

# ANALISIS *FINITE ELEMENT* PENGARUH LEBAR CELAH UDARA TERHADAP PEFORMA MOTOR INDUKSI SATU FASA

Imron Ridzki<sup>1)</sup>, Asfari Hariz Santoso<sup>2)</sup>, Sigit Setya Wiwaha<sup>3)</sup>

Jurusan Teknik Elektro, Program Studi Teknik Listrik

Politeknik Negeri Malang

<sup>1)</sup> *imron.ridzki@polinema.ac.id*

<sup>2)</sup> *asfari.hariz@polinema.ac.id*

<sup>3)</sup> *sigit.setya@polinema.ac.id*

## Abstrak

Motor induksi merupakan motor listrik yang luas penggunaannya khususnya pada industri. Seringkali industri yang terletak jauh di pedalaman, bila terjadi kerusakan pada motor induksi dilakukan perbaikan dengan cara *replacement* antara motor induksi yang satu dengan motor induksi yang lain dan hanya diperhatikan daya motor dan sistem tegangan yang digunakan, sehingga seringkali dimensinya juga tidak persis sama. Dengan adanya kegiatan *replacement* tersebut diduga motor induksi tersebut akan mengalami banyak perubahan khususnya lebar celah udaranya. Untuk menghindari nilai efisiensi yang rendah, faktor daya yang buruk, dan kerapatan torsi yang rendah maka jarak celah udara suatu motor induksi tidak dirancang terlalu lebar. Di sisi lain distorsi distribusi kerapatan fluks celah udara dapat diminimalkan dengan memperbesar jarak celah udara. Penelitian ini dilakukan pengikisan sedikit diameter rotor pada motor induksi satu fasa rotor sangkar 1 kW 1000 rpm sehingga lebar celah udara 3,5 mm (Rotor A), 2,5 mm (Rotor B), dan 4 mm (Rotor C). Melalui analisis *Finite Element* menggunakan *software* FEMM 4.2 didapatkan kerapatan fluks celah udara tertinggi pada Rotor A 0,456 T, Rotor B 0,634 T, Rotor C sebesar 0,399 T. Sedangkan daya *output* saat beban nominal masing-masing motor didapatkan 0,77 kW (Rotor A), 1,03 kW (Rotor B), dan 0,69 kW Rotor C).

**Kata kunci:** Motor Induksi, Celah Udara, Analisis *Finite Element*, Kerapatan Fluks Celah Udara, Daya Output

## 1. PENDAHULUAN

Motor arus bolak-balik adalah motor yang banyak dipergunakan untuk bermacam-macam keperluan. Khususnya motor induksi (motor asinkron) adalah jenis motor arus bolak-balik yang paling banyak dipergunakan di industri-industri, bengkel-bengkel maupun alat-alat rumah tangga, dibandingkan dengan motor listrik lainnya [1]. Motor induksi yang banyak digunakan terutama adalah motor induksi dengan rotor sangkar, karena motor jenis ini mempunyai konstruksi yang kuat dan kokoh, memiliki keandalan yang tinggi, mudah pemeliharaannya dan harganya relatif murah [2] [3].

Seringkali pada industri yang terletak jauh di pedalaman, bila terjadi kerusakan pada motor induksi rotor sangkar, dilakukan perbaikan dengan cara *replacement* antara motor induksi yang satu dengan motor induksi yang lain serta hanya diperhatikan daya motor dan sistem tegangan yang digunakan, sedangkan mereknya kadangkala berbeda sehingga seringkali dimensinya juga tidak persis sama salah satu akibatnya adalah jarak celah udaranya berbeda.

Pada dasarnya untuk menghindari nilai efisiensi yang rendah, faktor daya yang buruk, dan kerapatan torsi yang rendah maka jarak celah udara suatu motor induksi tidak diizinkan dirancang terlalu lebar. Di sisi lain, distorsi distribusi kerapatan fluks celah udara dapat diminimalkan dengan memperbesar panjang celah udara [4]. Berdasar latar belakang tersebut suatu pengguna motor induksi yang

mengharuskan mengganti rotor yang mempunyai dimensi berbeda dengan rotor aslinya perlu memperhatikan jarak celah udara motor induksi tersebut.

