MPPT pada beban 50 Ohm dengan kecepatan angin berubah-ubah yaitu 3m/s sampai 7m/s. Pada percobaan tanpa menggunakan MPPT didapatkan tegangan sebesar 236.38 volt, arus sebesar 1.6 ampere dan daya sebesar 378.2 Watt sedangkan dengan percobaan menggunakan MPPT didapatkan tegangan sebesar 238.7 volt, arus sebesar 1.63 ampere dan daya 393.2 watt. Besar selisih tegangan keluaran adalah 2.32 volt sedangkan besar selisih daya keluaran adalah 15 watt.

Tabel 14. percobaan dengan beban 100 ohm

No	V (m/s)	Variabel yang diamati					
		Tanpa MPPT			MPPT		
		(V)	(A)	(W)	(V)	(A)	(W)
1.	3	237.6	0.6	147.2	239.9	0.61	148.4
2.	3.5	237.8	0.86	204.6	240.1	0.87	209.8
3.	4	238	1.14	269.9	240.4	1.15	279.9
4.	4.5	238.3	1.39	333.3	240.6	1.41	339.2
5.	5	238.5	1.64	391	240.8	1.67	402.1
6.	5.5	238.7	1.9	456.3	241	1.91	460
7.	6	238.8	2.14	511	241.2	2.1	518.3
8.	6.5	238.9	2.22	531.1	241.3	2.24	539.5
9.	7	240	2.45	558.2	241.4	2.45	584.4
Rata-Rata		238.5	1.59	378.1	240.7	1.61	386.9



Gambar 17. Grafik hubungan tegangan dengan kecepatan angin pada beban 100 ohm

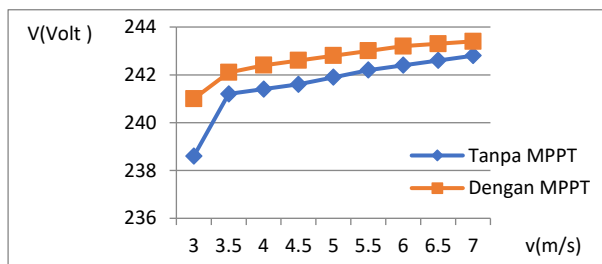


Gambar 18. Grafik hubungan daya dengan kecepatan angin pada beban 100 Ohm

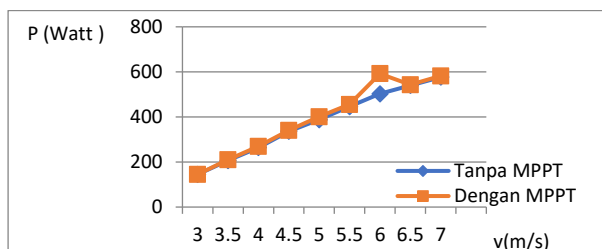
Berdasarkan tabel 15, hasil pengujian didapatkan nilai rata-rata tegangan *output*, arus *output* dan daya *output* dengan menggunakan MPPT dan tanpa MPPT pada beban 100 ohm dengan kecepatan angin berubah-ubah yaitu 3 m/s sampai 17 m/s. Pada percobaan tanpa menggunakan MPPT didapatkan tegangan sebesar 238.5 volt, arus sebesar 1.59 ampere dan daya sebesar 378.2 watt sedangkan dengan percobaan menggunakan MPPT didapatkan tegangan sebesar 240.7 volt, arus sebesar 1.61 ampere dan daya 386.9 watt. Besar selisih tegangan keluaran adalah 2.2 volt sedangkan besar selisih daya keluaran adalah 8.7 watt.

Tabel 15. Percobaan dengan beban 200 ohm

No	v (m/s)	Variabel yang diamati					
		Tanpa MPPT			MPPT		
		(V)	(A)	(W)	(V)	(A)	(W)
1.	3	238.6	0.6	146.5	241	0.60	148.7
2.	3.5	241.2	0.86	207.9	242.1	0.87	209.8
3.	4	241.4	1.12	270.9	242.4	1.15	279.9
4.	4.5	241.6	1.39	337.8	242.6	1.41	339.2
5.	5	241.9	1.67	403.2	242.8	1.7	404.1
6.	5.5	242.2	1.89	458.8	243	1.91	460.2
7.	6	242.4	2.0	495.4	243.2	2.1	518.3
8.	6.5	242.6	2.29	556.6	243.3	2.34	589.5
9.	7	242.8	2.38	578.6	243.4	2.45	604.4
Rata-Rata		241.6	1.59	383.97	242.7	1.61	394.9



