

Rancang Bangun Sistem Magnetik *Bearing* Levitasi Untuk Peningkatan Efisiensi Motor Dc Dengan Menggunakan Metode *Halbach Array*

Raja Harahap, M. Zaki Iskandar Tarigan

Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara

Jl. Almamater, Kampus USU Medan 20155 INDONESIA

harahaprij@yahoo.com; zakiiskandar.tarigan@gmail.com

Abstrak

Bearing adalah elemen mesin yang berfungsi untuk menahan beban pada saat dua elemen mesin saling bergerak secara relatif. Setiap benda yang bergerak secara relatif pasti akan menimbulkan gesekan. Setiap gesekan yang terjadi pasti akan menimbulkan keausan yang akan mempengaruhi umur pemakaian dari elemen tersebut. Pada *bearing* konvensional bantalan bola digunakan untuk mengurangi kerugian gesekan sehingga dapat mengurangi rugi-rugi mekanik dan dapat memaksimalkan output bersih putaran pada motor DC. Teknologi magnetik *bearing* levitasi akan menghasilkan gaya angkat yang melayang pada rotor dengan memanfaatkan tolak-menolak kutub magnet. Koefisien gesek yang sangat rendah, selain itu bantalan magnet tidak memerlukan daya tambahan untuk sistem pengontrol dan tidak memerlukan suplai cairan pelumas atau pembuangan. Untuk mengantisipasi ketidakstabilan aksial, maka digunakan metode *Halbach array*, metode ini dapat menghasilkan peningkatan medan magnet di satu sisi array dengan membatalkan medan magnet di sisi lain hingga mendekati nol, metode ini akan menghasilkan pola magnetisasi yang berputar secara spasial. Pada penelitian ini, akan dilakukan rancang bangun magnetik *bearing* levitasi dengan menggunakan magnet permanen Neodymium N52 dengan metode *Halbach array* dalam konfigurasi magnet permanen. Berdasarkan hasil analisa pada penelitian ini penggunaan magnetik *bearing* levitasi dengan metode *Halbach array* dapat mengurangi rugi-rugi mekanik sehingga meningkatkan efisiensi motor DC sebesar 4,23% dan dapat menurunkan suhu motor DC saat beroperasi yaitu sebesar 1,78%.

Kata kunci : *Halbach Array, Bearing Magnetik, Efisiensi dan Rugi-rugi*

I. PENDAHULUAN

Pada sebuah motor induksi terdapat beberapa rugi-rugi yang ditimbulkan karena komponen yang menyusun motor DC, seperti komponen tembaga yang terdapat pada gulungan stator dan rotor. Komponen tersebut akan menimbulkan rugi-rugi seperti rugi-rugi tembaga, rugi-rugi pada inti besi, rugi-rugi mekanik seperti hambatan yang ditimbulkan karena gesekan dan angin. Rugi-rugi tembaga yang ditimbulkan sebanding dengan nilai $I^2.R$, di mana I merupakan arus yang mengalir pada belitan tembaga dan R merupakan besarnya nilai tahanan tembaga tersebut [1]. Sehingga semakin besar arus maka semakin besar rugi-rugi pada tembaga tersebut. Yang berarti semakin besar beban yang dikerjakan oleh sebuah motor, semakin besar arus yang mengalir dibelitan tembaga sehingga rugi-rugi tembaga pada motor tersebut akan menjadi besar. Sedangkan rugi-rugi mekanik pada umumnya disebabkan faktor mekanikal seperti hambatan dan gesekan seperti pada *bearing*[2].

Bearing adalah elemen mesin yang berfungsi untuk menahan beban pada saat dua elemen mesin saling bergerak secara relatif. Setiap benda yang bergerak secara relatif pasti akan menimbulkan gesekan. Setiap gesekan yang terjadi pasti akan menimbulkan keausan yang akan mempengaruhi umur pemakaian dari elemen tersebut. Besarnya keausan yang terjadi tergantung pada besarnya

koefisien gesek antara dua permukaan tersebut. Pada *bearing*, bagian yang berkontak dengan *ball bearing* adalah bagian *inner race* (bagian alur dalam) dan *outer race* (bagian alur luar)[3].

