

TUGAS AKHIR - TF 141581

PERANCANGAN MOTOR MAGNET PERMANEN BERPENDORONG GABUNGAN ELEKTROMAGNET-MAGNET PERMANEN DENGAN MODEL PENDEKATAN DIPOL MAGNETIK

AHMAD FANANI NRP. 2411 100 130

Dosen Pembimbing Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc Dyah Sawitri, S.T, M.T

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya 2015



FINAL PROJECT - TF 141581

DESIGN OF PERMANENT MAGNET MOTOR WITH COMBINATION OF ELECTROMAGNET-NdFeB MAGNET PROPULSION USING MAGNETIC DIPOLE MODEL APPROACH

AHMAD FANANI NRP. 2411 100 130

Supervisor Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc Dyah Sawitri, S.T, M.T

DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS Faculty of Industrial Technology Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya 2015

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama NRP

: Ahmad Fanani

: 2411100130

Departemen : Teknik Fisika FTI – ITS

dengan ini menyatakan bahwa tugas akhir saya yang berjudul:

Perancangan Motor Magnet Permanen Berpendorong Gabungan Elektromagnet-Magnet Permanen dengan Model Pendekatan Dipol Magnetik

adalah bebas dari plagiasi. Apabila pernyataan ini terbukti tidak benar, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarbenarnya.

> Surabaya, 19 Maret 2018 Yang membuat pernyataan

PERANCANGAN MOTOR MAGNET PERMANEN BERPENDORONG GABUNGAN ELEKTROMAGNET-MAGNET Ndfeb DENGAN MODEL PENDEKATAN DIPOL MAGNETIK

TUGAS AKHIR

Oleh : AHMAD FANANI NRP. 2411 100 130

Surabaya, 19 Maret 2018 Mengetahui/Menyetujui,

Pembimbing I,

Dr. Ir. Purwadi Agus D, M.Sc. NIP.19620822 198803 1 001 Pembimbing II,

<u>Dyah Sawitri, S.T. M.T.</u> NIP. 19700101 199512 2 001

Kepala Departemen

Sepala Fisika FTI-ITS

Agus Muhamad Hauta, S.T., M.Si., Ph.D.

JEHNTPEN19780902 200312 1 002 TEKNIK FISIKA

PERANCANGAN MOTOR MAGNET PERMANEN BERPENDORONG GABUNGAN ELEKTROMAGNET-MAGNET PERMANEN NdFeB DENGAN MODEL PENDEKATAN DIPOL MAGNETIK

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik pada

Bidang Studi Rekayasa Instrumentasi Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

AHMAD FANANI NRP. 2411 100 130

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

- 1. Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc. (Pembimbing I)
 2. Hendra Cordova, S.T, M.T
- 3. Ir. Yaumar, MT.
- 4. Nur Laila Hamidah, ST. MT.

(Ketua Tim Penguji)

(Staf Penguji I)

(Staf Penguji II)

SURABAYA Maret 2018

PERANCANGAN MOTOR MAGNET PERMANEN BERPENDORONG GABUNGAN ELEKTROMAGNET-MAGNET NdFeB DENGAN MODEL PENDEKATAN DIPOL MAGNETIK

Nama : Ahmad Fanani NRP : 2411100130

Departemen : Teknik Fisika, FTI-ITS

Pembimbing: Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc

Dyah Sawitri, S.T, M.T

Abstrak

Berbagai cara dilakukan untuk menemukan konfigurasi terbaik dalam perancangan motor magnet. Saat ini, belum ada penelitian terkait motor magnet permanen dengan konfigurasi pendorong gabungan elektromagnet-magnet permanen sebagai penggerak rotor, sehingga dilakukan penelitian (perancangan) terkait ini untuk mengetahui potensi operasi yang ditawarkan terutama karakteristik torsi dan energi per putaran. Telah dirancang motor magnet permanen dengan penggerak gabungan elektromagnetmagnet permanen menggunakan pendekatan model dipol magnetik dengan nilai-nilai parameter dan variabel yang telah ditetapkan dan diperhitungkan diantaranya magnet yang digunakan berjenis N35 dengan ketebalan 0.005 m dan diameter 0.015 m, jari-jari sistem rotor sebesar 0.15 m, jari-jari sistem stator sebesar 0.18 m, magnet permanen pada sistem stator berjumlah 6, magnet permanen pada sistem rotor bervariasi yakni 4 dan 8, serta sudut yang dibentuk oleh titik pusat badan elektromagnet dengan sumbu x positif adalah -19°. Karakteristik torsi untuk konfigurasi motor 6x4 adalah diantaranya memiliki torsi puncak sebesar 0.8202 Nm dan torsi terendah -1.4799 Nm serta torsi rerata sebesar -0.3600 Nm dan total energi rotasi yang dihasilkan sebesar 20.6251 J, sedangkan untuk konfigurasi motor 6x8 didapatkan torsi puncak sebesar 2.7890 Nm dan torsi terendah -0.1990 Nm serta torsi rerata sebesar 0.8156 Nm dan total energi rotasi yang dihasilkan sebesar 46.7292 J. Galat bias torsi rotor vs fasa rotor hasil perancangan berdasarkan metode pendekatan dipol magnetik dengan metode element hingga adalah sebesar 42.51% untuk konfigurasi motor 6x4, dan 14.01% untuk konfigurasi motor 6x8.

