

Perancangan dan Analisis Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan *COMSOL Multiphysics*

Wahyu Eksanto¹, Hery Teguh Setiawan², Dwi Novianto³

¹*Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Tidar
Jalan Kapten Suparman 39 Magelang 56116, Indonesia*

^{2,3}*Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Tidar
Jalan Kapten Suparman 39 Magelang 56116, Indonesia*

wahyoeksanto@gmail.com¹, hery.shirohige@gmail.com², nopi_jte@untidar.ac.id³

Abstrak— Perancangan motor induksi membutuhkan perangkat lunak yang tidak hanya mampu merancang geometri, tetapi juga dapat mensimulasikan berbagai parameter motor induksi, termasuk getaran. COMSOL Multiphysics memungkinkan hal tersebut untuk dilakukan. Dalam penelitian ini, geometri motor induksi dibuat dalam bentuk 2D untuk mensimulasikan medan elektromagnetik motor dan bentuk 3D untuk mensimulasikan putaran rotor, serta getaran pada motor. Simulasi dilakukan dengan menguji rancangan motor induksi menggunakan 8 sampel material yang memiliki permeabilitas relatif antara 500 hingga 4000 untuk menemukan getaran paling kecil di antara semua sampel. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan nilai permeabilitas relatif material pada setiap sampel menghasilkan penurunan reluktansi dan arus eddy, yang menyebabkan getaran pada motor induksi juga menurun. Berdasarkan penelitian, rancangan motor induksi sampel 8 dengan nilai permeabilitas relatif material sebesar 4000, reluktansi 7121,73 A/Wb, dan arus eddy sebesar 0,013 A memiliki getaran yang paling kecil dibandingkan dengan sampel lainnya, dengan magnitudo sebesar $1,34 \times 10^{-4}$ m/s.

Kata kunci— motor induksi, getaran, COMSOL, permeabilitas relatif, arus eddy, reluktansi.

Abstract— The design of an induction motor requires software that is not only capable of designing the geometry but also can simulate various parameters of the induction motor, including vibrations. COMSOL Multiphysics makes this possible. In this study, the geometry of the induction motor was created in 2D to simulate the motor's electromagnetic field and in 3D to simulate the rotor rotation and vibrations in the motor. The simulation was carried out by testing the design of the induction motor using 8 material samples with relative permeabilities ranging from 500 to 4000 to find the smallest vibration among all the samples. The simulation results show that increasing the relative permeability value of the material in each sample results in a reduction of reluctance and eddy currents, which in turn reduces the vibrations in the induction motor. According to the study, the design of the induction motor sample 8, with a material relative permeability of 4000, reluctance of 7121.73 A/Wb, and eddy current of 0.013 A, has the smallest vibration compared to the other samples, with a magnitude of $1,34 \times 10^{-4}$ m/s.

Keywords— induction motor, vibrations, COMSOL, relative permeability, eddy current, reluctance.

I. PENDAHULUAN

Motor induksi adalah jenis motor listrik AC yang saat ini paling banyak digunakan dalam industri baik dalam skala besar maupun kecil. Motor induksi memiliki beberapa keunggulan seperti konstruksi yang baik, pengoperasian yang lebih mudah dalam hal kontrol, ketahanan motor yang kuat, mempunyai efisiensi yang tinggi, dan biaya perawatan yang relatif lebih murah. Vibrasi atau getaran dari motor listrik induksi dapat mempengaruhi kinerja motor ketika terjadi peningkatan pada nilai getaran yang mencapai batas normal pada motor listrik (Musyaffa & Medilla, 2019).