Gambar 19. Grafik hubungan tegangan dengan kecepatan angin pada beban 200 ohm

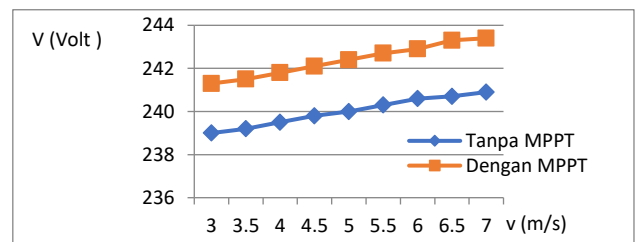


Gambar 20. Grafik hubungan daya dengan kecepatan angin pada beban 200 ohm

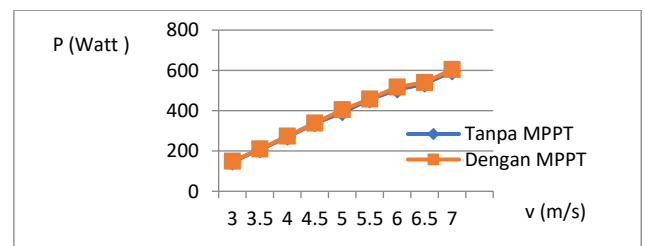
Berdasarkan tabel 16, hasil pengujian didapatkan nilai rata-rata tegangan *output* dan daya *output* dengan menggunakan MPPT dan tanpa MPPT pada beban 200 ohm dengan kecepatan angin berubah-ubah yaitu 3 m/s sampai 7 m/s. Pada percobaan tanpa menggunakan MPPT didapatkan tegangan sebesar 241.6 volt, arus sebesar 1.59 ampere dan daya sebesar 383.97 watt sedangkan dengan percobaan menggunakan MPPT didapatkan tegangan sebesar 242.7 volt, arus sebesar 1.61 ampere dan daya 394.9 watt. Besar selisih tegangan keluaran adalah 1.1 volt sedangkan besar selisih daya keluaran adalah 10.93 watt.

Tabel 16. Percobaan dengan beban 300 ohm

No	V (m/s)	Variabel yang diamati					
		Tanpa MPPT			MPPT		
		(V)	(A)	(W)	(V)	(A)	(W)
1.	3	239	0.6	147	241.3	0.62	149.5
2.	3.5	239.2	0.87	207.4	241.5	0.87	209.9
3.	4	239.5	1.13	269.5	241.8	1.14	274.3
4.	4.5	239.8	1.40	337.2	242.1	1.38	339.2
5.	5	240	1.63	390.9	242.4	1.7	404.7
6.	5.5	240.3	1.9	455.5	242.7	1.91	458.1
7.	6	240.6	2.1	504.3	242.9	2.1	517.3
8.	6.5	240.7	2.2	533	243.3	2.34	540.4
9.	7	240.9	2.47	594.5	243.4	2.45	604.4
Rata-Rata		240	1.59	382.2	242.38	1.62	388.7



Gambar 21. Grafik hubungan kecepatan dengan kecepatan angin pada beban 300 ohm



Gambar 22. Grafik hubungan daya dengan kecepatan angin pada beban 300 ohm

Berdasarkan tabel 17, hasil pengujian didapatkan nilai rata-rata tegangan *output* dan daya *output* dengan menggunakan MPPT dan tanpa MPPT pada beban 300 ohm dengan kecepatan angin berubah-ubah yaitu 3 m/s sampai 7 m/s. Pada percobaan tanpa menggunakan MPPT didapatkan tegangan sebesar 240 volt, arus sebesar 1.59 ampere dan daya sebesar 382.2 watt sedangkan dengan percobaan menggunakan MPPT didapatkan tegangan sebesar 242.38 volt, arus sebesar 1.62 ampere dan daya 388.7 watt. Besar selisih tegangan keluaran adalah 2.38 volt sedangkan besar selisih daya keluaran adalah 6.5 watt.

