

Analisis Perbandingan Jumlah *Slot* Terhadap Efisiensi dan *Power Factor* Desain Motor Induksi

Adi Mardiansah
Program Studi Teknik Elektro
Universitas Ibn Khaldun Bogor
Jl. KH. Sholeh Iskandar km 2,
Bogor
Email :
Adimardiansahxi@gmail.com

Muhammad Nabil Fadillah
Program Studi Teknik Elektro
Universitas Ibn Khaldun Bogor
Jl. KH. Sholeh Iskandar km 2,
Bogor
Email
Muh.Nabil.Fadillah@gmail.com

Sukaemi Ratnasih
Program Studi Teknik Elektro
Universitas Ibn Khaldun Bogor
Jl. KH. Sholeh Iskandar km 2,
Bogor
Email :
Sukaemiratnasih@gmail.com

Abstract – Motor induksi adalah motor listrik yang bekerja berdasarkan arus induksi. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mencari nilai efisiensi dari setiap motor induksi dimana semakin tinggi nilai efisiensinya, maka semakin baik dalam pengoperasiannya. Variasi jumlah slot yaitu model 24, 36 dan 48 slot yang masing-masing membutuhkan daya 300 watt dan Frekuensi pada 50 Hz untuk dapat menjalankan motor. Perancangan model kemudian disimulasikan menggunakan software *Motor Solve*. Penelitian ini memiliki tujuan untuk mendapatkan model desain dengan nilai efisiensi dan power factor tertinggi saat jumlah pole motor divariasikan. Simulasi ini menghasilkan nilai efisiensi tertinggi adalah 84,6 % yang dimiliki oleh desain dengan jumlah slot 48 dan memiliki nilai power factor tertinggi 0,86. Adapun pengaplikasian dari desain motor ini adalah untuk kebutuhan motor servo.

I. LATAR BELAKANG

1.1. Struktur Motor Induksi

Rotor, stator dan penutup ujung merupakan struktur motor induksi. Namun, struktur stator Motor sinkron magnet permanen tidak berbeda dengan magnet permanen lainnya motor sinkron. Posisi magnet permanen pada motor akan sangat mempengaruhi performa. Struktur magnet permanen rotor permukaan ditempatkan di permukaan luar inti rotor. Meskipun strukturnya relatif sederhana, torsi rotasi asinkronnya sangat kecil, jadi Sangat cocok untuk persyaratan awal yang rendah. Selain itu, semacam magnet permanen rotor bawaan struktur ditempatkan pada inti besi antara batang pemandu sangkar tupai dan poros berputar, yang membuatnya memiliki kinerja awal yang sangat baik [1].

1.2. Prinsip Kerja Motor Induksi

Ketika motor tidak bekerja, arus bolak-balik dimuat ke dalam kumparan stator untuk menghasilkan medan magnet berputar. Karena polaritas yang sama menolak polaritas yang berlawanan dan menarik yang sebaliknya, Rotor yang terbuat dari bahan magnet

permanen berputar terus menerus karena gaya magnet. Di waktu yang sama, karena perbedaan kecepatan antara kecepatan medan magnet berputar stator dan kecepatan medan magnet berputar rotor, torsi dihasilkan dan rotor mulai berputar di bawah paksa [2]. Dalam proses perubahan kecepatan, karena perbedaan antara stator memutar medan magnet Kecepatan dan kecepatan medan magnet berputar rotor tidak tetap, itu sementara, sehingga torsi juga akan berubah. Ketika perbedaan kecepatan antara rotor dan kecepatan sinkron sangat kecil, atau kecepatan Medan magnet berputar stator sedikit lebih besar dari medan magnet permanen rotor, Rotor akan memasuki status operasi sinkron. Dalam hal ini, kecepatan rotor dan kecepatan stator adalah Sama, yang merupakan asal usul nama motor induksi. Dengan kata lain, motor induksi menghasilkan daya melalui torsi asinkron belitan rotor. Setelah start-up berhasil, belitan rotor akan gagal, dan Medan magnet yang dihasilkan oleh magnet permanen dan belitan stator akan berinteraksi untuk menghasilkan torsi penggerak, sedangkan belitan rotor tidak akan berfungsi [3].

