

PENGARUH VARIASI PENAMBAHAN LAPISAN MAGNET DAN JARAK CELAH UDARA ROTOR TERHADAP KINERJA MOTOR DC MAGNET PERMANEN

Sri Kurniati^{1*}, Sudirman Syam²

^{1,2}Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana, Kupang,

Nusa Tenggara Timur, Indonesia

¹sri_kurniati@staf.undana.ac.id

²sudirman_s@staf.undana.ac.id

Abstract—A rectangular NdFeB permanent magnet DC motor design has been made and tested experimentally. The use of rectangular permanent magnet rotor teeth made in layers aims to increase the torque of the DC motor. Measurement and testing of DC motor force and torque using a spring balance. In addition, the adjustment of the air gap and the addition of a magnetic layer were carried out to determine the performance of a DC motor with varying rotation. This DC motor design has eight poles with 150 turns per coil and an arrangement of 1-4 layers of permanent magnets with an air gap of 1-4 mm. The results showed that the more layers of permanent magnets with a smaller rotor and stator magnetic air gap, the greater the torque. In measuring the motor's torque with four layers of permanent magnets for an air gap of 1 mm with a field voltage of 50 Volts, the electrical-torque is 0.6910 N-m, and the mechanical-torque is 0.027 N-m at a speed of 780 Rpm. Then at a voltage of 60 Volts with the same air gap distance, an electrical-torque of 0.085 N-m is obtained and a mechanical-torque of 0.0293 with a speed of 860 rpm.

Keywords—NdFeB Magnet, Electrical-torque, Mechanical-torque, Rotation

Intisari—Sebuah desain motor DC magnet permanen NdFeB persegi panjang telah dibuat dan diuji secara eksperimental. Penggunaan gigi rotor magnet permanen persegi panjang dibuat secara berlapis bertujuan untuk meningkatkan torsi motor DC. Pengukuran dan pengujian gaya dan torsi motor DC menggunakan sebuah neraca pegas. Selain itu, pengaturan jarak celah udara dan penambahan lapisan magnet dilakukan untuk mengetahui kinerja motor DC magnet permanen dengan putaran yang bervariasi. Desain motor DC magnet permanen ini memiliki 8 kutub dengan 150 lilitan per kumparan dan susunan 1 - 4 lapisan magnet permanen dengan jarak celah udara dari 1 - 4 mm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin banyak susunan lapisan magnet permanen dengan jarak celah udara magnet rotor dan stator yang semakin kecil akan menghasilkan torsi yang semakin besar. Pada pengukuran torsi motor dengan 4 lapisan magnet permanen untuk jarak celah udara 1 mm dengan tegangan medan 50 Volt diperoleh torsi listrik 0,6910 N-m, torsi mekanis 0,027 N-m dengan kecepatan putaran 780 rpm. Kemudian pada tegangan 60 Volt dengan jarak celah udara 1 mm diperoleh torsi listrik 0,0853 N-m dan torsi mekanis 0,02925 dengan kecepatan putaran 860 rpm.

Kata Kunci—Magnet NdFeB, Torsi-listrik, Torsi-mekanis, Putaran

I. PENDAHULUAN

Motor magnet permanen pertama kali ditemukan dan dipatenkan oleh Howard Johnson di Tahun 1980-an. Prinsip kerjanya berdasarkan gaya tolak menolak magnet sejenis yang dipasang pada rotor dan stator. Gaya tolak inilah yang akan diubah menjadi energi putar. Konstruksi utama dari motor magnet permanen terdiri dari rotor dan stator. Rotor memiliki sumbu putar yang memungkinkan bagian ini berputar karena daya dorong yang didapatkan dari gaya tolak menolak magnet yang ada di kedua bagian utama motor magnet permanen tersebut [1].

Pengembangan bahan magnet baru dengan kerapatan energi tinggi dan koersivitas tinggi telah meningkatkan desain motor magnet permanen. Magnet kerapatan energi tinggi memungkinkan peningkatan celah udara tanpa pengurangan kepadatan medan magnet di celah udara. Hal ini juga menyebabkan peningkatan minat penelitian pada motor sinkron magnet permanen tanpa slot untuk aplikasi kinerja tinggi. Menurut [2], konfigurasi tanpa slot memiliki beberapa keuntungan dibandingkan dengan mesin berinti besi seperti, tidak ada torsi cogging, tidak ada saturasi besi pada gigi stator, dan tidak ada rugi-rugi inti rotor sehingga dapat mengurangi rugi-rugi inti secara signifikan.

Saat ini, telah banyak dikembangkan motor DC magnet seperti magnet permanen jenis NdFeB yang menghasilkan rugi yang rendah sehingga menghasilkan kinerja motor magnet yang tinggi. Magnet NdFeB memiliki sifat magnet yang sangat baik seperti pada nilai induksi remanen, koersivitas dan energi produk yang lebih tinggi pula dibandingkan dengan magnet permanen lain [3, 4]. Dengan memiliki sifat magnetik yang tinggi, dalam aplikasinya magnet NdFeB dapat berukuran lebih kecil. Karakteristik bahan tersebut memungkinkan untuk dapat dimanfaatkan sebagai salah satu alternatif desain motor yang lebih efektif dan efisien [5, 6].

Akan tetapi, walaupun material magnet permanen dan desain motor magnet telah mengalami perkembangan yang pesat, terdapat beberapa parameter yang mempengaruhi kinerja motor DC tersebut. Salah satu diantaranya adalah jarak celah udara magnet rotor-stator. Rotor motor dapat berputar akibat adanya gaya dorong tarik menarik antara magnet stator dan magnet rotor pada posisi dan jarak tertentu antara keduanya. Hubungan gaya dorong rotor mempunyai torsi terhadap jarak antara magnet rotor-stator adalah berbanding terbalik, sedangkan hubungan antara

gaya dorong dan torsi terhadap posisi sudut magnet berbanding lurus. Hal ini menunjukkan bahwa adanya hubungan antara putaran motor dan jarak antara magnet rotor-stator, sudut yang dibentuk oleh kedua magnet dan jumlah pasang magnet yang digunakan [1]. Selain itu, nilai fluks magnet juga turut berperan penting dalam meningkatkan torsi motor. Hal ini telah dianalisis menggunakan metode elemen hingga atau *Finite Element Method* (FEM) oleh [7].