Gesekan yang terjadi antara bagian yang bergerak dari komponen mekanis mengakibatkan kehilangan sejumlah besar energi di dalam sistem, khususnya pada motor DC. Pada *bearing* konvensional bantalan bola digunakan untuk mengurangi kerugian gesekan sehingga dapat mengurangi rugi-rugi mekanik dan dapat memaksimalkan output bersih putaran pada motor DC. Untuk mengurangi rugi-rugi gesekan pada *bearing*, bantalan bola dapat diganti dengan menggunakan bantalan magnetik yang memanfaatkan teknologi levitasi magnetik sehingga dapat menghilangkan hampir semua rugi-rugi gesekan[4].

Teknologi magnetik *bearing* levitasi akan menghasilkan gaya angkat yang melayang pada rotor dengan memanfaatkan tolak-menolak kutub magnet[5].

Alasan utama penggunaan magnetik *bearing* levitasi adalah koefisien gesek yang sangat rendah, selain itu bantalan magnet tidak memerlukan daya tambahan untuk sistem pengontrol dan tidak memerlukan suplai cairan pelumas atau pembuangan. Akan tetapi, masalah yang terjadi pada teknologi magnetik *bearing* levitasi ialah stabilitasnya, enam derajat kebebasan bergerak

yang terjadi pada magnet permanen akan mengakibatkan ketidakstabilan aksial[6].

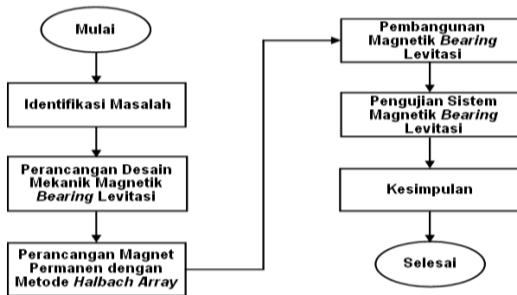
Penggunaan metode *Halbach array* adalah upaya untuk mengantisipasi ketidakstabilan aksial, metode ini dapat menghasilkan peningkatan medan magnet di satu sisi *array* dengan membatalkan medan magnet di sisi lain hingga mendekati nol, metode ini akan menghasilkan pola magnetisasi yang berputar secara spasial[7].

Pada penelitian ini, akan dilakukan rancang bangun magnetik *bearing* levitasi dengan menggunakan magnet permanen Neodymium N52, menggunakan metode *Halbach array* dalam konfigurasi magnet permanen sehingga dapat menghasilkan pemusatan medan magnet pada sisi *array* dan dapat mengatasi ketidakstabilan magnet yang diakibatkan oleh enam derajat kebebasan bergerak pada magnet permanen.

II. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Metode Penelitian

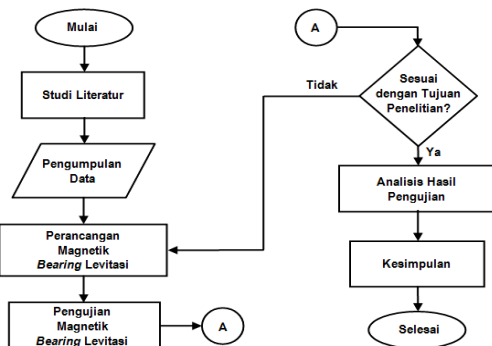
Adapun metode yang akan digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 1. Metode Penelitian

2.2 Diagram Alir Penelitian

Adapun tahapan-tahapan yang akan dilakukan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar diagram alir berikut.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

2.3 Metode Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan secara langsung, menggunakan sumber arus searah berupa *adjustable* adaptor 3 A, dengan mencari data-data yang dibutuhkan dalam menganalisa hasil dengan parameter uji sebagaimana terlihat pada Tabel 1.