Kata kunci : magnet permanen, dipol, fluks magnetik, elektromagnet, elemen hingga

DESIGN OF PERMANENT MAGNET MOTOR WITH COMBINATION OF ELECTROMAGNET-NdFeB MAGNET PROPULSION USING MAGNETIC DIPOLE MODEL APPROACH

Name : Ahmad Fanani NRP : 2411100130

Department: Teknik Fisika, FTI-ITS

Supervisor : Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc

Dyah Sawitri, S.T, M.T

Abstract

Various ways has been conducted to find the best configuration in permanent magnet motors design. Currently, research about permanent magnet motors with a combined electromagnetspermanent magnet booster configuration as permanent magnet rotor driver has not been found yet, so it needed to be researched (design) to discover the operation potentials especially on torque characteristic and energy per rotation. A permanenent magnet motor with combination of electromagnet - NdFeB magnet propulsion has been designed using magnetic dipole model approach, which results defined and calculated values of some parameters dan variables: N35 magnet type is used with 0.005 m of thickness and 0.015 m of diameter, 0.15 m of rotor system radius, 0.18 m of stator system radius, 6 magnet permanents of stator, , varied 4 and 8 magnet permanents of stator, and formed angle between positive x axis and electromagnet is -19°. The torque characteristics of 6x4 motor configuration are: 0.8202 Nm of peak torque, -1.4799 Nm of lowest torque, -0.3600 Nm of average torque, 20.6251 J of total energy per rotation; while in 6x8 motor configuration: 2.7890 Nm of peak torque, -0.1990 Nm of lowest torque, 0.8156 Nm of average torque, and 46.7292 J of total energy per rotation. The error resulted from the comparison between finite element method and magnetic dipole approach are : 42.51% for 6x4 motor configuration, and 14.01% for 6x8 motor configuration.

Keywords ---- permanent magnets, dipole, magnetic flux, electromagnet, finite element

KATA PENGANTAR

Syukur Alhamdulillah penulis panjatkan kehadirat Allah Subhaanahu wa Ta'aala atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul "Perancangan Motor Magnet Permanen Berpendorong Gabungan Elektromagnet-Magnet NdFeB dengan Model Pendekatan Dipol Magnetik". Penulis telah banyak mendapatkan bantuan dari berbagai pihak dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

- 1. Bapak Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA, selaku Ketua Jurusan Teknik Fisika yang telah sabar memberikan dukungan, bimbingan, serta ilmu yang sangat bermanfaat,
- 2. Ibu dan Ayah sekeluarga yang tidak kenal lelah memberi kasih sayang, mencari rezeki, dan memberi dukungan demi mengangkat derajat pendidikan anak-anak mereka,
- 3. Bapak Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc dan Ibu Dyah Sawitri, S.T, M.T selaku dosen pembimbing yang senantiasa memberikan motivasi, bimbingan dan arahan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini,
- 4. Bapak dan Ibu dosen Teknik Fisika yang telah memberikan ilmu selama kuliah.
- Gwyn Walesa, Amir Hamzah, Rachma Jati Megantoro, Rehan Rachmanda, Andika Dwiparana, Muhammad Danang Prasetyo dan Keluarga besar F46 (TF 2011) yang sudah bersama-sama dan banyak membantu mengenai tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa penulisan laporan Tugas Akhir ini tidaklah sempurna. Oleh karena itu sangat diharapkan kritik dan saran yang membangun dari semua pihak sehingga mencapai sesuatu yang lebih baik lagi. Penulis juga berharap semoga laporan ini dapat menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembacanya.

Surabaya, 19 Maret 2018 Penulis '' Halaman ini sengaja dikosongkan''

DAFTAR ISI

HALA	MAN JUDUL	ii
	AR PENGESAHAN Error! Bookmark not def	
Abstra	k	v
Abstra	ct	vii
KATA	PENGANTAR	ix
DAFT	AR ISI	xi
DAFT	AR GAMBAR	xiii
DAFT	AR TABEL	XV
BAB I	PENDAHULUAN	1
1.1	Latar Belakang	1
1.2	Rumusan Masalah	3
1.3	Batasan Masalah	3
1.4	Tujuan	4
1.5	Sistematika Laporan	
BAB I	I TINJAUAN PUSTAKA	
2.1	Motor Magnet Permanen (PM Motor)	7
2.2	Magnet Permanen Neodymium-Besi-Boron (NdFeB)7
2.3	Analisa Magnetostika dengan Model Muatan	9
2.4	Galat Pada Gaya Interaksi Antar Magnet dengan	
	Pendekatan Dipol	
2.5	Analisis Elemen Hingga (FEA)	
BAB 1	III METODOLOGI PENELITIAN	19
BAB 1	IV HASIL DAN PEMBAHASAN	50
BAB '	V PENUTUP	60
DAFT	AR PUSTAKA	62