Berkaitan dengan itu, beberapa studi lainnya menjelaskan bahwa salah satu teknik untuk meningkatkan torsi magnet permanen adalah dengan menggunakan segmen magnet permanen yang disusun secara berlapis. Dengan memasang magnet permanen secara berlapis sama dengan menghubungkan magnet secara paralel. Dalam teori rangkaian magnet terdapat kesamaan dalam rangkaian listrik. Sifat rangkaian magnet yang disusun secara paralel sama dengan menghubungkan tahanan paralel dalam rangkaian listrik. Artinya, apabila rangkaian magnet disusun secara paralel sama dengan menurunkan nilai reluktansi yang berbanding terbalik dengan nilai flux. Menurut [8] apabila nilai reluktansi rendah maka, nilai flux akan menjadi lebih tinggi dan dapat meningkatkan torsi dari motor. Oleh karena itu, tujuan dari paper ini adalah untuk mengetahui pengaruh penambahan lapisan magnet dan jarak celah udara antara rotor dan stator terhadap kinerja motor magnet permanen.

II. LANDASAN TEORI

A. Motor DC Magnet Permanen

Motor DC magnet permanen dapat didefinisikan sebagai motor yang mencakup kutub magnet permanen. Motor DC ini terdiri dari dua bagian yaitu stator dan rotor. Stator adalah bagian yang diam dan rotor adalah bagian yang ikut berputar. Pada motor ini, magnet dapat digunakan untuk membuat fluks bekerja di dalam celah udara di tempat gulungan medan. Rotor motor DC magnet permanen termasuk inti angker dinamo, komutator, dan belitan angker dinamo. Fungsi utama dari belitan medan adalah untuk menghasilkan fluks magnetic yang berfungsi didalam celah udara serta *wound* pada stator motor sementara belitan dinamo dapat memutar rotor.

- Rotor

Rotor pada motor ini berbentuk disk atau piringan yang bisa dibuat dari berbagai macam jenis bahan. Pada bagian rotor inilah ditempatkan magnet permanen yang berfungsi sebagai kumparan medannya. Rotor pada generator ini merupakan bagian yang dapat berputar.

- Stator

Stator merupakan bagian yang diam, pada dasarnya stator merupakan tempat dibangkitkan ggl induksi pada medan magnet pada motor magnet permanen. Rangkaian medan yang berfungsi untuk menghasilkan fluksi utama dibentuk dari kumparan pada setiap kutub. Pada aplikasinya rangkaian medan dapat dihubungkan dengan kumparan jangkar baik seri maupun paralel dan juga dihubungkan tersendiri langsung kepada sumber tegangan sesuai dengan jenis penguatan pada motor. Untuk menghitung banyak lilitan (N) pada kumparan dapat dihitung dengan rumus:

- Langkah pertama, dilakukan perhitungan fluks magnet maksimal dengan menggunakan persamaan (1):

$$B_{max} = B_r \frac{l_m}{l_m + \delta} \quad (1)$$

dimana:

B_r = kerapatan fluks (T)

δ = lebar celah udara (m)

l_m = tinggi magnet (m)

B_{max} = fluks magnet maksimal (T)

- Selain itu, juga dihitung luasan magnet menggunakan persamaan (2):

$$A_m = \frac{\pi (r_0^2 - r_i^2) - rf (r_0 - r_i) N_m}{N_m} \quad (2)$$

dimana:

A_m = luasan magnet (m^2)

r_0 = radius luar magnet (m)

r_i = radius dalam magnet (m)

N_m = jumlah magnet

rf = jarak antar kutub magnet (m)

- Dari persamaan (1) dan (2) dapat dihitung nilai fluks maksimal menggunakan persamaan (3):

$$\phi_{max} = A_m \times B_{max} \quad (3)$$

dimana:

A_m = luasan magnet (m^2)

B_{max} = Fluks magnet maksimal (T)

ϕ_{max} = Fluks maksimum (Wb)

- Selanjutnya, untuk jumlah lilitan pada stator generator digunakan persamaan (4) dan (5):

$$N = \frac{E}{4,44 \times f \times K_{w1} \times \Phi} \quad (4)$$

- Jumlah lilitan disetiap kutub kumparan:

$$= \frac{N}{\text{jumlah kumparan}} \quad (5)$$

dimana :

N = jumlah lilitan

E = tegangan fasa (volt)

f = frekuensi (Hz)

K_{w1} = faktor belitan (0,8)

Φ = fluks magnet (Wb)

- Celah Udara

Celah udara atau *air gap* merupakan bagian celah yang terdapat di antara rotor dan stator, dimana tempat ini merupakan tempat berpindahnya fluks magnet dan menginduksi kumparan atau lilitan kawat pada stator. Besarnya celah udara ini mempengaruhi penginduksian ke kumparan stator.

- Komutator

Untuk memperoleh tegangan searah diperlukan alat penyearah yang disebut komutator dan sikat. Komutator terdiri dari sejumlah segmen tembaga yang berbentuk lempengan-lempengan yang dirakit ke dalam silinder yang terpasang pada poros. Setiap lempengan atau segmen-segmen komutator terisolasi dengan baik antara satu sama lainnya. Kegunaannya adalah untuk membalikan arah arus listrik dalam kumparan motor DC dan juga membantu dalam transmisi arus antara kumparan motor DC dan sumber daya.

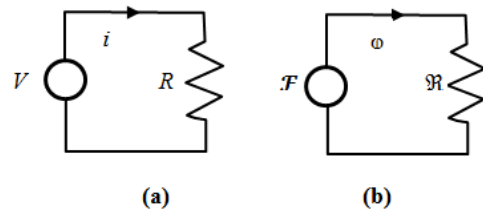
- Sikat

Sikat-sikat ini berfungsi sebagai jembatan bagi aliran arus ke kumparan jangkar. Dimana permukaan sikat ditekan ke permukaan segmen komutator untuk menyalurkan arus listrik. Besarnya tekanan pegas dapat diatur sesuai dengan keinginan. Disamping itu sikat memegang peranan penting untuk terjadinya komutasi. Karbon yang ada diusahakan memiliki konduktivitas yang tinggi untuk mengurangi rugi-rugi listrik. Agar gesekan antar komutator-komutator dan sikat tidak mengakibatkan arusnya komutator. Maka sikat harus lebih lunak dari pada komutator.

B. Analogi Rangkaian Magnet dan Rangkaian Listrik

Gambar 1 memperlihatkan ekivalen dari "rangkaiannya listrik" dan "rangkaiannya magnet" yang merupakan salah satu metode pendekatan yang dapat digunakan untuk membantu memberikan gambaran umum tentang fenomena magnet. Diagram rangkaian ini, tampak bahwa "sirkuit listrik" dan "sirkuit magnetik" adalah setara/sama.

Oleh karena itu hubungan secara matematis dari kedua rangkaian juga sama.



Gambar 1. (a) Ekivalen Rangkaian Listrik dan (b) Analogi Rangkaian Magnet

Berdasarkan Gambar 1, ada beberapa kesamaan / kesetaraan parameter antara rangkaian listrik dan sirkuit magnetik seperti yang diberikan dalam Tabel 1.