Perancangan dan simulasi motor listrik induksi menggunakan perangkat lunak elektromagnetik untuk kondisi *steady-state* memerlukan waktu yang lebih lama karena sifat prosesnya yang iteratif. Oleh karena itu, diperlukan pengurangan waktu komputasi dalam desain dan simulasi

motor listrik (Gupta et al., 2020). COMSOL Multiphysics merupakan perangkat lunak analisis yang menggunakan metode elemen hingga atau *Finite Element Method*, dengan menggunakan software ini, maka sangat memungkinkan untuk memperluas model fisika klasik menjadi model multi-fisika. Berkat tawaran model fisik dasar dengan kuantitas fisik yang ditentukan, seperti sifat material, energi, aliran dan sumber beban, yang dapat mengurangi waktu pembentukan model dengan persamaan untuk fenomena fisika yang diteliti. COMSOL Multiphysics digunakan untuk menggambarkan mode aplikasi matematika yang dapat melakukan berbagai analisis, termasuk analisis stasioner dan tergantung waktu, analisis linier dan nonlinier (Djaidir et al., 2024).

Studi ini akan membahas tentang perancangan motor induksi 3 fasa menggunakan perangkat lunak COMSOL Multiphysics dan menganalisis getaran pada tiap sampel

material yang disimulasikan dengan tujuan untuk mendapatkan rancangan dengan getaran paling kecil dari seluruh sampel.

II. DASAR TEORI

A. Motor Induksi

Motor induksi adalah motor listrik arus bolak-balik (AC) yang putaran rotornya tidak sama dengan putaran medan stator karena terdapat selisih putaran yang disebut slip. Motor induksi disebut juga sebagai motor asinkron karena putaran rotornya yang tidak sama dengan putaran medan stator. Motor induksi memiliki konstruksi yang kuat, sederhana, handal, dan efisiensi yang cukup tinggi saat berbeban penuh dan tidak membutuhkan perawatan yang banyak (Susanto et al., 2021).

B. Permeabilitas Relatif Material

Permeabilitas relatif (μ_r) adalah ukuran kemampuan suatu bahan dalam mendukung pembentukan medan magnet di dalamnya. Pada motor induksi, bahan yang digunakan untuk inti magnetik memiliki permeabilitas relatif yang tinggi, yang memungkinkan fluks magnetik yang lebih besar diterapkan pada stator dan rotor. Ketika permeabilitas relatif suatu material meningkat, induksi magnetik (B) dalam material tersebut juga meningkat untuk medan magnet (H) yang sama (Beckley, 2002). Hubungan antara induksi magnetik dan medan magnet diberikan oleh persamaan berikut:

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (1)$$

Keterangan:

- B = induksi elektromagnetik (T)
- μ_0 = permeabilitas vakum ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m)
- μ_r = permeabilitas relatif material
- H = intensitas medan magnet (A/m)

C. Hukum Ampere dan Biot Savart

Hukum Biot-Savart adalah konsep dasar untuk menentukan besarnya medan magnet yang dihasilkan oleh arus listrik dalam sebuah konduktor. Terlepas dari bentuk konduktor tersebut, baik itu kawat, lempengan, maupun bola, dan dengan kuat arus berapa pun, besarnya medan magnet dapat ditentukan menggunakan Hukum Biot-Savart. Namun, karena perhitungan Biot-Savart menggunakan kalkulus integral, menghitung medan magnet untuk konduktor dengan bentuk yang rumit bisa menjadi sulit. Oleh karena itu, Hukum Ampere menjadi alternatif untuk menghitung kuat medan magnet yang dihasilkan oleh arus listrik. Persamaan Hukum Ampere untuk menghitung kuat medan magnet adalah sebagai berikut:

$$B \cdot l = \mu \cdot N \cdot I \quad (2)$$

Keterangan:

- B = Kuat medan magnet (T)
- l = panjang lintasan tertutup (m)
- μ = permeabilitas (H/m)
- N = jumlah lilitan
- I = Arus eddy (A)

Permeabilitas (μ) dapat dicari dengan mengalikan permeabilitas vakum (μ_0) dan permeabilitas relatif material (μ_r).

$$\mu = \mu_0 \times \mu_r \quad (3)$$

Keterangan:

- μ = permeabilitas (H/m)
- μ_0 = permeabilitas vakum (4×10^{-7} H/m)
- μ_r = permeabilitas relatif material