1.3. Karakteristik Motor Induksi

Karakteristik kepadatan daya dan kecepatan torsi motor magnet permanen AC relatif bagus, dan rentang kecepatannya sangat luas, mulai dari 4000 hingga 16000 rpm. Namun, keandalan dan Stabilitas struktural relatif umum, dan biaya pengontrol relatif tinggi, sehingga Operabilitasnya sangat bagus [4].

1.4. Desain Slot Stator Motor Induksi

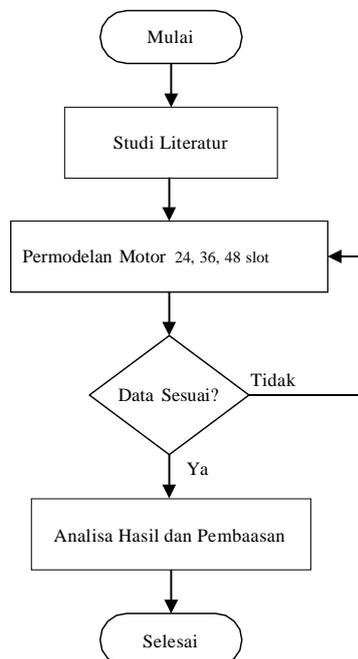
Untuk motor induksi, jumlah slot memiliki dampak besar pada pengoperasian motor, seperti menambah jumlah slot dapat mengurangi hilangnya operasi motor sampai batas tertentu, dan memainkan peran positif dalam meningkatkan pembuangan panas motor. Namun, jumlah slot stator tidak lebih banyak lebih baik. Jika terlalu banyak, itu akan memiliki efek sebaliknya (mengurangi pemanfaatan koefisien slot). Rumus $q = 2 mpq$ (q adalah jumlah slot per kutub dan

fase), $6 \geq Q \geq 2$, umumnya $q = 2$). Setelah menentukan jumlah slot, satu pengecualian adalah jenis alur. Karena Slot akan memiliki dampak tertentu pada distribusi kerapatan fluks magnetik dan garis magnetik paksa. Gigi slot paralel memiliki efek positif pada belitan, seperti slot berbentuk buah pir dan datar slot bawah. Pada contoh di atas, slot berbentuk buah pir relatif kecil, yang membuat celah udara medan magnet lebih kecil. Pada saat yang sama, mengingat masalah penurunan arus harmonik orde tinggi dan cara mengurangi kehilangan arus eddy rotor, slot stator harus dirancang "dalam dan sempit" di Proses menentukan jenis slot. Dengan cara ini, kehilangan rotor dapat dikurangi ketika rasio Tinggi slot ke lebar slot meningkat di bawah area slot yang sama. Mempertimbangkan faktor-faktor di atas, Lebar celah umumnya dirancang sebagai 3 - 3.5 mm [5].

II. METODE PENELITIAN

2.1 Rancangan Penelitian

Dalam penelitian ini menggunakan metode perancangan motor induksi 4 pole 24 slot, 4 pole 36 slot dan 4 pole 48 slot setelah desain selesai maka pengujian dilakukan dengan menguji efisiensi motor. Selanjutnya setelah pengujian selesai maka akan didapatkan hasil, lalu setelah itu akan dianalisa desain mana yang memiliki efisiensi tertinggi dan nilai power factor yang mendekati 1..



Gambar 1. Flow chart proses penelitian

2.2 Perancangan Motor

Ketika saat mendesain motor, dapat diperhatikan bahwa ada beberapa aspek penting dalam desain yaitu: rotor, stator, magnet, belitan dan masih banyak lagi. Perancangan dibuat dengan software *MotorSolve*, dengan daya yang diperlukan 300 watt dan frekuensi 50 Hz. Setelah mengetahui dasar perancangan desain

motor, langkah selanjutnya adalah menentukan parameter yang diperlukan untuk mensimulasikan motor ini, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1:

Tabel 1. Parameter Simulasi Motor

Parameter	24 Slot	36 Slot	48 Slot
Daya	300 W	300 W	300 W
Frekuensi	50 Hz	50 Hz	50 Hz
Pole	4 pole	4 pole	4 pole

Cara mengetahui desain mana yang memiliki desain paling baik adalah dengan melihat indikator power factor dimana apabila nilainya mendekati 1 dan indikator nilai efisiensinya jika mendekati 100 % maka akan semakin baik. sehingga hasil yang didapatkan sesuai yang diinginkan yaitu memiliki efisiensi yang tinggi[6].