Langkah yang dapat dilakukan agar jarak celah udara motor induksi hasil penggantian rotor yang dimensinya berbeda dengan aslinya dapat optimal adalah melakukan analisis *Finite Element* sebelum dilakukan penggantian rotor. Agar dapat diperkirakan kapasitas motor induksi serta distorsi distribusi kerapatan fluks celah udara dapat diperkecil.

Pada penelitian ini akan dilakukan perbandingan perbedaan jarak celah udara terhadap unjuk kerja motor induksi satu fasa dengan kapasitas 1 kW 1000 rpm 50 Hz. Adapun sebagai alat bantu analisis *Finite Element* distribusi kerapatan fluks celah udara menggunakan perangkat lunak FEMM 4.2.

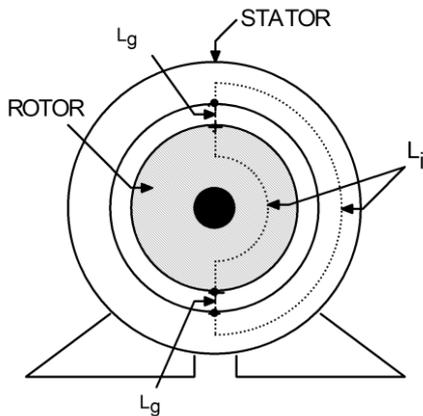
## 2. MOTOR INDUKSI

Motor induksi merupakan motor listrik yang umum digunakan pada di industri-industri, bengkel-bengkel maupun alat-alat rumah tangga, dibandingkan dengan motor listrik lainnya. Hal ini disebabkan motor induksi memiliki kelebihan dengan motor listrik jenis lain dengan konstruksi yang kokoh, perawatan yang mudah, dan harga yang murah.

### 2.1. Konstruksi Motor Induksi 1 Fasa

Konstruksi motor induksi satu fasa terdiri atas dua komponen yaitu stator dan rotor. Stator adalah bagian dari motor yang tidak bergerak dan rotor adalah bagian

yang bergerak yang bertumpu pada bantalan poros terhadap stator, diantara stator dan rotor terdapat celah udara sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 1 di bawah.



Gambar 2.1. Konstruksi Motor Induksi

- Stator

Inti stator motor induksi 1 fasa terdiri dari lapisan laminasi-laminasi plat besi yang tersusun dengan rapat. Laminasi plat besi diperlakukan sedemikian rupa agar terbentuk alur dan gigi alur stator.

- Rotor

Rotor untuk motor induksi 1 fasa adalah rotor sangkar, sama halnya dengan rotor sangkar untuk motor induksi 3 fasa. Konduktor rotor di buat dari batangan tembaga atau aluminium atau aluminium paduan.

## 2.2. Belitan Stator Motor Induksi

Pada dasarnya perancangan motor induksi terutama bagian stator, baik motor jenis rotor sangkar maupun jenis rotor belitan adalah sama. Dalam perancangan yang menjadi patokan untuk menentukan dimensi adalah daya jangkar, sehingga perlu diperhitungkan nilai faktor daya dan efisiensinya. Untuk motor induksi juga berlaku daya jangkar adalah [5]:

$$Q = C_0 \cdot D^2 \cdot L \cdot n_s \text{ (kVA)} \quad (1)$$

$$C_0 = 11 \cdot B_{AV} \cdot AC \cdot K_w \cdot 10^{-3} \quad (2)$$

$$P = Q \cdot \eta \cdot \cos\phi \text{ (kW)} \quad (3)$$

Dimana,

Q : Daya Input (kVA)

C<sub>0</sub> : Koefisien keluaran

D : Diameter inti stator (m)

L : Panjang inti stator (m)

AC : Amper konduktor spesifik (Ak/m)