4.8 Analisis dan Pembahasan

Tabel 17. Perbandingan rata-rata *output* tanpa MPPT dan dengan MPPT

NO.	Beban (Ohm)	Variabel					
		Tanpa MPPT			Dengan MPPT		
		(V)	(A)	(W)	(V)	(A)	(W)
1.	50	236.38	1.6	378.2	238.7	1.63	393.2
2.	100	238.5	1.59	378.1	240.7	1.61	386.9
3.	200	241.6	1.59	383.97	242.7	1.61	394.9
4.	300	240	1.59	382.2	242.38	1.62	388.7
Rata-Rata		239.12	1.60	380.6	242.12	1.62	391

Pada tabel 18, didapatkan hasil tegangan, arus, dan daya rata-rata pada percobaan dengan MPPT dan tanpa MPPT. Rata-rata selisih perbedaan tegangan keluaran dengan menggunakan metode

perturb and observe lebih besar 3.0 V dari percobaan tanpa MPPT. Rata-rata selisih perbedaan daya keluaran dengan menggunakan metode *perturb and observe* lebih besar 10.4 watt dari percobaan tanpa MPPT.

Berdasarkan perbandingan kenaikan hasil keluaran tanpa MPPT dengan menggunakan MPPT yaitu berkisar 3 sampai 9 persen. Terlihat bahwa percobaan dengan metode *perturb and observe* mendapatkan nilai maksimum dari sistem MPPT dibandingkan dengan tanpa menggunakan metode *perturb and observe*.

Energi angin memiliki karakteristik yang berubah-ubah setiap waktu. Akibat dari perubahan angin yang fluktuatif menyebabkan daya listrik yang dihasilkan oleh sistem turbin angin juga selalu berubah-ubah setiap waktu. Pengaruh laju angin terhadap daya keluaran sistem turbin angin. Laju angin yang berubah terhadap waktu menyebabkan daya listrik yang dapat dihasilkan sistem turbin angin mengalami perubahan. Daya mekanis turbin angin berbanding lurus dengan kubik laju angin. Sehingga apabila laju angin semakin besar, maka daya mekanis turbin angin juga akan semakin besar. Semakin besarnya daya mekanis turbin angin akan berakibat semakin besarnya laju putar rotor dikarenakan turbin angin terkopel dengan PMSG maka laju putar rotor yang semakin besar akan berakibat pada semakin besarnya juga daya listrik keluaran turbin angin.

Pengaruh penggunaan MPPT pada rangkaian sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) di *matlab simulink*. Penggunaan MPPT pada rangkaian simulasi Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) dapat memaksimalkan hasil keluaran sistem turbin angin. Pada simulasi, rangkaian MPPT yang digunakan adalah algoritma *perturb and observe*. Penggunaan rangkaian MPPT metode *perturb and observe* dapat diaplikasikan dengan baik.

5. KESIMPULAN

Adapun kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah mendesain generator sinkron magnet permanen 12 slot 8 *pole* menggunakan *software* yaitu magnet *involytica* dan mengaplikasikan generator dengan *matlab simulink*, perbandingan nilai efisiensi yang didapatkan antara hasil perhitungan dengan hasil simulasi dimana efisiensinya memiliki *error* sebesar 0.46 %, percobaan menggunakan beban R yang bervariasi mulai dari 50-300 ohm dengan variasi kecepatan angin yang berubah-ubah mulai dari 3m/s sampai 7m/s menghasilkan daya yang fluktuatif berubah-ubah, penggunaan MPPT metode *perturb and observe* pada pembangkit listrik dapat memaksimalkan hasil keluaran turbin angin, daya

listrik yang dihasilkan dengan sistem MPPT lebih besar dibandingkan dengan sistem turbin angin tanpa MPPT, perbandingan nilai *output* rata-rata tegangan dan daya pada pengujian tanpa MPPT dengan menggunakan MPPT yaitu sebesar 3.0 volt dan 10.4 watt, kenaikan berkisar 3 sampai 9 %