2.3 Perhitungan Desain Utama

Untuk menentukan desain utama dari motor induksi, ada banyak hal yang harus diketahui terutama adalah daya keluaran motor. persamaan keluaran dari mesin AC sebagai berikut [7]:

$$Q = C_0 D^2 L n_s \quad (\text{KW}) \quad (2.1)$$

$$C_0 = 11 K_w B_{av} a_c \times 10^{-3} \quad (2.2)$$

Dengan

Q = keluaran mekanik (KW)

D = diameter dalam stator (m)

L = panjang besi kotor dari stator (m)

n_s = kecepatan sinkron (rps)

K_w = factor lilitan stator

B_{av} = specific magnetic loading (T)

a_c = specific electric loading (Amper-konduktor/meter)

dari persamaan 2.1 dapat kita ubah menjadi:

$$D^2 L = \frac{Q}{C_0 \times n_s} \quad (2.3)$$

Dari persamaan 2.5 dapat kita ketahui bahwa ukuran motor berbanding terbalik dengan putaran sinkron motor, dimana semakin cepat putaran sinkron yang diinginkan maka semakin kecil ukuran motor yang diperoleh begitu juga sebaliknya semakin lambat maka semakin besar ukuran motor. Untuk mendapatkan hasil yang sesuai dengan disain yang diinginkan maka perbandingan nilai L dan D dapat mengacu sebagai berikut :

$\frac{L}{\tau_p} = 1$: untuk efisiensi tinggi dan faktor daya terbaik

$\frac{L}{\tau_p} = 1 \rightarrow 1.25$: untuk faktor daya terbaik

$\frac{L}{\tau_p} = 1.5$: efisiensi (η) tinggi

$\frac{L}{\tau_p} = 1.5$: untuk desain yang ekonomis (2.4)

$$\tau_p = \frac{\pi D}{p} \quad (2.5)$$

Dengan

τ_p = pole pitch

p = Jumlah kutub

η = Efisiensi (%)

dari persamaan di atas dapat disimpulkan bahwa ukuran motor dapat mempengaruhi efisiensi dan faktor daya

A. Pemilihan magnetic loading dan specific electric loading

Untuk disan mesin normal 50 Hz pada umumnya untuk frekuensi $B_{av} = 0.3 - 0.6$ Tesla. Pemilihan nilai magnetic loading (B_{av}) dapat mempengaruhi beberapa hal berikut :

- 1) Kapasitas beban lebih: $V_{ph} = 4.44 \times K_w \cdot f \cdot \phi \cdot N_{ph}$. Untuk tegangan yang sama jika B_{av} kecil, fluks akan berkurang dan jumlah lilitan yang dibutuhkan harus dapat menghasilkan kebocoran reaktasi yang besar. Diagram lingkarang mesin yang kecil untuk reaktansi kebocoran besar. Rata-rata output maksimum rendah sehingga kapasitas beban lebih, densitas fluks B_{av} harus tinggi.
- 2) Faktor daya: jika densitas fluks B_{av} tinggi, mesin akan menghasilkan arus *magnetizing* yang besar dan faktor daya menjadi sangat kecil. Untuk mendapatkan faktor daya yang baik maka magnetic loading harus rendah.
- 3) Biaya dan ukuran : jika densitas *fulks* B_{av} tinggi, iron loss akan tinggi dan biaya akan murah
- 4) Kenaikan suhu: jika B_{av} tinggi, iron loss akan tinggi dan mesin akan banyak terjadi kenaikan suhu.
- 5) Iron loss: efisiensi, arus magnetizing: jika B_{av} tinggi, *iron loss* akan tinggi, mesin akan memiliki arus *magnetizing* yang besar, dan efisiensi akan rendah.

Pemilihan *specific electric loading* berdasarkan daya keluaran mesin adalah sebagai berikut:

10.000 – 17.500 amper-konduktor/meter, untuk mesin kecil hingga 10 KW.

20.000 – 30.000 amper-konduktor/meter, untuk mesin medium hingga 100 KW.

30.000 – 40.000 amper-konduktor/meter, untuk mesin diatas 100 KW.

- 1) *Overload capacity*: amper-konduktor/meter pada mesin harus rendah. acrendah berarti jumlah lilitan per fasa berkurang dan kebocoran raktansi rendah dan diameter mesin tinggi.
- 2) Kenaikan suhu: ac harus rendah, ketika ac tinggi berarti lebih banyak tembaga dan loss tinggi sehingga kenaikan suhu juga tinggi.