Table 1. Analogi Kuantitas Rangkaian Listrik dan Rangkaian Magnet

Rangkaian Listrik	Satuan	Rangkaian Magnet	Satuan
Tegangan (v)	Volt	Gaya Gerak Magnet ($F = Ni$)	Amp-turns
Arus (i)	Ampere	Fluks Magnet (ϕ)	Webers Wb
Tahanan (R)	Ohm	Reluktans (\mathfrak{R})	Amp-turns/Wb
Konduktivitas ($1/\rho$)	Mho	Permeabilitas (μ)	Wb/A-t-m
Kerapatan Arus (J)	A/m ²	Kerapatan Fluks Magnet (B)	Wb/m ² = teslas T
Medan Listrik (E)	Newton/Coulomb (N/C)	Intensitas medan Magnet (H)	Amp-turn/m

Persamaan (1) identik dengan Hukum Ohm:

$$I = \frac{V}{R} \tag{1}$$

Untuk rangkaian magnetik, efek yang diinginkan adalah fluks (ϕ), sedangkan penyebab gaya magnet (\mathcal{F}) adalah gaya luar (tekanan) yang diperlukan untuk menentukan garis fluks magnet dalam material magnetik. Resistansi terhadap penentuan fluks (ϕ) adalah reluktansi (\mathfrak{R}), sehingga nilai persamaan di atas diberikan oleh:

$$\phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathfrak{R}} \tag{2}$$

Selanjutnya, dengan menggunakan analogi "penyebab" hukum tegangan Kirchhoff, persamaan dapat diperoleh:

$$\sum_0 \mathcal{F} = 0 \text{ (Untuk rangkaian listrik)} \tag{3}$$

Persamaan ini menyatakan bahwa jumlah kenaikan aljabar dan penurunan gaya gerak magnetik di sekitar loop tertutup pada sirkuit magnetik adalah nol. Dengan demikian, jumlah peningkatan gaya magnet sama dengan jumlah penurunan gaya magnet di sekitar loop tertutup. Kondisi ini dinyatakan dalam suatu persamaan yang disebut Hukum Rangkaian Ampere. Jika persamaan ini diterapkan pada rangkaian magnetik, maka gaya gerak magnet dilambangkan dengan:

$$\mathcal{F} = NI \text{ (At)} \tag{4}$$

III. METODE PENELITIAN

A. Alat Penelitian

Alat penelitian yang digunakan untuk melakukan pengujian desain pada Motor DC Magnet Permanen sebagai berikut:

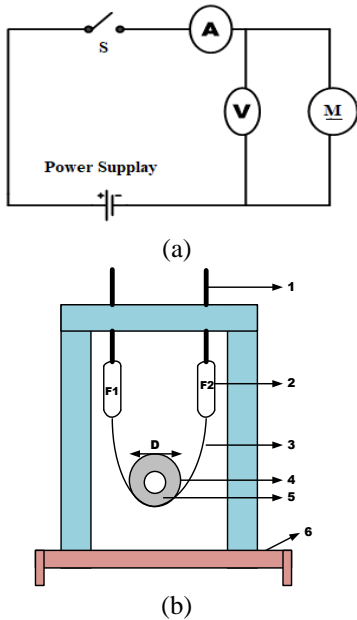
- Multimeter
- Teslameter
- Tachometer
- Spring balance (Neraca pegas)
- Power suplay (Regulator DC)

B. Bahan yang digunakan

- Seperangkat lapisan magnet jenis NdFeB dengan ukuran 10 mm x 20 mm x 1 mm.
- Dua piringan akrilik
- Belitan kumparan stator
- Capacitor DC 450 μ F/500 VDC
- Poros/AS

C. Metode Penelitian

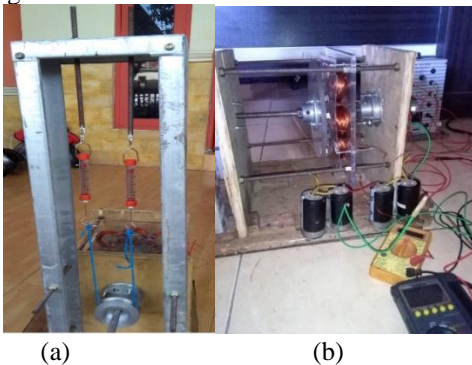
Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimental dengan melakukan perancangan, pembuatan, dan pengujian torsi motor DC magnet permanen. Pengujian dan pengambilan data dilakukan di Laboratorium Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana. Parameter yang diuji pada desain motor DC ini adalah kecepatan putaran dan torsi motor terhadap pengaruh tegangan input dan variasi lapisan magnet rotor. Gambar 2 dan 3 memperlihatkan desain pengujian torsi motor dan pengujian prototipe di Laboratorium.



Gambar 2. Desain Pengujian; (a) Pengujian Elektris; (b) Pengujian Mekanis

Keterangan:

1. Ulir pengatur beban
2. Neraca Pegas (*Spring Balance*)
3. Sabuk transmisi
4. Motor penggerak
5. *Pully*
6. Rangka

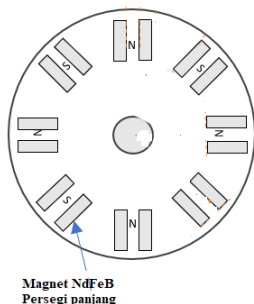


Gambar 3. Pengujian Prototipe Motor DC Magnet Permanen; (a) Tampak Depan; (b) Tampak Samping

D. Desain Motor DC Magnet Permanen

1. Rotor magnet permanen

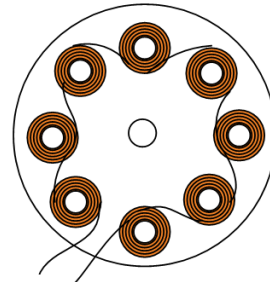
Rotor merupakan bagian generator yang berputar, terbuat dari papan akrilik berbentuk lingkaran. Gambar 4 memperlihatkan desain rotor dalam empat variasi, masing-masing dipasangkan magnet 1 lapis, 2 lapis, 3 lapis dan 4 lapis.



Gambar 4. Desain Rotor

2. Desain Stator Motor DC Magnet Permanen

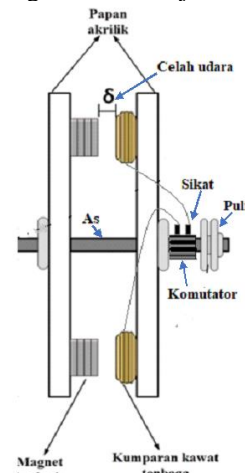
Stator adalah bagian yang diam, stator dibuat menggunakan bahan akrilik. Pada stator dipasang lilitan kumparan yang disusun secara seri. Kumparan stator dirancang sebanyak 150 per lumparan yang terdiri dari 8 kutub yang sesuai dengan perhitungan pada belitan stator.