B<sub>AV</sub> : Kerapatan fluksi spesifik celah udara (Wb/m<sup>2</sup>)

n<sub>s</sub> : Kecepatan sinkron (rps)

P : Daya Output (kW)

η : Effisiensi

cosφ : Faktor Daya

## 2.3. Analisis Finite Element

Mesin-mesin listrik yang tersusun atas laminasi inti dengan frekuensi operasi yang relatif rendah arus eddy dalam laminasi inti dan perubahan kerapatan arusnya dapat diabaikan sehingga persamaan medan magnetostatiknya dapat diuraikan [6]. Menurut persamaan Maxwell dan hukum ampere, kerapatan arus yang digunakan sebagai masukan untuk menghitung medan magnet yang besarnya [7] [9]:

$$\nabla \times H = J \quad (4)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (5)$$

Dimana,

H(x,y,z) : Medan magnet (A/m)

B(x,y,z) : Kerapatan fluks magnet (T)

J(x,y,z) : kerapatan arus (A/m<sup>2</sup>)

Hubungan antara kerapatan fluks magnet dan medan magnet dapat dihitung dengan persamaan:

$$B = \mu_0 \mu_r H = \nabla \times A \quad (6)$$

Dimana,

μ<sub>r</sub>(x,y,z) : permeabilitas relatif

μ<sub>o</sub> : permeabilitas udara = 4π10<sup>-7</sup>.

Pada kasus dua dimensi (bidang datar):

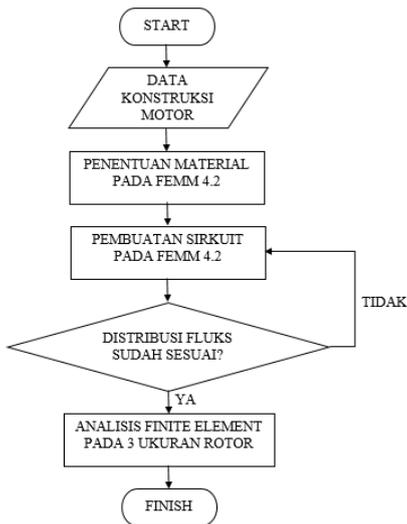
$$J = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ j(x,y) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ A_z(x,y) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial A_z}{\partial y} \\ -\frac{\partial A_z}{\partial x} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

## 3. METODOLOGI DAN DATA KONSTRUKSI MOTOR INDUKSI

### 3.1. METODOLOGI PENELITIAN



Gambar 3.1. Flow Chart Penelitian

Penelitian ini akan dilakukan di Laboratorium Elektronika Daya dan Kendali Motor Listrik Politeknik Negeri Malang sesuai dengan flow chart pada Gambar 2 di atas, dengan memanfaatkan satu stator Motor Induksi 1 fasa dengan 3 rotor dengan dimensi yang berbeda.

### 3.2. DATA KONSTRUKSI MOTOR INDUKSI

- Konstruksi Motor Induksi

Data Motor dan data konstruksi stator Motor Induksi yang digunakan untuk penelitian ditunjukkan pada Tabel 1 dan 2 di bawah.

TABEL 3.1. DATA MOTOR

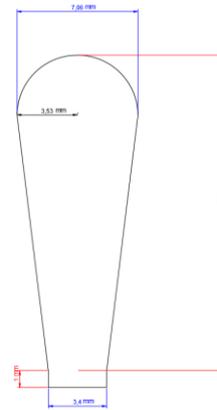
Data	Jumlah/Dimensi	Satuan
Daya Output	1	kW
Effisiensi	70	%
Faktor Daya	0,64	-
Rating Tegangan	220	V
Arus Beban Penuh	3,2	A
Specific Electric Loading	6	A/m
Faktor Belitan	0,95	-

TABEL 3.2. KONSTRUKSI MOTOR

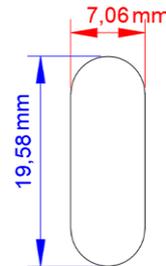
Data	Jumlah/Dimensi	Satuan
Diameter dalam stator	105	mm
Diameter luar stator	173	mm
Panjang Inti Stator	85,1	mm
Jumlah Slot Stator	36	buah
Jumlah Slot Rotor	24	buah
Jumlah Kutub	6	buah
Diameter rotor standar (Rotor A)	101,5	mm
Diameter rotor standar (Rotor B)	102,5	mm
Diameter rotor standar (Rotor C)	101	mm

- Dimensi Slot Stator dan Rotor

Pengukuran dimensi slot stator dan rotor ditunjukkan pada Gambar 3 dan 4 di bawah.