D. Reluktansi

Reluktansi dalam motor induksi merujuk pada hambatan magnetik yang dihadapi fluks magnetik saat mengalir melalui material magnetik. Reluktansi mempengaruhi pembangkitan dan distribusi fluks magnetik di dalam komponen magnetik motor induksi. Nilai reluktansi dipengaruhi oleh beberapa hal diantaranya yaitu panjang alur magnetik (l) yang semakin panjang alur magnetik maka semakin tinggi reluktansinya, luas penampang (A) yang semakin besar luas penampang maka semakin rendah reluktansinya, dan permeabilitas material (μ) yang semakin tinggi nilai permeabilitas (kemampuan material untuk menghantarkan fluks magnetik) maka semakin rendah reluktansinya (Masoumi & Bilgin, 2024). Persamaan untuk reluktansi seperti berikut:

$$R = \frac{l}{\mu A} \quad (4)$$

Keterangan:

- R = reluktansi (A/Wb)
- l = panjang jalur magnetik (m)
- μ = permeabilitas (H/m)
- A = luas penampang (m²)

E. Arus Eddy

Arus Eddy adalah arus yang dihasilkan dalam konduktor yang berada di bawah pengaruh medan magnet yang berubah-ubah. Dampak dari arus eddy yaitu kehilangan daya, pemanasan motor, vibrasi dan kebisingan. Harmonik arus eddy pada motor listrik merujuk pada arus listrik yang diinduksi dalam konduktor oleh perubahan medan magnet yang sering kali mengandung komponen harmonik (Di et al., 2019).

III. METODOLOGI

Perancangan motor induksi ini menggunakan software *COMSOL Multiphysics* versi 6.2. Dalam pembuatan rancangan menggunakan dua *interface* yaitu *Rotating Machinery, Magnetic* untuk mensimulasikan medan elektromagnetik dalam bentuk geometri 2D dan *Multibody Dynamics* untuk mensimulasikan putaran rotor serta getaran pada *housing* dalam bentuk geometri 3D. Spesifikasi motor induksi yang dibuat dapat dilihat pada Tabel 1.

TABEL I. SPESIFIKASI RANCANGAN MOTOR INDUKSI

No	Deskripsi	Nilai
1	Panjang rotor	0,08 m
2	Suplai frekuensi	60 Hz
3	Jumlah rotor	1
4	Jumlah stator	6
5	Material stator	Steel
6	Material inner rotor dan shaft	Steel
7	Material outer rotor	Aluminum alloy
8	Diameter motor	0,14 m
9	Diameter shaft	0,02 m

10	Diameter rotor	0,04 m
11	Diameter stator	0,104 m
12	Tipe slot stator	1
13	Jumlah lilitan	2045
14	Ketidaksejajaran radial pada airgap	0,6 mm

Simulasi dilakukan setelah pembuatan model motor induksi selesai. Terdapat 8 sampel nilai permeabilitas relatif material yang akan disimulasikan untuk mendapatkan nilai getaran yang paling kecil diantara semua sampel yang ada. Nilai permeabilitas relatif tiap sampel dapat dilihat di Tabel 2.

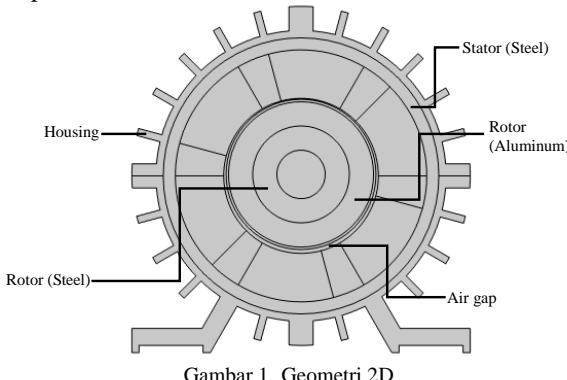
TABEL II. NILAI PERMEABILITAS RELATIF PER-SAMPLE

No	Nama	Nilai Permeabilitas Relatif
1	Sampel 1	500
2	Sampel 2	1000
3	Sampel 3	1500
4	Sampel 4	2000
5	Sampel 5	2500
6	Sampel 6	3000
7	Sampel 7	3500
8	Sampel 8	4000