Gambar 5. Desain Kumparan Stator

3. Desain prototipe motor

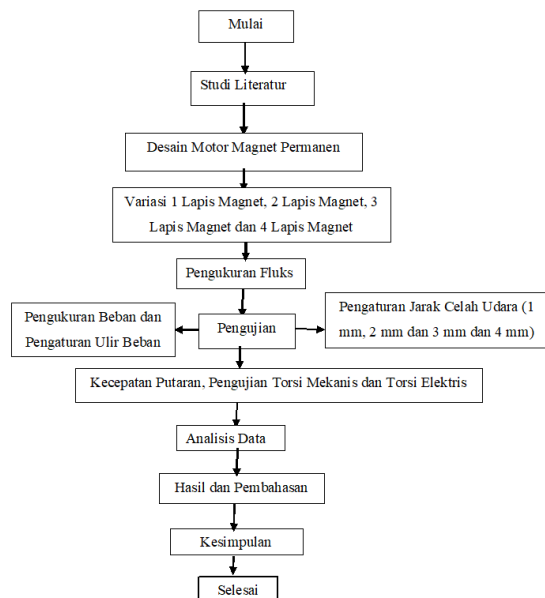
Gambar 5 memperlihatkan desain prototipe motor magnet permanen yang menggunakan magnet NdFeB persegi panjang yang disusun menjadi empat lapis.



Gambar 6. Desain Prototipe Motor Magnet Permanen

E. Diagram Alir Penelitian

Tahapan penelitian ini sesuai diagram alir yang diperlihatkan dalam Gambar 7.



Gambar 7. Diagram Alir Penelitian

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Spesifikasi Hasil Perancangan Motor Magnet

Hasil perancangan pada desain motor DC magnet permanen jenis NdFeB dapat dilihat spesifikasinya pada Tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi Generator

Parameter	Nilai
Kerapatan Fluks (Br)	
- 1 lapis magnet	117,97 mT
- 2 lapis magnet	147,66 mT
- 3 lapis magnet	181,25 mT
- 4 lapis magnet	202,51 mT
Jumlah Magnet	16 buah
Radius dalam Magnet	0.145 m
Radius luar Magnet	0.165 m
Celah udara	1, 2, 3, 4 (mm)
Diameter Rotor	20 cm
Ketebalan rotor	8 mm
Diameter puli	4.5 cm
Kecepatan putaran	750 Rpm
Jumlah lilitan	150
Jumlah kutub	8
Jumlah Phasa	1
Dimensi magnet : panjang	2 cm
Lebar magnet	1 cm
Tinggi magnet	1 mm
Frekuensi	50 Hz

B. Perhitungan Belitan Stator

- Fluks magnet rata-rata

$$B_{max} = 0.2025117 \frac{0,02}{0,02+0,004} = 0.144 \text{ mT}$$

- Luasan Magnet

$$A_m = \frac{3.14 (0.165^2 - 0.145^2) - 0.022 (0.165 - 0.145) 16}{16} = 0.77675 \text{ m}^2$$

- Fluks magnet maksimal

$$\phi_{max} = 0.77675 \text{ m}^2 \times 0.144 \text{ T} = 0.111852 \text{ Wb}$$

- Menentukan banyak lilitan (E = 24 V)

$$N = \frac{24}{4.44 \times 50 \times 0.8 \times 0.111852} = 1208.16 \text{ belitan.}$$

Jumlah lilitan tiap kumparan:

$$= \frac{1208.16}{8} = 151.020 \approx 150 \text{ lilitan perkumparan.}$$

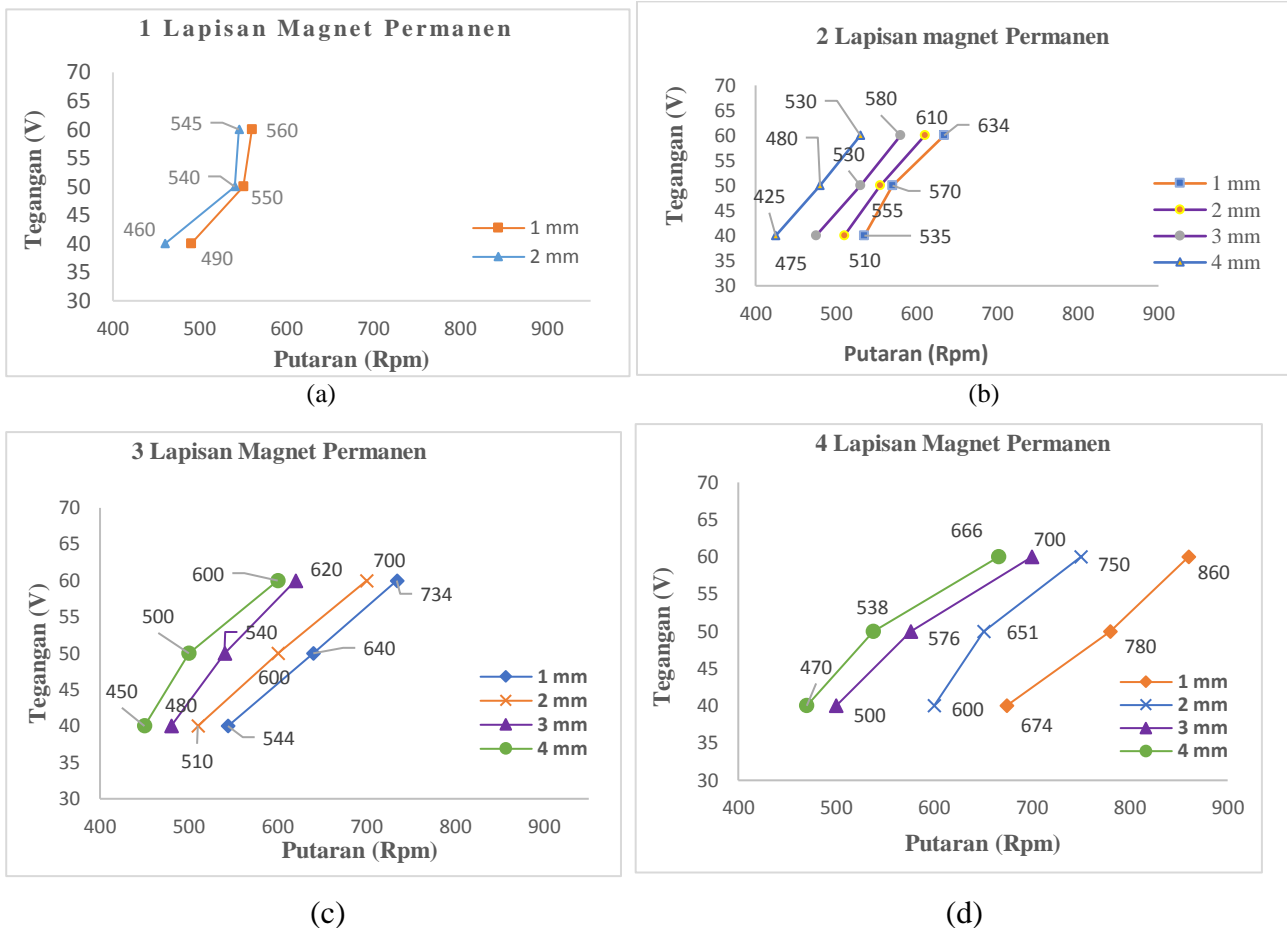
B. Pengujian Komposisi Rotor Magnet yang Disusun secara Berlapis