3) *Copper loss*: ac harus rendah untuk menghasilkan *copper loss* rendah

4) Ukuran dan biaya mesin: nilai ac tinggi maka kebocoran reaktasi tinggi dan diameter mesin kecil dan juga biaya menjadi lebih murah.

B. Perhitungan jumlah lilitan per fasa, Total konduktor, dan Konduktor per slot

$$V_{ph} = 4.44 \times K_w \cdot f \cdot \phi \cdot N_{ph} \quad (2.6)$$

$$\phi = B_{av} \cdot \tau_p \cdot L \quad (2.7)$$

Dengan

V_{ph} = Tegangan stator per fasa (Volt)

N_{ph} = jumlah lilitan stator per fas

ϕ = fluks per kutub (Tesla)

maka dari persamaan 2.8 jumlah lilitan per fasa (N_{ph}) adalah:

$$N_{ph} = \frac{V_{ph}}{4.44 \times K_w \cdot f \cdot \phi} \quad (2.8)$$

Karena dalam satu kumparan terdapat dua konduktor maka jumlah konduktor per fasa (Z_{ph}) sebagai berikut :

$$Z_{ph} = 2 \times N_{ph} \quad (2.9)$$

Dengan Z_{ph} = jumlah konduktor per fasa

Maka total konduktor untuk sistem tiga fasa adalah:

$$Z_T = 3 \times Z_{ph} = 6N_{ph} \quad (2.10)$$

Dengan Z_T =total konduktor

Jumlah konduktor per slot:

$$N_c = \frac{Z_T}{S_1} \quad (2.11)$$

Dengan

N_c =Jumlah konduktor per slot

S_1 =Jumlah slot stator

= q1 \times P \times fasa

q1 = jumlah slot per kutub per fasa

C. Lebar Celah Udara Motor Lebar celah udara (air gap) dapat ditentukan dengan persamaan berikut [7,8]:

$$\delta_0 = (0,2 + 2\sqrt{D \cdot L}) \quad (2.12)$$

Dengan δ_0 = Lebar celah udara (mm) dan dengan D dan L dalam meter

D. Luas Penampang Konduktor

$$I_{ph} = \frac{Q \times 10^3}{3V_{ph} \cdot \eta \cdot \cos \phi} \quad (2.13)$$

Dengan I_{ph} = arus fasa (ampere)

$$F_c = \frac{I_{ph}}{\sigma} \quad (2.14)$$

Dengan

F_c = luas penampang konduktor (mm²)

σ = densitas arus (ampere/mm²)

= 3 – 4 ampere / mm²

E. Desain Slot Stator

$$\text{Luas area slot} = \frac{NC \times FC}{\phi^{0,4}} \quad (2.15)$$

$$(W_{ts})_{\min} = \frac{\sum_{i=1}^p L_i}{1,7 \times \frac{1}{p} \times L_i} \quad (2.16)$$

Dengan L_i = Panjang efektif

$$= K_i \times L$$

$K_i = 0.96 - 0.98$ untuk ketebalan laminasi 0.5 mm

W_{ts} = Lebar gigi

$$W_{1s} = \frac{\pi[D+2(d_{0s}+d_{1s})]}{S_1} - W_{ts} \quad (2.17)$$

$$W_{ts} = W_k + 2d_{4s}, \quad \tan \alpha \approx W_k + 2d_{4s} \frac{\pi}{S_1} \quad (2.18)$$

Karena slot stator berbentuk trapesium maka luas slot dapat ditentukan dengan luas trapesium dapat dinyatakan dengan:

$$\text{Luas stator} = \frac{1}{2} d_{4s} (W_{3s} + W_k) \quad (2.19)$$

F. Diameter Luar Motor Setelah diketahui semua nilai yang diperoleh dalam rumusan sub bab

Sebelumnya maka diameter luar dari motor dapat diketahui. Diameter luar motor dapat diketahui dengan rumusan sebagai berikut [7]:

$$D_0 = D + 2d_{cs} + 2d_s \quad (2.20)$$

$$d_s = d_{0s} + d_{3s} + d_{4s} \quad (2.21)$$

$$d = \left(\frac{B_{ts}}{B_{cs}} \right) \left(\frac{3}{\pi P} \right) \quad (2.22)$$