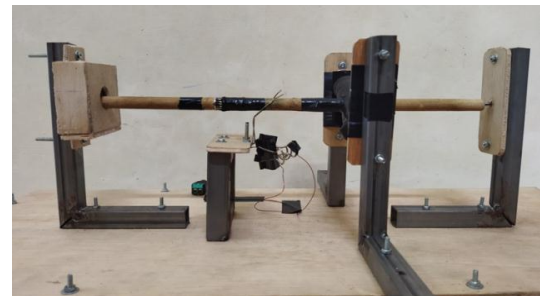
Tabel 1. Data yang Dibutuhkan dan Sumber Data

| Data yang Dibutuhkan | Sumber Data |
|----------------------|------------------------------|
| RPM Motor | Pengukuran Langsung |
| Arus Motor | Pengukuran Langsung |
| Suhu Motor | Pengukuran Langsung |
| Spesifikasi Komponen | Studi Literatur dan Internet |

III. HASIL DAN ANALISA

3.1 Implementasi Sistem

Berikut adalah implementasi sistem yang sudah dirancang bangun, dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Implementasi Sistem

3.2 Pengujian Sistem

3.2.1 Pengujian Kecepatan Putaran Motor DC dengan Magnetik *Bearing* Levitasi

Adapun hasil pengukuran kecepatan putaran dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Pengujian RPM Motor DC dengan Magnetik *Bearing* Levitasi

| No. | Tegangan (Volt) | Kecepatan Putaran Motor DC (RPM) | | | Rata-Rata (RPM) |
|-----|-----------------|----------------------------------|-------|-------|-----------------|
| | | Ke-1 | Ke-2 | Ke-3 | |
| 1 | 8 | 223,3 | 224,6 | 222,9 | 223,60 |
| 2 | 9 | 347,7 | 346,2 | 349,5 | 347,80 |
| 3 | 10 | 426,1 | 429,8 | 424,2 | 426,70 |
| 4 | 11 | 579,2 | 576,9 | 581,4 | 579,17 |

3.2.2 Pengujian Kecepatan Putaran Motor DC dengan *Bearing* Konvensional

Adapun hasil pengukuran kecepatan putaran dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Pengujian RPM Motor DC Dengan *Bearing* Konvensional

| No. | Tegangan (Volt) | Kecepatan Putaran Motor DC (RPM) | | | Rata- Rata (RPM) |
|-----|-----------------|----------------------------------|-------|-------|------------------|
| | | Ke-1 | Ke-2 | Ke-3 | |
| 1 | 8 | 205,4 | 207,1 | 204,4 | 205,64 |
| 2 | 9 | 325,3 | 326,1 | 325,7 | 325,70 |
| 3 | 10 | 400,8 | 402,4 | 403,2 | 402,13 |
| 4 | 11 | 551,5 | 549,6 | 553,3 | 551,47 |

3.2.3 Pengujian Arus Motor DC dengan Magnetik Bearing Levitasi

Adapun hasil pengukuran arus dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Pengujian Arus Motor DC dengan Magnetik Bearing Levitasi

| No. | Tegangan (Volt) | Arus Motor DC (Ampere) | | | Rata-Rata (Ampere) |
|-----|-----------------|------------------------|------|------|--------------------|
| | | Ke-1 | Ke-2 | Ke-3 | |
| 1 | 8 | 1,42 | 1,44 | 1,41 | 1,42 |
| 2 | 9 | 1,60 | 1,64 | 1,63 | 1,62 |
| 3 | 10 | 1,84 | 1,80 | 1,85 | 1,83 |
| 4 | 11 | 2,01 | 2,06 | 2,03 | 2,03 |

3.2.4 Pengujian Arus Motor DC dengan Bearing Konvensional

Adapun hasil pengukuran arus dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Pengujian Arus Motor DC dengan Bearing Konvensional

| No. | Tegangan (Volt) | Arus Motor DC (Ampere) | | | Rata-Rata (Ampere) |
|-----|-----------------|------------------------|------|------|--------------------|
| | | Ke-1 | Ke-2 | Ke-3 | |
| 1 | 8 | 1,40 | 1,37 | 1,37 | 1,38 |
| 2 | 9 | 1,56 | 1,59 | 1,57 | 1,57 |
| 3 | 10 | 1,78 | 1,76 | 1,74 | 1,76 |
| 4 | 11 | 1,86 | 1,94 | 1,90 | 1,90 |