Dalam pengujian motor magnet ini diberikan tegangan input (tegangan medan stator) yang bervariasi pada setiap lapisan magnet yakni 40V, 50V dan 60 V. Berdasarkan Gambar 2, pengukuran dilakukan untuk memperoleh nilai torsi mekanis dan torsi listrik sesuai dengan variasi beban yang diberikan. Torsi mekanis diperoleh berdasarkan pengukuran gaya, sedangkan torsi listrik diperoleh berdasarkan pengukuran daya output motor yang terukur. Dalam hal ini pemberian beban dilakukan dengan mengatur ulir dari neraca pegas sampai motor berhenti berputar. Kemudian dilakukan variasi dengan mengatur jarak celah udara piringan rotor dan stator dari 1 – 4 mm.

Untuk membandingkan torsi dengan beban yang di variasikan terhadap jarak celah udara dapat terlihat pada Tabel 3. Data hasil pengujian putaran, arus, tegangan dan besar gaya yang diukur untuk magnet permanen persegi panjang susunan 1-4 lapisan dengan jarak celah udara 1- 4 mm. Arus yang besar dipengaruhi oleh dimensi kawat dan jumlah lilitan. Selain itu, Tabel 3 memperlihatkan juga hasil pengukuran arus dan gaya motor mulai dari beban nol sampai pembebanan penuh (motor berhenti / pengereman).

Tabel 3. Hasil Pengukuran Rotor Magnet yang disusun secara Berlapis

No	Teg. input (V)	1 Lapis				2 Lapis				3 Lapis				4 Lapis			
		Arus (I)	F1 (N)	F2 (N)	(N) (Rpm)	Arus (I)	F1 (N)	F2 (N)	(N) (Rpm)	Arus (I)	F1 (N)	F2 (N)	(N) (Rpm)	Arus (I)	F1 (N)	F2 (N)	(N) (Rpm)
1.	40	2.6	0	0	490	2.6	0	0	535	2.7	0	0	544	4.7	0	0	674
		2.5	0.2	0.4	450	2.6	0.2	0.4	500	2.7	0.2	0.4	540	4.5	0.2	0.5	630
		0	0.2	0.6	0	0	0.2	0.7	0	2.6	0.2	0.5	509	4.4	0.3	0.7	547
										2.5	0.3	0.8	434	4.3	0.3	1	530
										2.3	0.3	0.9	379	4.2	0.3	1.1	500
2.	50									0	0.3	1	0	0	0.3	1.3	0
		2.8	0	0	550	3.1	0	0	570	3.6	0	0	640	4.8	0	0	780
		2.7	0.2	0.5	520	3	0.2	0.5	490	3.5	0.3	0.5	582	4.7	0.2	0.5	730
		2.6	0.2	0.6	460	0	0.2	0.8	0	3.3	0.3	0.8	540	4.6	0.3	1	636
										3	0.3	0.9	480	0	0.3	1.5	0
3.	60									2.9	0.3	1	450				
										0	0.3	1.2	0				
		2.9	0	0	560	3.5	0	0	634	3.7	0	0	734	5.2	0	0	860
		2.8	0.2	0.5	520	3.3	0.2	0.5	585	3.6	0.2	0.5	675	5.1	0.2	0.5	820
		2.7	0.3	0.7	480	2.8	0.2	0.6	490	3.5	0.3	0.8	619	5	0.2	0.7	767
								0	0.4	1.5	0	4.9	0.2	1	730		
												0	0.2	1.5	0		



Gambar 8. Hubungan Variasi Lapisan Magnet terhadap Tegangan dan Putaran motor: (a) 1 Lapisan Magnet; (b) 2 Lapisan Magnet; (c) 3 Lapisan Magnet; (d) 4 Lapisan Magnet

Gambar 8 memperlihatkan hubungan variasi tegangan input dan putaran dari motor dengan menggunakan rotor magnet 1 - 4 lapisan magnet dan variasi jarak celah udara 1 - 4 mm. Berdasarkan Gambar 8 (a) terlihat bahwa pada penggunaan magnet persegi panjang dengan susunan 1 lapis (117,97 mT), motor magnet hanya mampu berputar pada jarak celah udara 1-2 mm. Hal ini disebabkan pengaruh fluks yang semakin kecil ketika jarak celah udara diperbesar. Kemudian putaran maksimum yang terjadi pada jarak 1 mm hanya mencapai 490 Rpm dengan tegangan input 40 V_{DC}. Kecepatan motor dapat dinaikkan menjadi 550 Rpm dan 560 Rpm dengan menaikkan tegangan input menjadi 50 - 60 Volt.

Selanjutnya, terlihat Gambar 8 (b), (c), dan (d) terjadi peningkatan putaran motor sebanding dengan penambahan lapisan magnet menjadi 2-4 lapis. Pada susunan magnet 2 lapis (147,66 mT) dengan jarak terkecil 1 mm dengan tegangan input 40 Volt, diperoleh peningkatan putaran dari 544 Rpm menjadi 674 Rpm. Berturut-turut untuk magnet 3 lapis (181,25 mT) diperoleh peningkatan putaran 544 Rpm, dan 4 lapis (202,51 mT) dengan putaran 674 Rpm. Demikian halnya dengan perubahan tegangan input sampai 60 Volt diperoleh putaran maksimum menjadi 634 Rpm (magnet 2 lapis), 734 Rpm (magnet 3 Lapis), dan 860 Rpm (magnet 4 lapis).