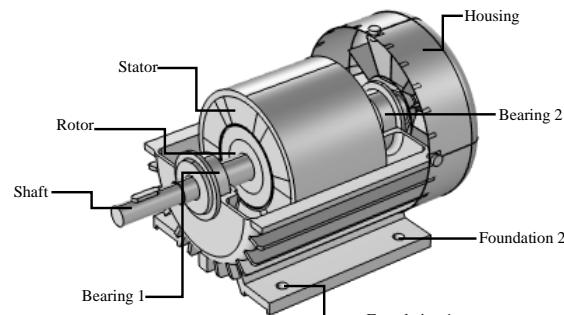
Tiap sampel akan disimulasikan dengan rancangan motor induksi yang telah dibuat. Simulasi akan menunjukkan kuat medan magnet untuk menghitung reluktansi dan arus eddy yang dihasilkan. Nilai *housing stress* dan magnitudo kecepatan rotor yang sebanding dengan nilai getaran juga dapat diperlihatkan. Serta, area penyebaran getaran dapat ditunjukkan.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perancangan motor induksi dibuat menggunakan *COMSOL Multiphysics*, geometri 2D dibuat untuk mensimulasikan medan elektromagnetik dalam motor dengan memanfaatkan *interface rotating machinery, magnetic* dan model 3D dibuat untuk mensimulasikan putaran rotor, serta getaran pada *housing* dengan memanfaatkan *interface multibody dynamics*. Geometri dari rancangan motor induksi dibuat sesuai dengan spesifikasi yang ada pada Tabel 1. Geometri 2D dan 3D dapat dilihat pada Gambar 1 dan Gambar 2.

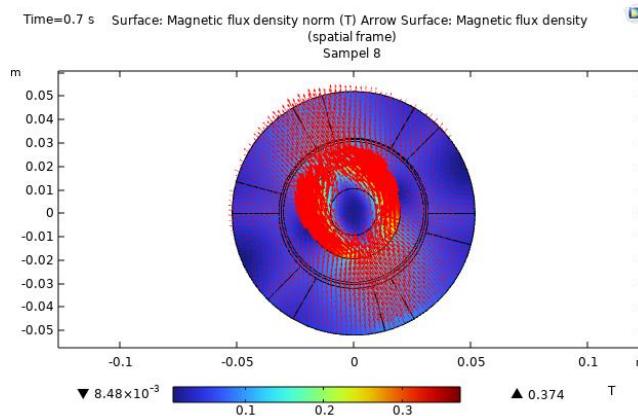


Gambar 1. Geometri 2D



Gambar 2. Geometri 3D

Berdasarkan simulasi dari sampel 1 sampai sampel 8, kuat medan magnet semakin tinggi seiring dengan tingginya nilai permeabilitas relatif dari material yang dimasukkan. Hal ini terjadi karena nilai permeabilitas relatif sebanding dengan nilai medan magnet dalam material, semakin tinggi nilai permeabilitas relatif suatu material maka induksi magnet yang diberikan kepada rotor dan stator juga akan lebih besar. Gambar 3 memperlihatkan hasil simulasi fluks magnetik sampel 8. Tabel 3 memperlihatkan peningkatan medan magnet pada tiap sampel simulasi.