Dengan : nilai terbaik untuk $\frac{B_{ts}}{B_{cs}}$ adalah 1.15

d_{cs} = lebar inti stator (back iron) (m)

d_s = kedalaman slot (m)

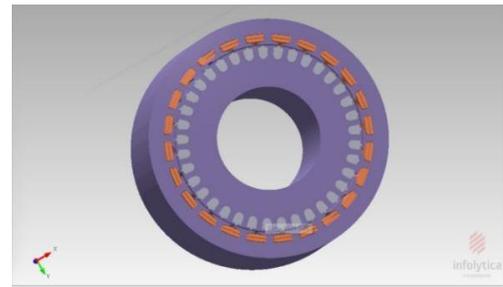
D_0 = diameter luar (m)

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

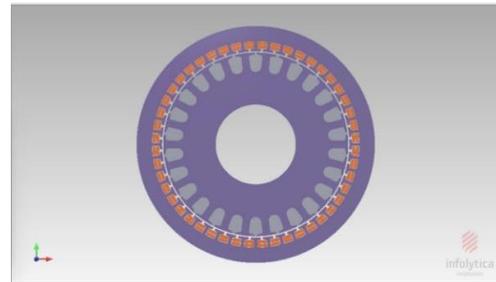
Spesifikasi motor induksi yang dirancang adalah 300 watt dengan nilai frekuensi 50 Hz. dan jumlah pole pada motor yang divariasikan. Adapun variasi jumlah pole yang dipakai adalah 4 pole 24 pole, 4 pole 36 slot dan 4 pole 48 slot.

3.1 Perbandingan Desain Motor Induksi

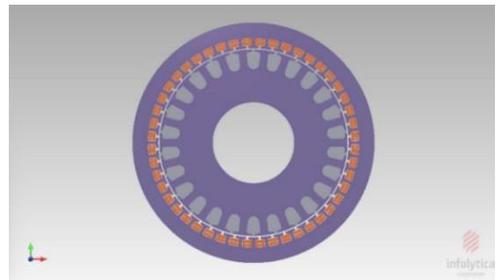
Desain Motor Induksi dilakukan dengan menggunakan software MotorSolve. Bagian-bagian motor induksi yang didesain yaitu stator dan rotor pada motor. Hasil desain motor induksi dapat dilihat pada gambar di bawah :



(a)



(b)



(c)

Gambar 2. (a) Desain motor induksi dengan 4 pole 24 (b) Desain motor induksi dengan 4 pole 36 slot. dan (c) Desain motor induksi dengan 4 pole 48

3.2 Perbandingan Nilai Efisiensi Dan Power Faktor



(a)

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO FTSIKA-BOGOR



(b)



(c)

Gambar 2. (a) Grafik efisiensi dan power factor Motor Induksi dengan 4 pole 24 (b) Grafik efisiensi dan power factor Motor Induksi dengan 4 pole 36 slot. dan (c) Grafik efisiensi dan power factor Motor Induksi dengan 4 pole 48 slot

	Rotor speed (rpm)	Rotor slip (%)	Output power (kW)	Efficiency (%)	Power factor
1	1500	0	0	0	0,0756
2	1485	1	0,268	77,2	0,35
3	1470	2	0,51	83,4	0,555
4	1455	3	0,729	84	0,687
5	1440	4	0,924	83,1	0,767
6	1425	5	1,1	81,6	0,816

(a)

	Rotor speed (rpm)	Rotor slip (%)	Output power (kW)	Efficiency (%)	Power factor
1	1500	0	0	0	0,0783
2	1485	1	0,197	82,2	0,489
3	1470	2	0,366	84,6	0,712
4	1455	3	0,509	83	0,812
5	1440	4	0,629	80,5	0,859
6	1425	5	0,728	77,8	0,882

(b)

	Rotor speed (rpm)	Rotor slip (%)	Output power (kW)	Efficiency (%)	Power factor
1	1500	0	0	0	0,0786
2	1485	1	0,113	82,3	0,494
3	1470	2	0,209	84,6	0,717
4	1455	3	0,291	83	0,818
5	1440	4	0,359	80,6	0,864
6	1425	5	0,416	77,8	0,888

(c)

Gambar 3. (a) Tabel Hasil Percoaan Motor Induksi dengan 4 pole 24 (b) Tabel Hasil Percoaan Motor Induksi dengan 4 pole 36 slot. dan (c) Tabel Hasil Percoaan Induksi dengan 4 pole 48 slot