UCAPAN TERIMA KASIH

Selama melaksanakan penelitian ini, penulis banyak mendapatkan pengalaman yang sangat berharga. Penulis juga telah mendapat bantuan baik moril, materi, maupun petunjuk, bimbingan dan saran dari berbagai pihak, secara langsung maupun tidak langsung. Untuk itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof Dr. Karomani, M.Si selaku Rektor Universitas Lampung;
2. Bapak Prof. Suharno, M.Sc., Ph.D. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung;
3. Bapak Khairudin, Ph.D., Eng., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung;
4. Ibu Herlinawati, S.T., M.T. selaku sekretaris jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung;
5. Bapak Ir. Noer Soedjarwanto, M.T., selaku Pembimbing Utama atas kesediannya untuk memberikan bimbingan, saran dan kritik dalam proses penyelesaian skripsi ini;
6. Bapak Dr. Eng. Charles Ronald H, S.T., M.T. selaku Pembimbing Pendamping yang memberikan bimbingan, saran, kritik, motivasi dalam proses penyelesaian skripsi ini;
8. Ibu Dr. Eng. Endah Komalasari, S.T., M.T., selaku Penguji yang telah memberikan masukan dan saran-saran dalam skripsi ini;
9. Ibu Yetti Yuniati, S.T., M.T., selaku pembimbing akademik yang telah membantu penulis dalam memberikan saran dan masukan selama penulis kuliah;
10. Seluruh Dosen Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung atas pengajaran yang diberikan selama ini kepada penulis;
11. Keluarga besar Teknik Elektro yang luar biasa, Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro, dan seluruh Staf Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung atas bantuannya semasa penulis kuliah;

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R.L. Hill. *Power from wind; a history of wind mill Technology*. Cambridge University
- [2] <https://katadata.co.id/infografik/2018/08/25/hari-maritim-nasional-data-rujukan-kelautan-rampung>

- [3] Pramono, B.W., Warindi, Hidayat, A., 2015. *Perancangan Mini Generator Turbin Angin 200 W Untuk Energi Angin Kecepatan Rendah*.
- [4] M.Choirul Anam.2017.*Perancangan Generator 100 Watt Menggunakan Software Elektromagnetik Infolytica*. UMM.
- [5] Meggi Octa Suhada. 2017.Aspek Rancangan Generator Magnet Permanen Fluks Radial Kecepatan Rendah.Universitas Riau
- [6] Irasari Pudji, H Syaeful Alam, M. Kasim. 2012. *Magnetic simulation and analysis of radial flux permanent magnet generator using finite element method*. Bandung: UPT Balai pengembangan Instrumentasi-LIPI.
- [7] Azka, Mukhdil,"Analisis Perancangan Dan Simulasi Generator Sinkron Magnet Permanen Dengan Rotor Berlubang",Skripsi, Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok, 2013.
- [8] Irasari,P.,Alam,H.S.,Kasim,M.,2013. *Analytical Design Method of 3kw,200 rpm Permanent Magnet Generator for Renewable Energy Power Plant Applications*. Research Center for Electrical Power and Mechatronics, Indonesian Institute of Sciences 12.
- [9] Itomi,H.,1992.Manual Desain Motor Praktis.Toshiba.
- [10] Pusat Penelitian Tenaga Listrik dan Mekatronika. LIPI.
- [11] Handershot, J. R dan Miller, TJE,"*Design Of Brushless Permanen Magnet Motor*", Clarendon Press dan Magna Physics publishing, Oxford, 1994.
- [12] Essam S. Hamdi.1994. *Design Of Small Electrical Machines,D,V,Morgan,Ed. England :John Wiley & Sons*. British Library.
- [13]<https://ugmmagatrika.wordpress.com/2013/05/04/cara-kerja-generator-listrik-brushless-dengan-menggunakan-pmg-permanent-magnet-generator/>
- [14] Anizar Indriani. 2015. *Analisis Pengaruh Variasi Jumlah Kutub dan Jarak Celah Magnet Rotor Terhadap Performan Generator Sinkron Fluks Radial*. Universitas Bengkulu.
- [15]https://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/93562/13/13_chapter7.pdf
- [16] Marek Musak, Marek Stulradjer.2013. *Novel Methods For Parameters Investigation Of PM Synchronous Motors*. University Of Zilina/Department Of Power Electrical Systems, Zilina, Slovakia.
- [17] Penelitian Lentera Angin Nusantara (LAN)
- [18] Thosiba, "Manual Desain Praktis Motor Thosiba", Tokyo, 1992.