Gambar 3. Fluks magnetik sampel 8

TABEL III. KUAT MEDAN MAGNET TIAP SAMPEL

No	Nama	Kuat Medan Magnet (T)	
		Minimal	Maksimal
1	Sampel 1	$7,37 \times 10^{-3}$	0,17
2	Sampel 2	$7,99 \times 10^{-3}$	0,194
3	Sampel 3	$8,22 \times 10^{-3}$	0,227
4	Sampel 4	$8,31 \times 10^{-3}$	0,26
5	Sampel 5	$8,38 \times 10^{-3}$	0,292
6	Sampel 6	$8,42 \times 10^{-3}$	0,322
7	Sampel 7	$8,45 \times 10^{-3}$	0,349
8	Sampel 8	$8,48 \times 10^{-3}$	0,374

Kuat medan magnet dipengaruhi oleh reluktansi, jika nilai reluktansi rendah maka fluks magnetik yang dibangkitkan akan tinggi dan kuat medan magnet semakin besar. Seperti yang terlihat pada Tabel 3, kuat medan magnet semakin besar sebanding dengan nilai permeabilitas relatif yang dimasukkan. Hubungan antara reluktansi, fluks magnetik, dan permeabilitas

dapat dilihat pada persamaan 4. Perhitungan reluktansi untuk sampel 8 sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \mathcal{R} &= \frac{l}{\mu A} \\ \mathcal{R} &= \frac{0,358}{4000 \cdot 4 \times 10^{-7} \cdot 0,01} \\ \mathcal{R} &= \frac{0,358}{0,0000502656} \\ \mathcal{R} &= 7121,73 \text{ A/Wb} \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan reluktansi, semakin tinggi nilai permeabilitas relatif maka semakin tinggi kuat medan magnet, serta semakin rendah nilai reluktansi yang dihasilkan. Hal ini berpengaruh pada turunnya nilai arus eddy dan getaran yang dihasilkan oleh motor seiring dengan naiknya nilai permeabilitas relatif material yang dimasukkan.

Nilai arus eddy yang dihasilkan dari tiap simulasi sampel dapat dicari dengan menggunakan persamaan 2 dan persamaan 3. Contoh perhitungan pada sampel 8 adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \mu &= \mu_0 \times \mu_r \\ \mu &= 4\pi \times 10^{-7} \times 4000 \\ \mu &= 5,0265 \times 10^{-3} \text{ H/m} \end{aligned}$$

maka,

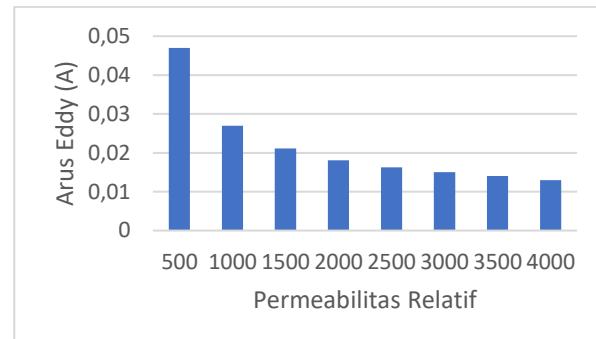
$$\begin{aligned} B \cdot l &= \mu \cdot N \cdot I \\ I &= \frac{B \cdot l}{\mu \cdot N} \\ I &= \frac{0,374 \times 0,358}{5,0265 \times 10^{-3} \times 2045} \\ I &= \frac{0,133892}{5,0265 \times 10^{-3} \times 2045} \\ I &= \frac{0,133892}{10,2791925} \\ I &= 0,013 \text{ A} \end{aligned}$$

Hasil perhitungan arus eddy sampel 1 sampai sampel 8 dapat dilihat pada Tabel 4.

TABEL IV. ARUS EDDY TIAP SAMPEL

No	Nama	Arus Eddy (A)
1	Sampel 1	0,047
2	Sampel 2	0,027
3	Sampel 3	0,0211
4	Sampel 4	0,0181
5	Sampel 5	0,0163
6	Sampel 6	0,015
7	Sampel 7	0,014
8	Sampel 8	0,013

Pada Tabel 4, terlihat bahwa arus eddy menurun seiring dengan peningkatan nilai permeabilitas relatif bahan. Jenis material dengan permeabilitas relatif yang lebih tinggi cenderung menghasilkan arus eddy yang lebih rendah, seperti pada Gambar 4.