'' Halaman ini sengaja dikosongkan''

DAFTAR GAMBAR

Gambar	2.1	Salah Satu Contoh Magnet NdFeB	9
Gambar	2.2	Magnet Silinder	13
Gambar	2.3	Geometri dari Rangkaian Umum Momen	13
		Dipol Magnetik	
Gambar	2.4	Dipol Magnetik	14
Gambar	2.5	Interaksi Dua Dipol Magnetik yang	14
		Terpisah Pada Jarak Sebesar r	
Gambar	2.6	Perbandingan Gaya Interaksi Magnet	16
		Terhadap Jarak Menggunakan	
		Persamaan (2.16) dan Persamaan (2.17)	
Gambar	3.1	Diagram Alir Pelaksanaan Tugas Akhir	19
Gambar	3.2	Langkah-Langkah Perancangan Motor	21
Gambar	3.3	Konfigurasi Motor Magnet Permanen	22
Gambar	3.4	Model Dipol Magnetik	28
Gambar	3.5	Momen Dipol Magnetik	28
Gambar	3.6	Hubungan α_R dan α_S dengan Konsep	32
		Segitiga	
Gambar	3.7	Karakter Gaya Putar Positif F_{rot}	34
		Terhadap θ_R Sesuai Kriteria Sizing α_R	
		$\operatorname{dan}lpha_{S}$	
Gambar	3.8	Karakter Gaya Putar Positif Rotor F_R	35
		Terhadap θ_R	
Gambar	3.9	Skema Kontrol Pengaktifan Pendorong	38
		Elektromagnet	
Gambar	3.10	Skema Posisi Angular Fotodetektor	39
Gambar	3.11	Skema Posisi Angular Elektromagnet	40
		pada Motor	
Gambar	3.12	Fungsi Pembangkitan Sinyal I_{EM}	41
		Terhadap Fasa Stator untuk	
		Konfigurasi 6x4	
Gambar	3.13	Karakter Gaya Putar Positif Rotor F_R	42
		Terhadap θ_R Setelah Diberikan Kriteria	
		Pengaktifan Elektromagnet	

Gambar	3.14	Visualisasi	Tampak	Dua-Dimensi	44
		Desain Moto	or untuk Kon	figurasi 6x4	
Gambar	3.15	Visualisasi Tampak Dua-Dimensi			
		Desain Moto	or untuk Kon	figurasi 6x8	
Gambar	3.16	Skema Pengambilan Data dan Analisis			
Gambar	3.17	Skema Simu	lasi FEM de	ngan	49
		Perangkat Li	unak <i>FEMM</i>	4.2	
Gambar	4.1	Karakter To	rsi Rotor T_R	Ferhadap $\theta_{\!\scriptscriptstyle R}$	51
		untuk $N_R = 4$	Hasil Peran	cangan untuk	
		Hasil Perhitu	ıngan (denga	n Pendekatan	
		Dipol) dan F	EM		
Gambar	4.2	Kontur Fluk	s Magnetik d	lari	53
		Konfigurasi	Motor 6x4 p	ada saat	
		$\theta_R=25^{\circ}$	_		
Gambar	4.3	Karakter To	rsi Rotor T_R	Ferhadap θ_R	55
		untuk $N_R = 8$	Hasil Peran	cangan untuk	
		Hasil Perhitu	ıngan (denga	ın Pendekatan	
		Dipol) dan F	FEM		

DAFTAR TABEL

Tabel	3.1	Nilai Parameter Magnetik dari Magnet NdFeB N35	23
Tabel	3.2	Parameter dan Variabel Konfigurasi Magnet Permanen Rotor-Stator	24
Tabel	3.3	Spesifikasi Pendorong Elektromagnet	27
Tabel	3.4	Permodelan Matematis Komponen Dinamika Rancangan Motor	30
Tabel	3.5	Nilai-Nilai Parameter dan Variabel Konfigurasi	43
Tabel	3.6	Rancang Simulasi	46
Tabel	4.1	Perbandingan Hasil Analisa Model Dipol dengan FEM untuk Konfigurasi 6x4	52
Tabel	4.2	Perbandingan Hasil Analisa Model Dipol dengan FEM untuk Konfigurasi 6x8	55

'' Halaman ini sengaja dikosongkan''

DAFTAR NOTASI

 a_{PM} = Jari-jari badan magnet permanen a_{EM} = Jari-jari badan elektromagnet L_{PM} = Ketebalan magnet permanen L_{EM} = Ketebalan elektromagnet

 Q_{PM} = Kekuatan kutub muatan magnet permanen m_R = momen dipol magnet permanen rotor momen dipol magnet permanen stator

 μ_0 = permeabilitas magnetik pada keadaaan vakum

 r_R = jari-jari sistem rotor r_S = jari-jari sistem stator

 $\theta_R = Fasa rotor$ $\theta_S = Fasa stator$

 θ_{EM} = Fasa elektromagnet

 $\alpha_R = Sudut \text{ badan magnet permanen rotor}$ $\alpha_S = Sudut \text{ badan magnet permanen stator}$