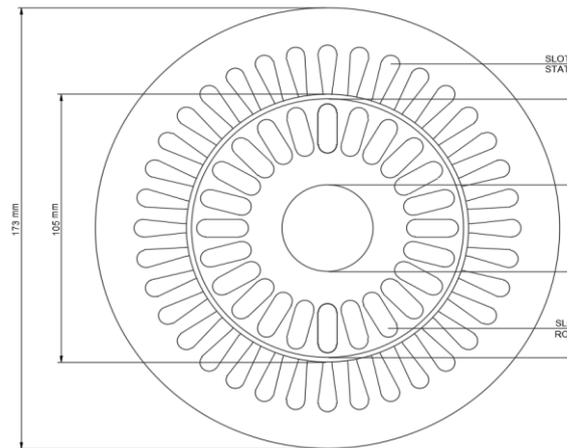


Gambar 3.2. Dimensi Slot Stator

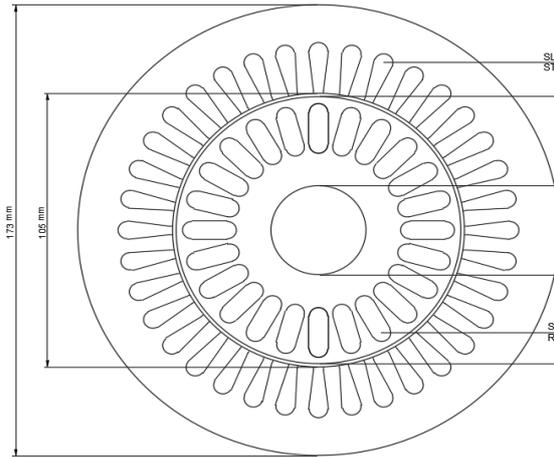


Gambar 3.3. Dimensi Slot Rotor

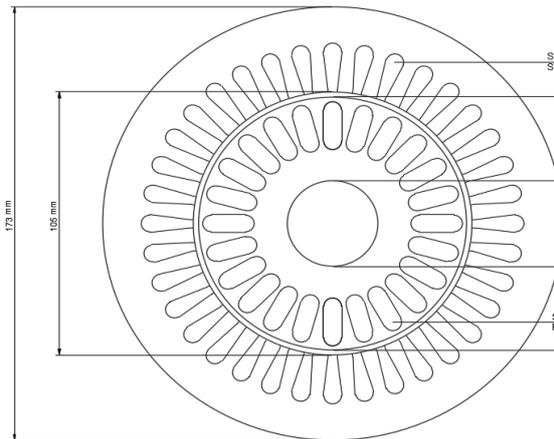
Adapun bentuk motor induksi secara jelas yang digunakan pada penelitian ini dengan Rotor A, Rotor B, dan Rotor C ditunjukkan pada Gambar 5, 6, dan 7 di bawah.



Gambar 3.4. Dimensi Motor Induksi dengan Rotor A

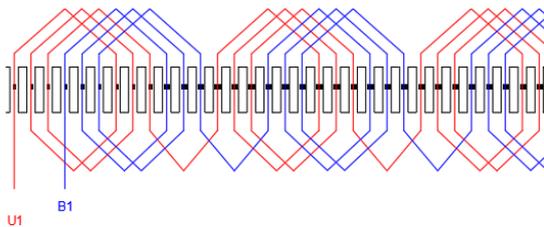


Gambar 3.5. Dimensi Motor Induksi dengan Rotor B



Gambar 3.6. Dimensi Motor Induksi dengan Rotor C

- **Bentuk Belitan Stator**  
Tipe belitan yang digunakan pada stator Motor Induksi yang digunakan adalah Terpusat-Terdistribusi. Adapun bentuk belitannya ditunjukkan pada Gambar 8 di bawah.