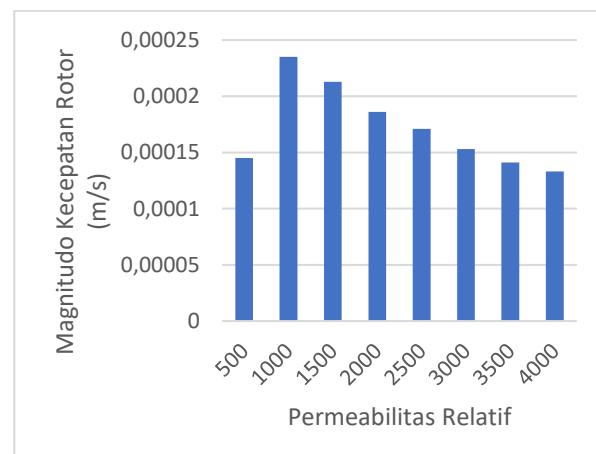


Gambar 4. Grafik arus eddy

Berdasarkan hasil simulasi sampel 1 sampai sampel 8 yang ada pada Tabel 5, terlihat bahwa nilai minimal magnitudo cenderung menurun seiring dengan meningkatnya nilai permeabilitas relatif. Nilai maksimal magnitudo adalah sama untuk semua sampel simulasi yaitu sebesar 21,5 m/s. Penurunan magnitudo kecepatan dapat dilihat pada Gambar 5.

TABEL V. NILAI HOUSING STRESS DAN MAGNITUDO KECEPATAN ROTOR

Nama	Housing stress (N/m ²)		Magnitudo kecepatan rotor (m/s)	
	Minimal	Maksimal	Minimal	Maksimal
Sampel 1	$9,71 \times 10^4$	$2,6 \times 10^5$	$1,45 \times 10^{-4}$	21,5
Sampel 2	$12,1 \times 10^4$	$1,94 \times 10^5$	$2,35 \times 10^{-4}$	21,5
Sampel 3	$9,3 \times 10^4$	$1,72 \times 10^5$	$2,13 \times 10^{-4}$	21,5
Sampel 4	$8,88 \times 10^4$	2×10^5	$1,86 \times 10^{-4}$	21,5
Sampel 5	$8,14 \times 10^4$	$2,14 \times 10^5$	$1,71 \times 10^{-4}$	21,5
Sampel 6	$7,69 \times 10^4$	$2,23 \times 10^5$	$1,53 \times 10^{-4}$	21,5
Sampel 7	$7,08 \times 10^4$	$2,29 \times 10^5$	$1,41 \times 10^{-4}$	21,5
Sampel 8	$6,7 \times 10^4$	$2,34 \times 10^5$	$1,33 \times 10^{-4}$	21,5

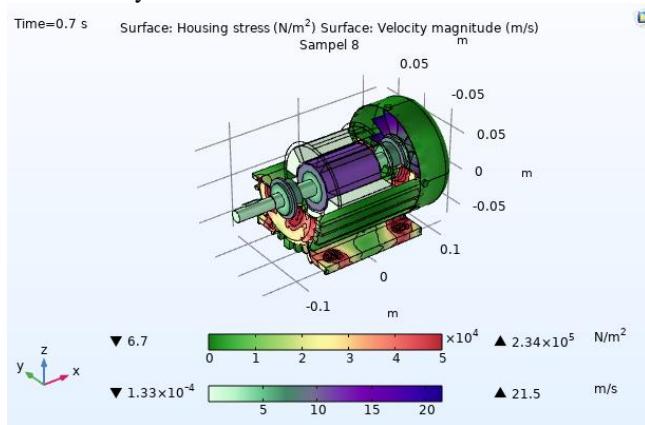


Gambar 5. Grafik magnitudo kecepatan rotor

Dapat dilihat pada grafik, nilai minimal magnitudo menunjukkan tren menurun seiring dengan meningkatnya nilai permeabilitas relatif. Ini menunjukkan bahwa semakin tinggi permeabilitas relatif material, semakin kecil magnitudo yang dihasilkan.