3.2.5 Pengujian Suhu Motor DC dengan Magnetik Bearing Levitasi

Adapun hasil pengukuran suhu dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Pengujian Suhu Motor DC dengan Magnetik Bearing Levitasi

| No. | Tegangan (Volt) | Suhu (°C) | | | Rata-Rata (°C) |
|-----|-----------------|-----------|-------|-------|----------------|
| | | Ke-1 | Ke-2 | Ke-3 | |
| 1 | 8 | 36,82 | 37,02 | 36,53 | 36,79 |
| 2 | 9 | 51,76 | 52,03 | 50,93 | 51,57 |
| 3 | 10 | 68,06 | 67,86 | 68,61 | 68,18 |
| 4 | 11 | 82,46 | 82,64 | 81,97 | 82,36 |

3.2.6 Pengujian Suhu Motor DC dengan Bearing Konvensional

Adapun hasil pengukuran suhu dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Pengujian Suhu Motor DC Dengan Bearing Konvensional

| No. | Tegangan (Volt) | Suhu (°C) | | | Rata-Rata (°C) |
|-----|-----------------|-----------|-------|-------|----------------|
| | | Ke-1 | Ke-2 | Ke-3 | |
| 1 | 8 | 37,12 | 38,76 | 37,03 | 37,64 |
| 2 | 9 | 52,45 | 53,56 | 51,98 | 52,66 |
| 3 | 10 | 69,65 | 68,96 | 69,12 | 69,24 |
| 4 | 11 | 84,03 | 83,87 | 82,36 | 83,42 |

3.3 Analisa Persentase Penurunan Suhu Motor DC

Hasil perhitungan persentase penurunan suhu motor DC dengan menggunakan magnetik bearing levitasi dan bearing konvensional diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\% \text{ Penurunan} = \frac{(T_1 - T_0)}{T_1} \times 100\% \quad (1)$$

Keterangan:

T₀ = Suhu motor DC dengan magnetik bearing levitasi

T₁ = Suhu motor DC dengan bearing konvensional

Untuk tegangan input 8 Volt:

$$\% \text{ Penurunan} = \frac{(T_1 - T_0)}{T_1} \times 100\%$$

$$\% \text{ Penurunan} = \frac{(37,64 - 36,79)}{37,64} \times 100\%$$

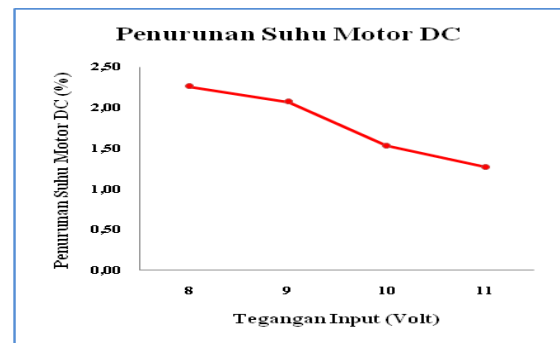
$$\% \text{ Penurunan} = 2,26\%$$

Dengan cara yang sama dilakukan penghitungan pada tegangan input 9 Volt, 10 Volt dan 11 Volt, sehingga diperoleh hasil sebagaimana terlihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Tabulasi Persentase Penurunan Suhu Motor DC

| No. | Tegangan (Volt) | T ₁ (°C) | T ₀ (°C) | Penurunan Suhu Motor DC (%) |
|-----|-----------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|
| 1 | 8 | 37,64 | 36,79 | 2,26 |
| 2 | 9 | 52,66 | 51,57 | 2,07 |
| 3 | 10 | 69,24 | 68,18 | 1,53 |
| 4 | 11 | 83,42 | 82,36 | 1,27 |

Adapun grafik persentase penurunan suhu motor DC antara penggunaan magnetik bearing levitasi dan bearing konvensional dapat dilihat pada Gambar 4 berikut.



Gambar 4. Grafik Penurunan Suhu Motor DC

3.4 Analisa Daya Motor DC

Data yang dibutuhkan pada analisa ini ialah data tegangan dan data arus motor DC yang digunakan untuk menghitung daya, menggunakan persamaan:

$$P = V \times I \tag{2}$$

Keterangan:

P = Daya Listrik (Watt)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

Akan dijabarkan terlebih dahulu analisa daya masukan motor DC dengan tegangan *input* dari adaptor sebesar 8 Volt.

$$P = V \times I$$

$$P = 8 \times 3$$

$$P = 24 \text{ Watt}$$

Dengan cara yang sama, dilakukan penghitungan pada tegangan input 9 Volt, 10 Volt dan 11 Volt, sehingga diperoleh hasil sebagaimana terlihat pada Tabel 9.