 α_{EM} = Sudut badan elektromagnet r = jarak interaksi antar dipol

 r_{gap} = jarak antar magnet pada satu sumbu magnetisasi

" Halaman ini sengaja dikosongkan"

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Motor merupakan komponen yang berfungsi menggerakkan suatu massa. Beberapa teknologi populer yang mendasari kerja motor saat ini antara lain berbasis listrik dan pembakaran. Tren yang berkembang saat ini adalah penggunaan teknologi ramah lingkungan dimana motor listrik dipilih sebagai propulsi karena tidak menghasilkan emisi massa yang merugikan lingkungan. Sebagai contoh, populasi di Jepang adalah 50% dibandingkan USA (2005), namun emisi karbonnya ialah empat kali lebih kecil. Transportasi massa di sana ialah berbasis komuter dan jaringan kereta-jarak-jauh listrik modern (Gieras et.al, 2010). Teknologi motor listrik saat ini telah berkembang salah satunya ialah motor magnet permanen, dimana motor ini menggunakan magnet permanen sebagai pembangkit medan magnet statis.

Magnet permanen (biasa disingkat sebagai PM) memiliki ketahanan dalam menjaga kemagnetannya (kuat dan arah) yang baik terhadap pengaruh medan dari luar, salah satunya yang populer dan menghasilkan medan yang kuat adalah NdFeB (Neodymium-Besi-Boron) (Gieras et.al, 2010). Hal ini ditunjukkan dengan lebarnya kurva efek histeresis induksi magnetik pada proses magnetisasi dan demagnetisasi. Hal ini menjadikan magnet permanen sangat handal dalam mempertahankan kuat fluks magnetiknya akibat pemberian medan magnet luar, terutama pada aplikasi motor listrik (Gieras et.al, 2010). Bila dibandingkan dengan motor induksi murni, maka motor dengan menggunakan magnet permanen pada stator ataupun rotor dapat menghemat tenaga pembangkitan medan yang diperlukan untuk menggerakkan motor.

Teknologi motor dengan magnet permanen saat ini masih menggunakan konfigurasi dimana penggeraknya pasangan elektromagnet - magnet permanen untuk menghasilkan gaya repulsif. Riset yang dilakukan telah dilakukan diantaranya fokus pada peningkatan performa (torsi, frekuensi, daya keluaran, atau efisiensi) untuk masing-masing penggunaannya. Adapun inovasi

yang dilakukan dapat berupa konfigurasi geometris, material bahan, dan kontrol daya yang didasarkan pada analisis salah satunya dengan metode elemen hingga untuk pemetaan fluks magnetik (Virjoghe et.al, 2012). Inovasi lainnya yang pernah dilakukakn ialah optimalisasi torsi dengan metode pelemahan fluks dan modifikasi switch-on angle untuk aplikasi motor magnet permanen pada sistem paralel hybrid propulsion (Miljavec et.al, 2010). Adapun pengembangan untuk meningkatkan efisiensi dari motor magnet permanen telah dilakukan oleh Klaus Halbach dimana salah satunya dengan mengatur susunan arah magnet permanen pada posisi tertentu (Merritt et.al, 1995).

Berangkat dari perkembangan teknologi motor magnet permanen untuk peningkatan efisiensi serta dilatarbelakangi oleh sifat magnet permanen, muncul suatu ide untuk mengetahui bagaimanakah performa motor dengan dasar penggerak utama berasal dari gaya repulsi magnet permanen dengan magnet permanen yang didukung oleh elektromagnet. Penelitian yang ada hingga saat ini belum menemukan kemungkinan adanya ekstraksi energi pada magnet permanen, sehingga diperlukan tambahan energi seperti halnya motor listrik pada umumnya untuk dapat bergerak. Saat ini juga belum ditemukan penelitian terkait bagaimanakah performa efisiensi (serta karakteristik) yang ditawarkan apabila dirancang suatu motor dengan konsep tersebut.

Penelitian ini adalah perancangan dan bersifat baru, akan sangat sulit bagi penulis menggunakan metode elemen hingga dalam mencari nilai-nilai parameter optimal pertama kali karena tidak diketahui model matematis. Model matematis diperlukan dalam memberikan pandangan batas-batas dan kriteria nilai parameter hasil perancangan. Terkait hal tersebut, perlu dirumuskan terlebih dahulu model matematis yang tepat dalam meracang motor magnet permanen ini. Model paling sederhana ialah dengan pendekatan dipol (Furlani, 2001) untuk memodelkan interaksi antar sumber magnet secara kasar, dimana galat yang dihasilkan dapat ditoleransi pada jarak interaksi yang relatif jauh (Vokoun et.al, 2009).