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan untuk semua sampel, maka material dengan permeabilitas relatif yang lebih tinggi menghasilkan arus eddy dan reluktansi yang lebih kecil. Hal ini menyebabkan getaran yang dihasilkan juga

semakin kecil karena nilai reluktansi dan arus eddy yang ada pada rotor menurun. Maka dari itu, sampel 8 dengan permeabilitas relatif material sebesar 4000 dengan reluktansi sebesar 7121,73 A/Wb dan arus eddy yang dihasilkan sebesar 0,013 A menghasilkan getaran paling sedikit dibandingkan dengan sampel lain dengan nilai magnitudo sebesar $1,33 \times 10^{-4}$ m/s. Gambar 5 memperlihatkan area penyebaran getaran pada sampel 8, area yang mengalami getaran paling tinggi adalah yang ditandai dengan warna merah, dalam hal ini berarti *bearing* dan sambungan antara *housing* dan *foundation* yang mengalami getaran paling tinggi dibandingkan area motor induksi lainnya.



Gambar 6. Area penyebaran getaran sampel 8

V. KESIMPULAN

Perancangan model motor induksi menggunakan COMSOL Multiphysics versi 6.2 dilakukan dengan membuat geometri 2D untuk mensimulasikan medan elektromagnetik dan geometri 3D untuk mensimulasikan putaran rotor serta getaran pada *housing*. Hasil simulasi pada 8 sampel

permeabilitas relatif material (500 hingga 4000) menunjukkan bahwa semakin tinggi nilai permeabilitas relatif material, maka nilai reluktansi dan arus eddy semakin kecil. Hal ini berpengaruh terhadap menurunnya nilai getaran dari sampel 1 hingga sampel 8. Pada sampel 8, dengan permeabilitas relatif 4000, reluktansi 7121,73 A/Wb, dan arus eddy 0,013 A, menghasilkan getaran yang paling kecil dibandingkan sampel lainnya dengan magnitudo $1,34 \times 10^{-4}$ m/s.

REFERENSI

- Beckley, P. (2002). Electrical Steels for Rotating Machines. In *Electrical Steels for Rotating Machines*. <https://doi.org/10.1049/pbpo037e>
- Di, C., Petrov, I., & Pyrhonen, J. J. (2019). Extraction of Rotor Eddy-Current Harmonic Losses in High-Speed Solid-Rotor Induction Machines by an Improved Virtual Permanent Magnet Harmonic Machine Model. *IEEE Access*, 7, 27746–27755. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2902240>
- Djaidir, B., Nail, B., & Rouibah, A. (2024). Fault Detection and Diagnosis of Squirrel Cage Asynchronous Motor Using a New Comsol Multiphysics Software 6.0. *Diagnostyka*, 25(1). <https://doi.org/10.29354/diag/176292>
- Gupta, A., MacHavaram, R., Kshatriya, T., & Ranjan, S. (2020). Multi-Objective Design Optimization of a Three Phase Squirrel Cage Induction Motor for Electric Propulsion System using Genetic Algorithm. *Proceedings of 2020 IEEE 1st International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control, STPEC 2020*, 0–5. <https://doi.org/10.1109/STPEC49749.2020.9297776>
- Masoumi, M., & Bilgin, B. (2024). Comparative Study on the Radial Force and Acoustic Noise Harmonics of an Interior Permanent Magnet, Induction, and Switched Reluctance Motor Drive. *IEEE Access*, 12(March), 49937–49946. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3385343>
- Musyaffa, I. F., & Medilla, K. (2019). Monitoring Motor Induksi Terhadap Temperatur dan Getaran Motor Menggunakan Arduino Uno. *Jurnal Teknik Elektro*, 1–10.
- Susanto, H., Munawir, A., & Darsan, H. (2021). Uji Kebisingan pada Motor Listrik dan Tabung Sentifugal Mesin Produksi Santan Kapasitas 10 Liter Per Jam. *Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi Dan Teknologi*, 7(1), 50. <https://doi.org/10.35308/jmkn.v7i1.3755>