Tabel 9. Daya Masukan Motor DC

| No. | Tegangan (Volt) | Arus Adaptor (Ampere) | Daya Masukan Motor DC (Watt) |
|-----|-----------------|-----------------------|------------------------------|
| 1 | 8 | 3 | 24 |
| 2 | 9 | 3 | 27 |
| 3 | 10 | 3 | 30 |
| 4 | 11 | 3 | 33 |

3.4.1 Daya Motor DC dengan Menggunakan Magnetik Bearing Levitasi

Adapun daya motor DC dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut.

$$P = V \times I$$

Untuk tegangan *input* 8 Volt

$$P = 8 \times 1,42$$

$$P = 11,36 \text{ Watt}$$

Dengan cara yang sama, dilakukan penghitungan pada tegangan *input* 9 Volt, 10 Volt dan 11 Volt, sehingga diperoleh hasil sebagaimana terlihat pada Tabel 10.

Tabel 10. Daya Keluaran Motor DC dengan Magnetik Bearing Levitasi

| No. | Tegangan (Volt) | Kecepatan Motor (RPM) | Daya Keluaran Motor DC (Watt) |
|-----|-----------------|-----------------------|-------------------------------|
| 1 | 8 | 223,60 | 11,36 |
| 2 | 9 | 347,80 | 14,58 |
| 3 | 10 | 426,70 | 18,30 |
| 4 | 11 | 579,17 | 22,33 |

3.4.2 Daya Motor DC dengan Menggunakan Bearing Konvensional

Dengan cara yang sama seperti pada penggunaan magnetik *bearing* levitasi, maka untuk penggunaan *bearing* konvensional diperoleh hasil perhitungan sebagaimana terlihat pada Tabel 11.

Tabel 11. Daya Keluaran Motor DC dengan Bearing Konvensional

| No. | Tegangan (Volt) | Kecepatan Motor (RPM) | Daya Keluaran Motor DC (Watt) |
|-----|-----------------|-----------------------|-------------------------------|
| 1 | 8 | 205,63 | 11,04 |
| 2 | 9 | 325,70 | 14,13 |
| 3 | 10 | 402,13 | 17,60 |
| 4 | 11 | 551,47 | 20,90 |

3.5 Analisa Efisiensi Sistem

Pada penelitian ini akan dilakukan analisa efisiensi motor DC pada rancang bangun motor DC dengan menggunakan magnetik *bearing* levitasi dan *bearing* konvensional.

Perhitungan efisiensi motor DC dengan menggunakan persamaan berikut.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \tag{3}$$

Keterangan:

η = Efisiensi Motor (%)

P_{out} = Daya Keluaran Motor (Watt)

P_{in} = Daya Masukan Motor (Watt)

3.5.1 Efisiensi Motor DC dengan Magnetik Bearing Levitasi

Adapun efisiensi motor DC dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

Untuk tegangan *input* 8 Volt

$$\eta = \frac{11,36}{24} \times 100\%$$

$$\eta = 47,33\%$$

Setelah melakukan perhitungan untuk tegangan *input* 8 Volt, 9 Volt, 10 Volt, dan 11 Volt, maka dilakukan perangkuman data hasil analisa efisiensi motor DC dengan menggunakan magnetik *bearing* levitasi. Adapun tabulasi data hasil analisa efisiensi motor DC dapat dilihat pada Tabel 12.

Tabel 12. Efisiensi Motor DC dengan Magnetik Bearing Levitasi

| No. | Tegangan (Volt) | Daya Masukan (Watt) | Daya Keluaran (Watt) | Efisiensi (%) |
|-----|-----------------|---------------------|----------------------|---------------|
| 1 | 8 | 24 | 11,36 | 47,33 |
| 2 | 9 | 27 | 14,58 | 54 |
| 3 | 10 | 30 | 18,30 | 61 |
| 4 | 11 | 33 | 22,33 | 67,67 |

3.5.2 Efisiensi Motor DC dengan Bearing Konvensional

Dengan cara yang sama seperti pada penggunaan magnetik *bearing* levitasi, maka untuk penggunaan *bearing* konvensional diperoleh hasil perhitungan sebagaimana terlihat pada Tabel 13.