Seperti halnya dengan magnet 1 lapis, ketika jarak celah udara diperbesar maka penambahan magnet 2 - 4 lapis juga akan mengalami penurunan putaran. Akan tetapi, berbeda dengan susunan magnet 1 lapis, dimana penambahan magnet 2 - 4 lapis masih mampu berputar dengan jarak sampai 4 mm.

C. Pengujian Torsi Motor DC Magnet Permanen

Torsi adalah ukuran kekuatan atau gaya yang dapat menyebabkan objek berputar. Pengujian torsi dilakukan dengan menggunakan desain penelitian seperti Gambar 2. Dalam pengujian ini dilakukan pengambilan data torsi statis dan dinamis. Torsi statis adalah torsi yang tidak menghasilkan percepatan sudut dimana kondisi motor DC dalam keadaan mengalami pengereman atau pembebanan penuh. Sebaliknya, torsi dinamis adalah kondisi dimana motor DC dalam keadaan berputar baik dalam keadaan berbeban atau tanpa beban. Pengambilan data ini dilakukan pada setiap variasi susunan magnet untuk 1 lapisan, 2 lapisan, 3 lapisan dan 4 lapisan dengan variasi jarak celah udara 1 mm, 2 mm, 3 mm dan 4 mm. Kemudian data yang terukur ini masing-masing dilakukan perhitungan torsi sesuai dengan rumus untuk torsi mekanis (pengukuran gaya) dan untuk torsi elektrik (pengukuran daya listrik) sebagai pembanding.

Berdasarkan data dari hasil pengukuran Tabel 3 maka, dapat dihitung nilai torsi elektris dan torsi mekanis dengan mengambil sampel magnet 1 lapis, sebagai berikut:

- Torsi mekanis: $\tau_m = F \cdot r$ (5)

Dimana:

$$F = F_2 - F_1$$

$$F = 0.4 - 0.2 = 0.2 \text{ N}$$

dan r diperoleh dari diameter puli (D= 45 cm) atau r = 0.0045/2 = 0.0225 m. Dengan demikian diperoleh:

$$\tau_m = 0.2 \times 0.0225 = 0.0045 \text{ N} - \text{m}$$

- Torsi elektris $\tau_e = P/\omega$ (6)

dimana:

$$P = V \cdot I \quad (\text{Watt}) \quad (7)$$

$$= 40 \times 2.5 = 100 \text{ Watt}$$

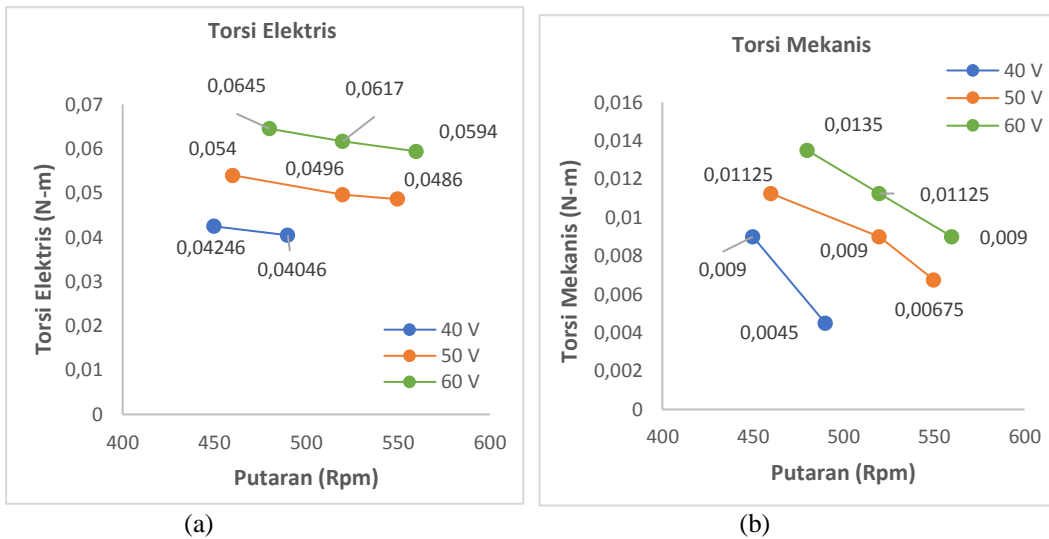
dan $\omega = \frac{2\pi f N}{60}$

$$\omega = \frac{2 \times 3.14 \times 50 \times 450}{60} = \frac{141300}{60} = 2355 \text{ rad/s}$$

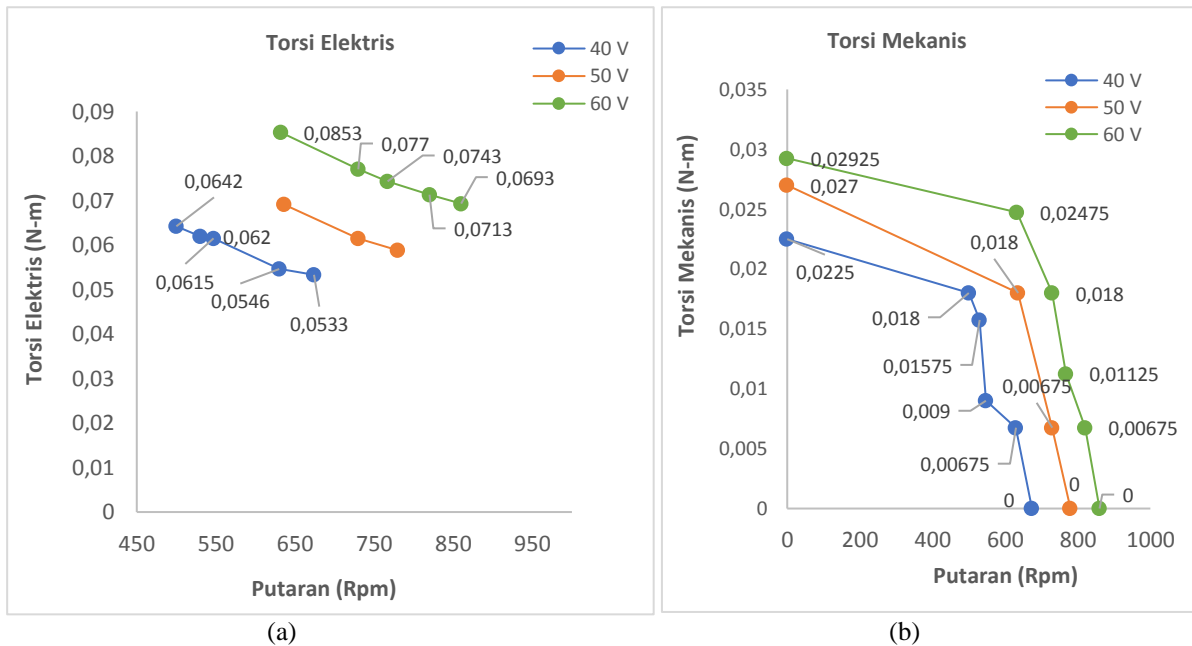
diperoleh:

$$\tau_e = \frac{100}{2355} = 0.04246 \text{ N} - \text{m}$$

Dengan cara yang sama, maka nilai torsi mekanis dan torsi elektris dapat diperoleh berdasarkan hasil pengujian pada setiap perubahan beban yang diberikan pada motor magnet. Gambar 9 dan 10 memperlihatkan pengujian torsi motor DC untuk komposisi 1 lapisan dan 4 lapisan magnet dengan mengambil sampel jarak celah udara 1 mm.