Gambar 3.7. Bentuk Belitan Stator

## 4. ANALISIS FINITE ELEMENT

### 4.1. Penentuan Sirkuit pada FEMM 4.2

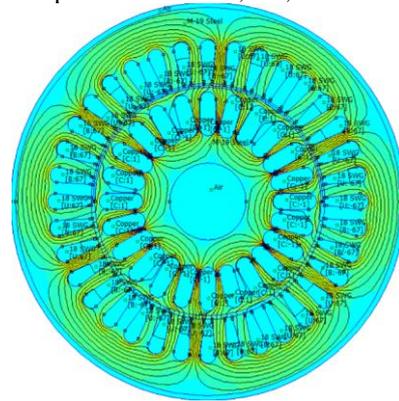
Simulasi dan analisis medan magnet menggunakan elemen berhingga bertujuan untuk mengetahui hasil unjuk kerja motor yang diteliti. Alat bantu yang digunakan adalah FEMM 4.2. Bahan material inti dan belitan, dimensi, serta kerapatan medan magnet pada

celah udara menjadi variabel yang diperhitungkan untuk mengetahui performa motor.

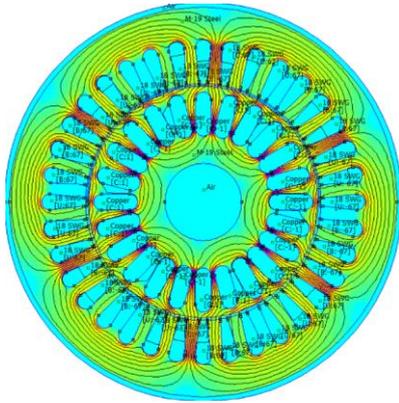
- **Bahan Inti**  
Material laminasi inti pada motor yang disimulasikan menggunakan baja silikon. Kandungan silikon untuk menurunkan arus Eddy dan mengurangi histerisis karena volume resistivitasnya yang tinggi [8]. Material inti yang dipilih pada simulasi finite element adalah M-19 Steel. Karakteristik material bahan inti (M-19 Steel)
- **Material Belitan Stator**  
Kondutor kumparan yang mengisi ruang alur stator menggunakan bahan tembaga yang berbentuk circular. Pada simulasi menggunakan American Wire Gauge jenis 20 AWG yang mempunyai diameter 0,812 mm dengan jumlah lilit sebanyak 92.
- **Material-material Lain**  
Material yang harus ditentukan lainnya antara lain bagian celah udara dan batang konduktor rotor yang masing-masing menggunakan Air dan copper
- **Arus Tiap Sirkuit**  
Arus yang mengalir dalam konduktor kumparan stator yang sesuai dengan keadaan ideal ditentukan sebesar 3,2 A. Hal tersebut mengacu arus pada kondisi beban nominal.

### 4.2. Bentuk Distribusi Fluks

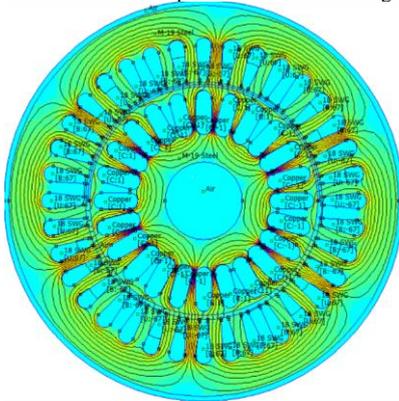
Hasil simulasi pada FEMM 4.2 menunjukkan distribusi fluks sudah sesuai dengan jumlah 6 kutub. Adapun berturut-turut gambar hasil simulasinya ditunjukkan pada Gambar 4.1, 4.2, dan 4.3 di bawah.