Tabel 13. Efisiensi Motor DC dengan Bearing Konvensional

| No. | Tegangan (Volt) | Daya Masukan (Watt) | Daya Keluaran (Watt) | Efisiensi (%) |
|-----|-----------------|---------------------|----------------------|---------------|
| 1 | 8 | 24 | 11,04 | 46 |
| 2 | 9 | 27 | 14,13 | 52,33 |
| 3 | 10 | 30 | 17,60 | 58,67 |
| 4 | 11 | 33 | 20,90 | 63,33 |

3.6 Perbandingan Performa Sistem

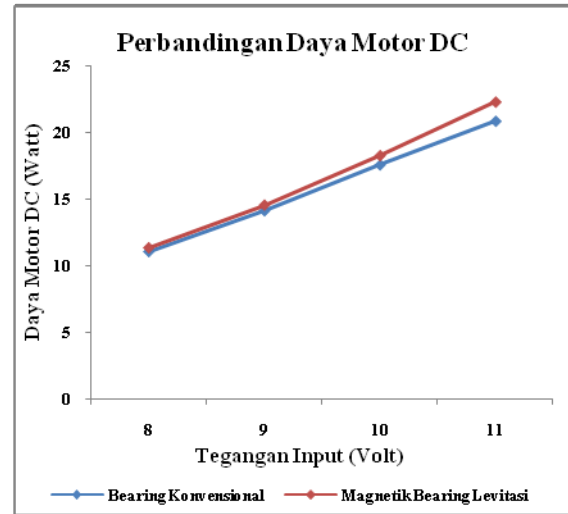
Perhitungan peningkatan performa diperoleh dengan membandingkan antara penggunaan magnetik *bearing* levitasi dan *bearing* konvensional, meliputi peningkatan daya motor DC dan peningkatan efisiensi motor. Dari sini akan terlihat, apakah penggunaan magnetik *bearing* levitasi akan meningkatkan daya dan efisiensi motor DC bila dibandingkan dengan penggunaan *bearing* konvensional.

3.6.1 Peningkatan Daya Motor DC

Untuk menganalisa peningkatan daya motor DC antara penggunaan magnetik *bearing* levitasi dan *bearing* konvensional, dilakukan melalui komparasi terhadap keduanya, yaitu antara penggunaan magnetik *bearing* levitasi dan *bearing* konvensional.

Dengan membandingkan performa masing-masing antara magnetik *bearing* levitasi (Tabel 12) dan *bearing* konvensional (Tabel 13), terlihat adanya peningkatan performa setelah penggunaan magnetik *bearing* levitasi.

Adapun grafik perbandingan daya motor DC antara penggunaan magnetik *bearing* levitasi dan *bearing* konvensional dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik Perbandingan Daya Motor DC

3.6.2 Persentase Peningkatan Efisiensi Motor DC

Untuk melakukan analisa persentase peningkatan efisiensi motor DC, setelah mengganti pemakaian *bearing* konvensional dengan magnetik *bearing* levitasi, digunakan persamaan berikut.

$$\% \text{ Peningkatan} = \frac{(\eta_0 - \eta_1)}{\eta_1} \times 100\% \quad (4)$$

Keterangan:

- η_0 = Efisiensi dengan magnetik *bearing* levitasi
- η_1 = Efisiensi dengan *bearing* konvensional

Dengan menggunakan persamaan di atas dapat dianalisa persentase peningkatan efisiensi motor DC setelah menggunakan magnetik *bearing* levitasi. Adapun persentase peningkatan efisiensi motor DC dapat dilihat pada penjabaran berikut.