Dari Grafik diatas menunjukkan bahwa nilai efisiensi pada setiap disain diman output power 300

watt. Pada desain pertama memiliki nilai efisiensi 77,2 % dan nilai Power Faktor 0,35. Pada desain kedua memiliki nilai efisiensi 84,6 % dan nilai power factor 0,71. Terakhir pada desain ketiga nilai efisiensinya adalah 80,6 % dan Power Faktor sekitar 0,86. Pada Hal ini efisiensi akan berpengaruh terhadap torsi[8]. Lebar magnet berpengaruh terhadap torsi karena adanya perbedaan flux efektif yang terbentuk akibat magnetic overhang effect[9]. Sedangkan untuk nilai power factor tertinggi ialah 0,86 yang mana merupakan desain dengan jumlah slot 48. Kemudian, nilai power factor terendah dimiliki oleh desain dengan nilai power factor 0,35 pada desain dengan jumlah slot 24. Sedangkan pada desain 36 slot memiliki nilai power factor sekitar 0,71. Power factor sendiri berpengaruh terhadap rugi-rugi daya ketika motor listrik dihidupkan[10].

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menganalisis pengaruh jumlah slot terhadap nilai efisiensi dan *Power Factor* pada *Motor Induksi*. *Desain Motor Induksi* menggunakan Jumlah pole 4, nilai output power sekitar 300 watt dan Frekuensi 50 Hz. Kemudian jumlah Slot pada motor divariasikan yaitu menggunakan 24,36 dan 48 slot pada desain motor. Hasil dari penelitian ini adalah nilai efisiensi tertinggi adalah 84,6 % yang dimiliki oleh desain dengan jumlah slot 48. Nilai *power Factor* dari setiap desain berbeda dimana desain motor dengan slot 24 memiliki nilai paling rendah yaitu 0,35 sedangkan di posisi kedua dengan jumlah slot 36 dengan nilai 0,73. dan yang tertinggi yaitu 0,86 dengan slot 46. dari semua rangkaian penelitian dapat disimpulkan bahwa jumlah slot mempengaruhi nilai efisiensi motor dan nilai power Faktor dari setiap desain. Adapun pengaplikasian dari desain motor ini adalah untuk kebutuhan motor servo. Dengan demikian maka desain ketiga dengan 48 slot merupakan desain motor dengan nilai efisiensi dan power factor tertinggi.

V. REFERENCES

- [1] Xu Linxun, Zhao Xiaoyu, Zhang Bao. *Research on selection method of driving motor for pure electric vehicle and design of calculation interface [J]. Electromechanical product development and innovation, 2014 (2): 37-395.*
- [2] Zhiwen An, *Design of Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle, 2021, 1881 022071.*
- [3] Gao daowei, wang shuo, Yang fuyuan. *Research progress of wireless charging technology for electric vehicles [J]. Journal of automotive safety and energy conservation, 2015, 6(04): 314-327.*
- [4] Hu jian. *Operation status of the automotive industry in 2018 and development trend in 2019 [N]. World metal guide, 2019-02-12 (A12).*
- [5] Pendry JB. *Achiral route to negative refraction [J]. Science, 2004, 306(5700): 1353- 1355.*

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO FTSUIKA-BOGOR

- [6] Saputra.F.I, Analisis Pengaruh Perbandingan Jumlah Slot Dan Pole Terhadap Output Desain PMSG, Universitas Muhammadiyah Surakarta,2023.
- [7] Sunyoto, Motor induksi 3 fasa dan rotor sangkar, Universitas Negeri Yogyakarta, 2014
- [8] Adeguna Ridlo Pramurti , Eka Firmansyah, Suharyanto, Review Perbandingan Metode Meminimalkan Torsi Denyut Pada Outer-Rotor Dan Dual-Stator Generator Magnet Permanen Fluks Radial Pada Teknologi PLTB Skala Kecil, Universitas Gadjah Mada, 2016.
- [9] Aditya, Yohannes (2019) Pengaruh Jumlah Pole dan Lebar Magnet terhadap Torsi Magnetic Crossed Helical Gear. Undergraduate thesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.,2023, 02111440000179
- [10] Purwadi, Pengaruh Power Faktor Terhadap Sistem Pencatu Daya Motor Listrik DC 2 MW Di ILST, Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), 2019, 2086-4218.