Gambar 4.1. Distribusi Fluks pada Motor Induksi dengan Rotor A



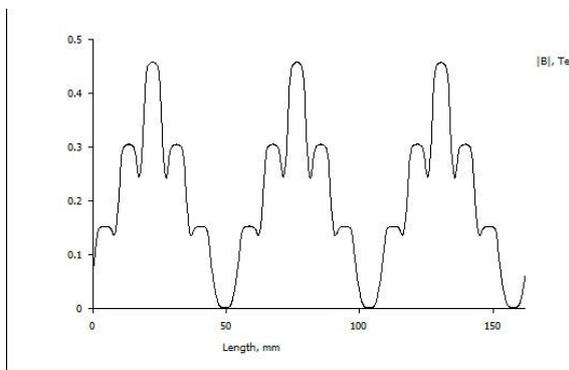
Gambar 4.2. Distribusi Fluks pada Motor Induksi dengan Rotor B



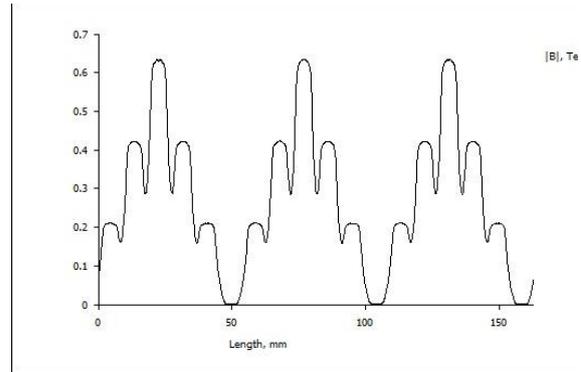
Gambar 4.3. Distribusi Fluks pada Motor Induksi dengan Rotor C

### 4.3. Kerapatan Fluks Celah Udara

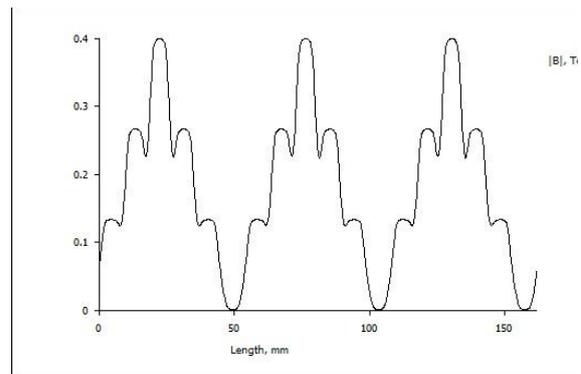
Kerapatan fluks ( $B$ ) pada celah udara motor induksi yang didapatkan dari hasil simulasi pada kondisi beban penuh dari ketiga rotor didapatkan hasil yang berbeda-beda. Pada Rotor B didapatkan nilai kerapatan fluks celah udara terbesar yang paling tinggi diantara ketiga rotor dengan nilai 0,634 T, pada Rotor A nilai kerapatan fluks celah udara sebesar 0,456 T, dan kerapatan fluks celah udara terbesar Rotor C sebesar 0,399 T. Adapun bentuk distribusi kerapatan fluks pada celah udara dari hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 4.4, 4.5, dan 4.6 di bawah.



Gambar 4.4. Distribusi Fluks pada Celah Udara Motor Induksi dengan Rotor A



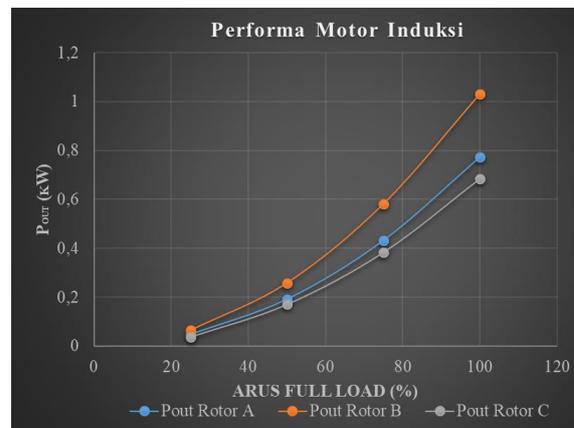
Gambar 4.5. Distribusi Fluks pada Celah Udara Motor Induksi dengan Rotor B