$$\% \text{ Peningkatan} = \frac{(\eta_0 - \eta_1)}{\eta_1} \times 100\%$$

Untuk tegangan *input* 8 Volt

$$\% \text{ Peningkatan} = \frac{(47,33 - 46)}{46} \times 100\%$$

$$\% \text{ Peningkatan} = 2,90\%$$

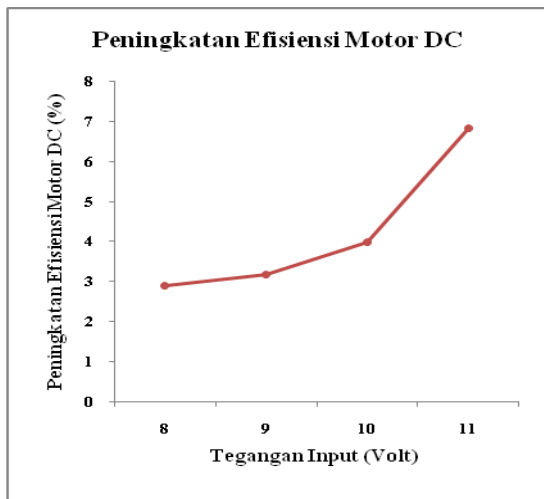
Setelah melakukan perhitungan untuk tegangan *input* 8 Volt, 9 Volt, 10 Volt dan 11 Volt, diperoleh rangkuman data persentase peningkatan efisiensi motor DC setelah penggantian *bearing* konvensional dengan magnetik *bearing* levitasi dalam bentuk tabulasi data persentase peningkatan efisiensi motor DC seperti terlihat pada Tabel 14.

Tabel 14. Tabulasi Persentase Peningkatan Efisiensi Motor DC

| No. | Tegangan (Volt) | Efisiensi dengan Bearing Konvensional (%) | Efisiensi dengan Magnetik Bearing Levitasi (%) | Peningkatan Efisiensi (%) |
|-----|-----------------|---|--|---------------------------|
| 1 | 8 | 46 | 47,33 | 2,90 |
| 2 | 9 | 52,33 | 54 | 3,18 |
| 3 | 10 | 58,67 | 61 | 3,98 |
| 4 | 11 | 63,33 | 67,67 | 6,84 |

Berdasarkan hasil perhitungan persentase peningkatan efisiensi motor DC tersebut di atas, disimpulkan bahwa terjadi peningkatan efisiensi motor DC rata-rata sebesar 4,23% pada penggunaan magnetik *bearing* levitasi, setelah sebelumnya menggunakan *bearing* konvensional.

Adapun grafik persentase peningkatan efisiensi motor DC dapat dilihat pada Gambar 6.

**Gambar 6. Grafik Persentase Peningkatan Efisiensi Motor DC**

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan pada penelitian ini dapat dilihat pada penjabaran berikut.

1. Berdasarkan hasil analisa pada penelitian ini, penggunaan magnetik *bearing* levitasi dengan metode *Halbach array* dapat mengurangi rugi-rugi mekanik sehingga meningkatkan efisiensi motor DC rata-rata sebesar 4,23% bila dibandingkan dengan penggunaan *bearing* konvensional, yang ditandai dengan peningkatan kecepatan putaran motor DC setelah menggunakan magnetik *bearing* levitasi dengan metode penyusunan *Halbach array*.
2. Berdasarkan hasil analisa pada penelitian ini, penggunaan magnetik *bearing* levitasi dengan metode *Halbach array* dapat menurunkan suhu motor DC saat beroperasi yaitu rata-rata sebesar 1,78%.