Terkait dengan latar belakang tersebut, dalam penelitian ini dirancang motor magnet permanen berpenggerak gabungan

magnet permanen – elektromagnet dengan model pendekatan dipol untuk mengetahui performa daya yang ditawarkan.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang diangkat dari latar belakang diatas untuk pelaksanaan penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- Bagaimana prosedur perancangan motor dengan penggerak gabungan electromagnet-magnet NdFeB menggunakan model pendekatan dipol magnetik?
- Bagaimana karakteristik torsi rotor terhadap fasa rotor hasil perhitungan dan simulasi?
- Berapakah galat torsi dari masing-masing konfigurasi motor hasil perancangan berdasarkan hasil metode pendekatan dipol magnetik dengan hasil simulasi menggunakan metode elemen hingga?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang ditentukan untuk memfokuskan masalah pada penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- Motor dirancang dengan konfigurasi rotasi dimana rotor berada di dalam stator.
- Magnet permanen yang digunakan adalah NdFeB N35 silinder dengan diameter 30 mm dan ketebalan 5 mm.
- Dimensi rotor dan stator dibuat tetap dengan nilai masingmasing 150 mm dan 180 mm.
- Pemodelan magnet permanen didekati sebagai dipol magnetik.
- Distribusi penempatan magnet permanen pada rotor atau stator adalah merata pada keliling lingkaran.
- Parameter hasil perancangan adalah sudut magnet permanen rotor, sudut magnet permanen stator, jumlah magnet rotor, dan jumlah magnet stator.

1.4 Tujuan

Berdasarkan pemaparan latar belakang dan rumusan masalah di atas, tujuan dari pelaksanaan penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- Merancang motor dengan penggerak gabungan elektromagnet-magnet permanen menggunakan model pendekatan dipol magnetik.
- Menganalisis karakteristik torsi rotor terhadap fasa rotor dan performa energi keluaran per putaran hasil simulasi FEM dari konfigurasi motor hasil perancangan.
- Memperoleh galat torsi dari masing-masing konfigurasi motor hasil perancangan berdasarkan hasil metode pendekatan dipol magnetik dengan hasil simulasi menggunakan metode elemen hingga.

1.5 Sistematika Laporan

Laporan penelitian Tugas Akhir ini akan disusun secara sistematis dibagi dalam beberapa bab, dengan perincian sebagai berikut:

BAB I Pendahuluan

Bab ini berisikan penjelasan latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, metodologi penelitian dan sistematika laporan.

BAB II Dasar Teori

Pada bab ini membahas secara singkat teori-teori yang terkait dalam penulisan Tugas Akhir.

BAB III Metodologi Penelitian

Dalam bab ini akan dijelaskan mengenai detail langkah - langkah yang harus dilalui untuk mencapai tujuan dan kesimpulan akhir dari penelitian. Keluaran akhir dari tahap ini adalah perhitungan dan model yang siap untuk disimulasikan dan juga dianalisa.

BAB IV Analisis dan Pembahasan

Bab ini merupakan kelanjutan dari Bab III, dimana simulasi yang didapatkan berupa grafik perbandingan, lalu dilakukan analisa-analisa serta pembahasan yang berorientasi pada tujuan penelitian yang telah ditetapkan sebelumnya.

BAB V Kesimpulan dan Saran

Bab ini berisi tentang kesimpulan pokok dari seluruh rangkaian kegiatan penelitian yang telah dilakukan dan saran yang dapat digunakan sebagai pengembangan penelitian selanjutnya.

'' Halaman ini sengaja dikosongkan''

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Motor Magnet Permanen (PM Motor)

Motor magnet permanen (atau biasa disebut motor PM) adalah divais penggerak (propulsi) yang menggunakan komponen magnet sebagai salah satu pendorongnya. Secara sempit, motor PM didefinisikan sebagai motor listrik yang memanfaatkan interaksi elektromagnet mekanis antara (vang berasal kumparan/induktor) dengan magnet untuk permanen menghasilkan gaya putar pada rotor. Keunggulan motor magnet permanen dibandingkan motor listrik lainnya secara umum adalah memiliki power-to-weight ratio dan efisiensi yang relatif tinggi. Motor PM saat ini telah dipakai secara luas di berbagai aplikasi semisal sebagai propulsi kendaraan, penggerak kipas, dan positioner.

Jenis-jenis motor PM dapat dibedakan berdasarkan konfigurasi, cara kerjanya, dan proses pembangkitannya. Secara cara kerja, motor PM dibedakan menjadi dua yakni *rotary* dan *stepper*. Berdasarkan proses pembangkitannya, dikenal istilah *synchronous* dan *asynchronous* yang merujuk pada karakteristik arus listrik masukan yang digunakan (DC atau AC). Berdasarkan konfigurasinya, saat ini dikenal beberapa istilah diantaranya *brushless*.

2.2 Magnet Permanen Neodymium-Besi-Boron (NdFeB)

Magnet permanen adalah suatu materi yang memiliki sifat kemagnetan yang cenderung tetap dan relatif terhadap perlakuan yang diberikan. Kecenderungan sifat kemagnetan yang tetap ini dilihat dari kekonsistenan besar energi intrinsik magnet atau kecilnya perubahan magnetisasi oleh pengaruh medan luar. Karakter magnet seperti ini berguna dalam aplikasi yang memerlukan sumber medan magnet dengan kuat medan yang (diharapkan) tetap semisal motor listrik, suspensi kendaraan, dan loudspeaker. Magnet permanen dapat dikategorikan berdasarkan

kelompok material penyusun (logam, keramik, tanah jarang) ataupun kekuatan magnetik (lemah, kuat).