Gambar 4.6. Distribusi Fluks pada Celah Udara Motor Induksi dengan Rotor C

### 4.4. Performa Motor Induksi

Pada simulasi pengujian berbeban menunjukkan motor induksi dengan celah udara yang lebih pendek yaitu pada Motor induksi dengan Rotor B memiliki daya output yang paling tinggi yakni 1,03 kW pada arus beban penuh, sedangkan pada Motor Induksi dengan Rotor A dan C pada saat beban penuh daya keluaran tertinggi berturut-turut sebesar 0,77 kW dan 0,69 kW. Adapun grafik hasil simulasi pengujian berbeban ditunjukkan pada Gambar 4.7 di bawah.



Gambar 4.7. Grafik hasil simulasi pengujian berbeban

## 5. Kesimpulan

- Distribusi kerapatan fluks celah udara pada Motor Induksi hasil penelitian tertinggi pada Motor Induksi dengan Rotor B (celah udara paling sempit) dan distribusi kerapatan fluks celah udara terdapat pada Motor Induksi dengan Rotor C. Hal ini membuktikan bahwa semakin sempit panjang celah udara semakin tinggi distribusi kerapatan fluks celah udara pada Motor Induksi 1 Fasa dengan kutub 6 buah.
- Hasil pengujian berbeban Motor Induksi dengan celah udara paling sempit yakni Motor Induksi dengan Rotor B memiliki performa paling baik dalam hal daya output sebesar 1,03 kW. Sedangkan Motor Induksi dengan celah udara paling lebar yakni Motor Induksi dengan Rotor C memiliki daya output paling rendah sebesar 0,69 kW. Hal tersebut membuktikan bahwa semakin sempit jarak celah udara semakin baik nilai daya output nya.

## 6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Pali, "A New Sensorless Speed Estimation Strategy for Induction Motor Driven Electric Vehicle with Energy Optimization Scheme," IEEE, 2016J. Clerk Maxwell, "A Treatise on Electricity and Magnetism," 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp.68-73.
- [2] N. Rivière and M. Villani, "Optimisation of a High Speed Copper Rotor Induction Motor for a Traction Application," IECON 2019 - 45th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc., vol. 1, pp. 2720–2725, IEEE, 2019.
- [3] Mismail Budiono, Dasar Teknik Elektro. Malang :Universitas Brawijawa Press, 2011
- [4] M. Muteba and D. V. Nicolae, "Influence of Air-Gap Length on the Performance of a Three-Phase Induction Motor with a Capacitive Auxiliary Stator Winding," IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Washington, DC, 2018, pp. 547-552, doi: 10.1109/IECON.2018.8591749.
- [5] Sawhney A.K, 1990. Electrical Machine Design. New Delhi : Dhanfat Rai & Sons.Gonen, Turan. 1987. Electric Power Distribution Sistem Engineering. Singapore: McGraw-Hill Book Company.
- [6] D. Meeker. 2008. Finite Element Methode Magnetics Version.
- [7] G. Mahalingam, A. Keyhani, 2000."Design of 42v/3000w permanent magnet synchronous generator," Electrical Engineering Department, Ohio State University, Columbus Ohio, Technical Report.
- [8] Pudji Irasari, Hilman Syaeful Alam, dan Muhammad Kasim. 2012. Magnetic Simulation and Analysis of Radial Flux Permanent Magnet Generator Using Finite Element Method. Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology 03 : 23-30.
- [9] Palma Garcia, M. T., Caceres Cardenas, F. V., Kuong, J. L., & Quispe, E. C. (2018). Transient Analysis of Induction Motors Considering the Saturation Effect Applying the Finite Element Method. 2018 IEEE ANDESCON. doi:10.1109/andescon.2018.8564699