4.2 Saran

Untuk kegiatan penelitian berikutnya diharapkan dapat menganalisa lebih lanjut tentang kemampuan daya angkat magnet terhadap rotor dan dapat menganalisa rugi-rugi lain yang paling sesuai dalam kebutuhan medan pengujian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. R. Hemenway, H. Gjerdal, and E. L. Severson, 2019, *Magnetic Bearing Technology for Industrial Bearingless Motor Systems*,” *Proc. of the 2019 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)*, Vol.1, pp. 51-58.
- [2] E. Ramirez-Laboreo, M. G. Roes, and C. Sagues, 2019, *Hybrid Dynamical Model for Reluctance Actuators Including Saturation, Hysteresis, and Eddy Currents*,” *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol.24, No.3, pp. 1396-1406.
- [3] E. Csencsics, J. Schlarp, T. Schopf, and G. Schitter, 2019, *Compact High Performance Hybrid Reluctance Actuated Fast Steering Mirror System*,” *Mechatronics*, Vol.62, 102251.
- [4] X. Lu, 2021, *Displacement Devices, Moveable Stages for Displacement Devices and Methods for Fabrication, Use and Control of Same*,” *US Patent 10,958,148*, March 23.
- [5] A. Goos and R. Gloess, 2020, *Sensor Array and Algorithms for Current Control in a 6-DOF Magnetic Levitation Actuator*,” *Proc. of the 16th Int. Conf. on New Actuators (ACTUATOR 2018)*, pp. 1-4, 2018.
- [6] A. Goos, R. Ehrle, D. Geissler, and R. Gloess, 2020, *Magnetic Levitated Linear Scan Module with Nanometer Resolution*,” *Proc. 35th Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering*, pp. 58-62..
- [7] J. Y. Yoon, L. Zhou, and D. L. Trumper, 2019, *Linear Stages for Next Generation Precision Motion Systems*,” *Proc. of the 2019 IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, pp. 241- 247.
- [8] L. Zhou and D. L. Trumper, 2020, *Magnetically Levitated Linear Stage with Linear Bearingless Slice Hysteresis Motors*,” *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol.26, No.2, pp. 1084-1094.
- [9] H. Zhu, T. J. Teo, and C. K. Pang, 2019, *Magnetically Levitated Parallel Actuated Dual-Stage (Maglev-PAD) System for Six-axis Precision Positioning*,” *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol.24, No.4, pp. 1829-1838.
- [10] M. Takahashi, H. Ogawa, and T. Kato, 2020, *Compact Maglev Stage System for Nanometer-scale Positioning*,” *Precision Engineering*, Vol.66, pp. 519-530, 2020.

- [11] A. Delissen, D. Laro, H. Kleijnen, F. v. Keulen, and M. Langelaar, 2020, *High-precision Motion System Design by Topology Optimization Considering Additive Manufacturing*,” Proc. of the 20th Int. Conf. of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (euspen 2020), pp. 257-258.
- [12] I. Heyman and L. Zhou, 2021, *Magnetically Levitated XYZ Nanopositioning Sample Stage for X-ray Microscopes*,” Proc. of the 36th Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering.
- [13] A. Anthis, D. Trumper, and T. Hamer, 2021, *Design and Verification of a Planar, Flux-Steering Magnetic Actuator*, Proc. of the 36th ASPE Annual Meeting.
- [14] R. Gloess and A. Goos, 2020, *Magnetic Levitation Stages for Planar and Linear Scan Application with Nanometer Resolution*,” *Int. J. of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol.63, No.1, pp. 105-117, 2020.
- [15] X. Li, H. Zhu, J. Ma, T. J. Teo, C. S. Teo, M. Tomizuka, and T. H. Lee, 2020, *Data-driven Multiobjective Controller Optimization for a Magnetically Levitated Nanopositioning System*, *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol.25, No.4, pp. 1961-1970.
- [16] R. Baade, 2020, *Linear, Low-mass, Low-cost: Wafer-handler Systems Engineering and Magnetic Bearing Design*,” *Mikroniek*.
- [17] J. Y. Yoon, J. H. Lang, and D. L. Trumper, 2019, *Double-sided Linear Iron-core Fine-tooth Motor for Low Acoustic Noise and High Acceleration*, *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol.24, No.5, pp. 2161-2170.
- [18] H. B. Koolmees and J. P. M. B. Vermeulen, 2021, *Assembly Comprising a Cryostat and Layer of Superconducting Coils and Motor System Provided with such an Assembly*,” *US Patent 15/734,882*, July 22.
- [19] J. Wang, M. Zhang, Y. Zhu, K. Yang, X. Li, L. Wang, J. Hu, and C. Hu, 2019, *Integrated Optimization of 3D Structural Topology and Actuator Configuration for Vibration Control in Ultra-precision Motion Systems*,” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol.60, No.3, pp. 909-925.
- [20] J. Wu and L. Zhou, 2022, *Control Co-design of Actively Controlled Lightweight Structures for High-acceleration Precision Motion Systems*,” Proc. of the 2022 American Control Conf. (ACC).