Terkait pada teknologi motor saat ini, magnet permanen merupakan komponen utama dalam motor listrik konvensional. Magnet permanen dibutuhkan dalam membentuk reaksi gaya (dorong maupun tarik) dengan komponen kumparan (induktor) sehingga resultannya menghasilkan gaya putar pada komponen yang bergerak (rotor). Prinsip yang digunakan dalam proses ini adalah reaksi gaya pada suatu magnetisasi (dalam hal ini magnet permanen) dalam suatu medan magnet (dalam hal ini dihasilkan oleh induktor/kumparan) dimana salah satu komponen tersebut bertindak sebagai rotor. Untuk mendapatkan resultan gaya yang positif pada motor konvensional, kumparan harus membangkitkan medan yang berubah-ubah (biasanya sinusoidal) agar terjadi gaya tolak dan tarik yang sinergis. Medan dari kumparan yang berubah ubah dapat mempengaruhi magnetisasi pada magnet permanen yang digunakan. Apabila magnet tersebut tidak konsisten dalam menghadapi medan magnet yang diberikan, maka magnet tersebut mudah ter-demagnetisasi sehingga lama fungsionalitasnya akan hilang pada motor tersebut. Untuk itu, material magnet permanen dengan diperlukan (kekonsistenan) yang sesuai dengan karakteristik motor yang digunakan.

Salah satu material magnet permanen yang banyak digunakan dalam aplikasi motor magnet permanen adalah Nd-Fe-B. Adapun salah satu standar *grade* magnet jenis ini adalah N35. NdFeB merupakan salah satu material magnet berbasis material tanah jarang. Magnet NdFeB juga merupakan salah satu jenis magnet yang banyak digunakan di berbagai aplikasi dan tergolong memiliki produk energi (BH_{max}) terbesar dibandingkan magnet berbasis tanah jarang yang lain.



Gambar 2.1 Salah Satu Contoh Magnet NdFeB (sumber images.yaoota.com)

Keunggulan dari magnet NdFeB adalah diantaranya memiliki kekuatan produk energi yang besar. Selain itu, magnet ini juga mudah ditemukan di pasar. Magnet ini biasa dijual dalam bentuk bermacam-macam diantaranya silinder, balok, dan cincin. Penggunaan magnet ini seringkali terkhusus pada penggunaan eksperimental ataupun hobi.

2.3 Analisa Magnetostika dengan Model Muatan

Secara eksak, model dasar interaksi magnetik diturunkan dari persamaan maxwell. Umumnya, interaksi magnetik berkaitan dengan parameter rapat fluks magnetik (B). Persamaan maxwell menyatakan bahwa divergensi rapat fluks magnetik pada sumber magnet statis adalah nol, dimana ekspresinya dalam persamaan matematis menjadi :

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \tag{2.1}$$

dan dalam bentuk integral:

$$\oint_{S} \mathbf{B} \cdot ds = 0 \tag{2.2}$$

Konsep matematis ini muncul karena fluks magnetik digambarkan sebagai vektor garis dengan resultan tertutup (*loop*) akibat efek dipol (dwikutub) pada pemahaman munculnya medan magnet akibat adanya rotasi arus listrik.

Rapat fluks magnetik (B) memiliki hubungan konstitutif magnetisasi per unit volum (M) dan kuat medan magnetik (H). Hubungan tersebut muncul dari salah satu sifat magnetik material yakni permeabilitas magnetik (μ). Hubungan ini dituliskan sebagai berikut :

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \tag{2.3}$$

Dimana μ_0 adalah permeabilitas magnetik pada ruang vakum. Pada kasus medium linear, homogen dan isotropik, muncul permeabilitas bahan dengan nilaiyang sesuai dengan karakter medium tersebut (μ). Rapat fluks magnetik dituliskan sebagai :

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \tag{2.4}$$

Dan magnetisasi per unit volum dituliskan:

$$\mathbf{M} = \left(\frac{\mu}{\mu_0} + 1\right) \mathbf{H} \tag{2.5}$$

Magnet permanen sebagai sumber medan magnet statis dapat ditemukan dalam berbagai macam geometri dengan dimensi tertentu. Tentunya, geometri berperan dalam bagaimana vektor densitas fluks magnetik terbentuk di sekitar magnet tersebut. Bentuk silinder, balok maupun bentuk lain dengan arah magnetisasi tertentu pula mempengaruhi besar maupun arah dari densitas fluks magnetik di sekitar pada titik tertentu terhadap titik acuan tertentu. Secara umum, permodelan medan magnetik dapat dilakukan dengan dua macam pendekatan analitis, yakni model arus (biasa dikenal dengan nama model Amperian) dan model muatan (biasa dikenal dengan nama model Coulombian). Kedua model ini bersifat ekivalen.