Gambar 9. Pengujian Torsi Motor dengan komposisi 1 Lapisan Magnet: (a) Torsi Elektris; (b) Torsi Mekanis



Gambar 10. Pengujian Torsi Motor dengan komposisi 4 Lapisan Magnet: (a) Torsi Elektris; (b) Torsi Mekanis

Terlihat bahwa semakin besar input tegangan yang diberikan pada belitan medan stator sebanding dengan besar torsi yang dihasilkan oleh motor magnet. Sebaliknya,

semakin besar putaran motor maka semakin kecil torsi motor yang terjadi. Hal ini sesuai dengan rumus torsi motor yang diberikan dalam Pers. (6). Demikian halnya dengan

adanya penambahan lapisan gigi magnet rotor juga berpengaruh terhadap torsi yang terjadi pada motor magnet. Sebagai contoh, dalam pengujian komposisi magnet 1 lapis dengan tegangan input 40 Volt diperoleh torsi listrik sebesar 0,04246 N-m dan mengalami peningkatan sebesar 0,0642 N-m pada komposisi magnet 4 lapis. Demikian halnya untuk torsi mekanis, pada torsi maksimum untuk tegangan input 40 Volt diperoleh 0,009 N-m pada komposisi magnet 1 lapis menjadi 0,0225 N-m pada komposisi magnet 4 lapis.

D. Pengaruh Torsi terhadap Jarak Celah Udara dan Variasi Lapisan Magnet

Untuk mengetahui pengaruh torsi motor magnet terhadap jarak celah udara dan variasi lapisan magnet, maka dalam pengujian ini digunakan tegangan input 50 Volt dan 60 Volt. Perbandingan pengukuran nilai torsi diukur berdasarkan variasi lapisan magnet rotor dengan komposisi dari 1 sampai 4 lapisan magnet pada jarak celah udara 1 mm.

Pengaruh peningkatan torsi motor untuk setiap penambahan lapisan magnet NdFeb berbentuk persegi panjang. Pada komposisi magnet 1 lapis dengan tegangan input 50 Volt diperoleh torsi mekanis sebesar 0,01125 N-m dan torsi listrik sebesar 0,054 N-m. Demikian halnya untuk tegangan input 60 Volt terjadi peningkatan torsi mekanis sebesar 0,01575 N-m dan torsi listrik sebesar 0,0645 N-m. Selanjutnya, Terlihat juga bahwa adanya penambahan setiap lapisan pada magnet rotor berpengaruh pada peningkatan torsi motor pada setiap lapisannya. Hal ini disebabkan, karena adanya pengaruh penambahan fluks magnet ketika lapisan magnet ditambahkan. Sebagai contoh untuk torsi mekanis dengan komposisi magnet 1 lapis dengan tegangan input 50 Volt berturut-turut diperoleh peningkatan torsi dari 0,01125 N-m menjadi 0,0135 N-m (2 lapis), 0,0135 N-m (3 lapis) dan 0,027 N-m (4 lapis). Disini juga terlihat bahwa, torsi listrik lebih besar dibandingkan dengan torsi mekanis. Hal ini menunjukkan bahwa pengukuran torsi listrik diperoleh pada daya input motor, sedangkan torsi mekanis diperoleh pada daya output motor.

E. Pembahasan Hasil Penelitian

Terdapat beberapa parameter yang mempengaruhi kinerja motor magnet permanen seperti tegangan input, jarak celah udara dan fluks magnet rotor. Sesuai dengan hasil analisis atas pengujian untuk pengaruh tegangan input terhadap putaran menunjukkan bahwa, semakin besar tegangan input semakin besar kecepatan putaran pada motor DC magnet permanen. Hal yang sama juga sudah dikemukakan oleh [9] bahwa nilai torsi meningkat seiring meningkatnya input tegangan. Dalam hal ini menunjukkan bahwa besar tegangan jangkar medan akan mempengaruhi putaran motor DC. Selain itu, arah putaran dari motor DC magnet permanen ditentukan oleh arah arus yang mengalir pada jangkar.

Selanjutnya, salah satu keistimewaan dari motor DC magnet permanen ini adalah kecepatannya dapat dikontrol dengan mudah. Kecepatan motor magnet permanen berbanding langsung dengan nilai tegangan yang diberikan di jangkar [10]. Sebaliknya, kecepatan motor berbanding terbalik dengan torsi. Menurut [11], torsi hasil

perhitungan dari putaran motor cenderung meningkat dengan menurunnya putaran jangkar sesuai dengan literatur. Seperti yang telah dijelaskan dalam Pers. (5), gaya yang timbul pada rotor akan menghasilkan momen putar atau torsi.

Kemudian kecepatan putaran juga dipengaruhi oleh jarak celah udara dan variasi penambahan lapisan magnet. Artinya bahwa semakin besar penambahan lapisan magnet dengan jarak celah udara yang semakin kecil maka kecepatan putarannya juga akan semakin besar. Demikian sebaliknya, semakin kecil lapisan magnet dan jarak celah udara semakin besar maka kecepatan putarannya akan semakin menurun. Berdasarkan hasil pengujian dan pengukuran pada kecepatan putaran pada desain motor DC magnet permanen terbukti bahwa, dengan inputan tegangan medan tertinggi 60 Volt terhadap 4 variasi penambahan lapisan magnet diperoleh kecepatan putaran yang lebih besar. Pada penambahan 4 lapisan magnet diperoleh kecepatan putaran tertinggi yaitu 860 Rpm dengan jarak celah udara 1 mm untuk inputan tegangan medan 60 Volt. Hasil ini lebih besar dibandingkan dengan inputan tegangan medan 40 Volt dan 50 Volt terhadap 1 lapisan magnet, 2 lapisan magnet dan 3 lapisan magnet dengan jarak celah udara 1 - 4 mm. Hal yang sama juga sudah dibuktikan oleh [12] dalam perancangan magnetic gear. Ketika lapisan magnet NdFeB persegi panjang disusun secara paralel akan mengurangi reluktansi magnet dibanding disusun secara seri sehingga dapat menurunkan reluktansi magnet berkurang dan dapat meningkatkan fluks magnet.

Berkaitan dengan pengaruh lapisan magnet rotor terhadap torsi motor DC magnet permanen menunjukkan bahwa, penambahan lapisan magnet dapat mempengaruhi perolehan nilai torsi motor. Dalam hal ini, semakin banyak lapisan magnet (4 lapisan) maka fluks magnet akan semakin besar sebanding dengan nilai torsi motor. Dalam hal ini fluks magnet rotor akan berpengaruh langsung dengan torsi motor DC. Hal ini juga menunjukkan bahwa semakin besar diameter magnet semakin besar juga fluks yang dihasilkan oleh magnet tersebut, Dengan demikian, semakin besar diameter motor semakin besar torsi yang dihasilkan oleh motor magnet. Hal ini juga telah dikemukakan oleh [13], semakin besar dimensi magnet akan mempengaruhi torsi motor. Seperti yang diperlihatkan dalam Tabel 2 berturut-turut diperoleh pengukuran fluks magnet sebesar 117,97 mT (1 lapisan magnet), 146,67 mT (2 lapisan magnet), 181,25 mT (3 lapisan magnet), dan 202,54 mT (4 lapisan magnet). Dengan penambahan 4 lapisan magnet permanen persegi panjang memperoleh nilai torsi yang lebih besar dibandingkan dengan ketiga variasi lapisan magnet lainnya. Dari hasil pengukuran pada komposisi rotor dengan 4 lapisan magnet permanen dengan tegangan medan 60 Volt, dan jarak celah udara 1 mm diperoleh torsi listrik maksimum 0,0853 N-m, dan torsi mekanis maksimum 0,02925 N-m.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengukuran dan analisis pada desain motor DC magnet permanen dengan menggunakan magnet

NdFeb persegi panjang diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Tegangan input medan dapat mempengaruhi kecepatan putaran pada desain motor DC magnet permanen. Semakin besar tegangan input dengan lapisan magnet yang semakin banyak terhadap jarak celah udara yang semakin kecil akan menghasilkan kecepatan putaran yang lebih besar.
2. Variasi penambahan lapisan magnet dapat meningkatkan torsi motor DC magnet permanen. Hasil pengukuran membuktikan bahwa pada 4 lapisan magnet memperoleh nilai fluks lebih besar sehingga dapat meningkatkan perolehan torsi.
3. Hasil pengujian menunjukkan bahwa, jarak celah udara pada desain motor DC magnet permanen dapat berpengaruh pada torsi motor. Semakin kecil jarak celah udara, torsi motor semakin besar, sebaliknya semakin besar jarak celah udara maka torsi motor DC magnet permanen akan semakin menurun. Dari hasil pengukuran dapat membuktikan bahwa, jarak celah udara 1 mm diperoleh torsi yang lebih besar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada kepala Laboratorium Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknik yang telah memberikan fasilitas dalam pengujian dan pengambilan data dalam penelitian ini

REFERENSI

- [1] Sumardjati, "Motor Magnet Permanen Sebagai Penghasil Gaya Dan Putaran Tanpa Energi Listrik," *Ind. Res. Work. Natl. Semin.*, vol. 3, no. 29, p. 156, 2012.
- [2] J. Santiago and H. Bernhoff, "Comparison between axial and radial flux PM coreless machines for flywheel energy storage," *J. Electr. Syst.*, vol. 6, no. 2, pp. 1–13, 2010.
- [3] M. J. Kramer, R. W. Mccallum, and I. A. Anderson, "Prospects for Non-Rare Earth Permanent Magnets for Traction Motors and Generators," vol. 64, no. 7, pp. 752–763, 2012, doi: 10.1007/s11837-012-0351-z.
- [4] M. Chen, K. T. Chau, W. Li, and C. Liu, "Development of Non-rare-earth Magnetic Gears for Electric Vehicles," vol. 10, no. 2, pp. 1607–1613, 2012.
- [5] M. T. Thompson, "Practical Issues in the Use of NdFeB Permanent Magnets in Maglev, Motors, Bearings and Eddy Current Brakes," 2008.
- [6] M. Siregar, L. E. Joe, and T. Nur, "Study the Effect of Combination of Shoe Height and Slot Opening width to Reduce Cogging Torque in Permanent Magnet Generator Study the Effect of Combination of Shoe Height and Slot Opening width to Reduce Cogging Torque in Permanent Magnet Generator," 2020, doi: 10.1088/1757-899X/807/1/012011.
- [7] N. Chen, S. L. Ho, and W. N. Fu, "Optimization of Permanent Magnet Surface Shapes of Electric Motors for Minimization of Cogging Torque Using FEM," vol. 46, no. 6, pp. 2478–2481, 2010.
- [8] S. Syam, S. Soeparman, D. Widyanuriawan, and S. Wahyudi, "IOP Conference Series : Materials Science and Engineering PAPER • OPEN ACCESS A New Design of Magnetic Gear Axial using a Rectangular NdFeB Magnetic Layer A New Design of Magnetic Gear Axial using a Rectangular NdFeB Magnetic Layer," 2019, doi: 10.1088/1757-899X/494/1/012053.
- [9] S. A. Ananda, J. S. S, and B. A. S, "Studi Penggunaan Permanen Magnet Servo Motor Tegangan 460 V DC 1850 Rpm Pada Mesin Potong Karton," *J. Tek. Elektro*, vol. 2, no. 2, pp. 98–104, 2002, doi: 10.9744/jte.2.2.
- [10] B. J. Hutagaol, "Analisa pengaruh kecepatan putar dan beban terhadap keluaran generator sinkron tiga fasa kecepatan rendah," *Saintek ITM*, vol. 32, pp. 16–20, 2019.
- [11] A. Hindasyah and S. Agus, "Uji fungsi magnet permanen elastis p3ib pada motor listrik arus searah," *Pros. Semin. Nas. Bahan Magn. I, Serpong*, pp. 82–86, 2000.
- [12] S. Syam, S. Kurniati, and R. Ramang, "Design and characteristics of axial magnetic gear using rectangular magnet," *J. Eur. des Syst. Autom.*, vol. 53, no. 2, pp. 167–175, 2020, doi: 10.18280/jesa.530202.
- [13] R. Kumalasari, "Pengaruh Diameter Kumparan Armature Terhadap Torsi dan Daya Motor Listrik," *Skripsi, Jur. Tek. MESin, Univ. Negeri Semarang*, 2019.