Model muatan merupakan salah satu metode yang berguna dalam perhitungan gaya magnetik dengan menyederhanakan sebuah magnet menjadi suatu distribusi ekuivalen khayal "muatan magnet" [4]. Dalam kasus magnet permanen, model ini dianggap lebih efisien dan representatif karena medan magnetik dihasilkan dari magnet permanen tidak dihasilkan oleh muatan dinamis (arus), melainkan momen-momen dipol yang terbentuk di dalam material tersebut. Permodelan dengan model muatan memperkenalkan dua istilah khusus yakni densitas muatan volumetrik (ρ_m) dan densitas muatan permukaan (σ_m) yang secara matematis didefinisikan sebagai berikut :

$$\rho_m = -\nabla \cdot \mathbf{M}$$

$$\sigma_m = \mathbf{M} \cdot \hat{\mathbf{n}}$$
(2.6)

Selanjutnya dalam perhitungan densitas fluks magnetik (B), dengan model muatan, magnet berada pada ruang bebas, secara umum diekspresikan sebagai :

$$\boldsymbol{B}(\boldsymbol{x}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\int_{V} \frac{\rho_m(\boldsymbol{x}')(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}')}{|\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}'|^3} dv' + \oint_{S} \frac{\sigma_m(\boldsymbol{x}')(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}')}{|\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}'|^3} ds' \right]$$
(2.7)

Analisis terdahulu menyenderhanakan densitas muatan volum (ρ_m) dan permukaan (σ_m) menjadi muatan titik (Q_m) dimana :

$$Q_m(\mathbf{x}') = \rho_m(\mathbf{x}')\Delta V \tag{2.8}$$

atau:

$$Q_m(\mathbf{x}') = \sigma_m(\mathbf{x}')\Delta \mathbf{A} \tag{2.9}$$

Densitas fluks magnetik kemudian ditulis :

$$B(x) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Q_m(x')(x - x')}{|x - x'|^3}$$
 (2.10)

Secara umum, gaya yang dialami oleh magnet akibat pengaruh medan magnet luar B_{ext} diekspresikan :

$$\mathbf{F} = \int_{V} (\mathbf{M} \cdot \nabla) \mathbf{B}_{ext} dv \tag{2.11}$$

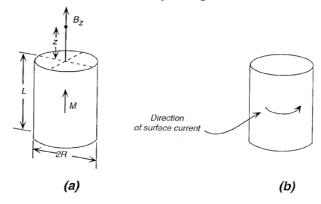
Sedangkan dalam analisis menggunakan muatan titik (Q_m) , dimana terdapat magnet 1 dan magnet 2, gaya yang dirasakan magnet 1 akibat pengaruh medan dari magnet 2:

$$F_{12} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Q_m(x_1)Q_m(x_2)(x_1 - x_2)}{|x_1 - x_2|^3}$$
 (2.12)

Secara umum untuk geometri, posisi relatif dan arah magnetisasi tertentu pada magnet permanen, solusi untuk besaran fisis magnetik sulit diturunkan secara analitis (karena kelipatan integrasi yang cukup banyak), maka, baik persamaan [2.7] maupun [2.11] diselesaikan dengan metode diskretisasi. Saat ini metode diskretisasi yang paling banyak digunakan dalam komputasi magnetostatik adalah dengan FEM (Finite Element Method/ Metode Elemen Hingga). FEM sering digunakan dalam proses desain maupun simulasi, namun sulit digunakan dalam proses penentuan parameter awal (preliminary sizing) apabila sistem tersebut memiliki variasi parameter tertentu. FEM memerlukan parameter-parameter sistem yang telah ditentukan memenuhi syarat kalkulasi (semisal geometri, magnetisasi, kondisi lingkungan) serta kalkulasi ekstra untuk sistem dinamis karena adanya integrasi terhadap waktu. Untuk itu, dalam kasus pendesainan awal sistem magnetik, pendekatan terhadap masalah sederhana dilakukan untuk mempermudah sizing parameter secara analitis, walaupun dapat dipastikan terjadi galat karena pengabaian terhadap dimensi fisis tertentu.

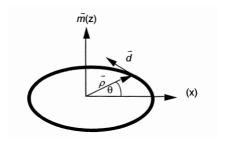
Pendekatan terhadap sistem sederhana harus mempertimbangkan analogi fisis serta efek dimensi yang "tampak" (spesifikasi sistem) terhadap besaran yang akan diperhitungkan. Kasus yang diambil terkait penelitian ini adalah sistem magnetik yang terdiri atas magnet koin (silinder dengan arah magnetisasi homogen dari alas hingga tutup tabung) sebagai sumber medan magnet. Secara geometris, magnet koin (silinder dengan ketebalan yang jauh lebih kecil dibandingkan diameternya) hampir sama

dengan dipol magnetik (arus listrik yang mengorbit sumbu magnetisasi). Magnet silinder, bila dimodelkan dengan model amperian, adalah dipol yang diintegrasikan terhadap sumbu magnetisasi (ketebalan), sama halnya dengan solenoid.



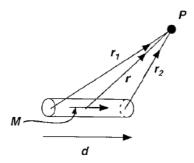
Gambar 2.2 Magnet Silinder : (a) Fisik Magnet; dan (b) Arus Permukaan Ekuivalen (Furlani, 2001)

Apabila ketebalan silinder mendekati nol, maka selimut kelilingnya dapat didekatkan sebagai kawat berarus pada dipol magnetik :



Gambar 2.3 Geometri dari Rangkaian Umum Momen Dipol Magnetik (Furlani, 2001)

Dipol magnetik dapat dimodelkan sebagai muatan titik $(Q_{\rm m})$ pada masing-masing kutubnya dan berlawanan tanda $(+Q_{\rm m}$ dan - $Q_{\rm m})$:



Gambar 2.4 Dipol Magnetik (Furlani, 2001)

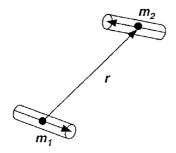
dimana besarnya bernilai:

$$Q_m = M_s \pi a^2 \tag{2.13}$$

dan besarnya momen dipol adalah:

$$\boldsymbol{m} = Q_m \boldsymbol{d} \tag{2.14}$$

Model yang ditawarkan pada referensi [1] berlaku ketika magnet dimodelkan sebagai dipol.



Gambar 2.5 Interaksi Dua Dipol Magnetik yang Terpisah Pada Jarak Sebesar *r* (Furlani, 2001)

Rumus gaya interaksi antar dipol yang ditunjukkan pada gambar (3.3) adalah :

$$F_{12} = \frac{3\mu_0}{4\pi r^5} \left[(m_1 \cdot m_2)r + (m_1 \cdot r)m_2 + (m_2 \cdot r)m_1 - \frac{5(m_1 \cdot r)(m_2 \cdot r)r}{r^2} \right]$$
(2.15)

Referensi lain [3] juga mencoba melakukan validasi terhadap model rancangannya untuk gaya interaksi antar dipol. Dalam eksperimennya, mereka menggunakan *loop* kawat berjari-jari 10 cm dan referensi pengukuran pada jarak 1 m. Hasil dari validasi tersebut menunjukkan bahwa metode tersebut relevan untuk di atas jarak 7 kalinya jari-jari *loop*. Sayangnya, dari pemeriksaan terhadap persamaan yang dituliskan pada jurnal tersebut, kami anggap telah mengalami kesalahan pengetikan karena kami menemukan adanya ketidakserasian dimensi pada akibat salah satu bilangan ekspansi pada fraksi induk. Namun di sisi lain, persamaan tersebut memiliki kemiripan dengan [1] dari segi model, fraksi, dan koefisiennya dimana perbedaannya hanya sebatas pada rasio induk (lihat referensi [3]).

2.4 Galat Pada Gaya Interaksi Antar Magnet dengan Pendekatan Dipol

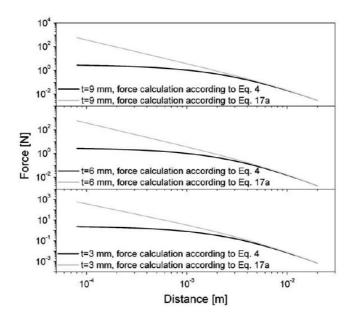
Vokoun *et.al* mensintesis model untuk gaya interaksi antar magnet permanen silinder yang identik. Model tersebut digunakan ketika kedua magnet permanen barada pada satu sumbu magnetisasi yang sama, sehingga tidak melibatkan pengaruh perubahan arah. Model tersebut menggunakan fungsi Bessel termodifikasi [3]:

$$F_z = -8\pi K_d R^2 \int_0^{+\infty} \frac{J_1^2(q)}{q} \sinh(q\tau_1) \sinh(q\tau_2) e^{-q\zeta} dq \ (2.16)$$

Sebagai pembanding, rumus gaya tersebut dikembangkan dengan berbagai pendekatan dimana magnet permanen didekati sebagai dipol (sehingga validasinya terbatas):

$$F_z \approx \frac{-\mu_0 \pi M^2 a^4}{4} \left(\frac{1}{x^2} + \frac{1}{(x+2t)^2} - \frac{2}{(x+t)^2} \right)$$
 (2.17)

Perbandingan dilakukan dengan obejek magnet silinder dengan diameter 3 mm dan *aspect ratio* bervariasi. Berikut merupakan data hasil perbandingan gaya berdasarkan perhitungan menggunakan rumus [2.16] dengan rumus [2.17]:



Gambar 2.6 Perbandingan Gaya Interaksi Magnet Terhadap Jarak Menggunakan Persamaan (2.16) dan Persamaan (2.17) (Furlani, 2001)

Mengacu pada data tersebut, memiliki hubungan gaya yang cukup serasi pada jarak interaksi di atas sekitar 10 kalinya (3 cm). Gaya yang diakibatkan oleh interaksi antar dua magnet permanen yang identik, dengan dimensinya yang jauh lebih kecil dari jarak interaksinya, memiliki galat yang sangat kecil terhadap metode integral yang diajukan (2.16).

2.5 Analisis Elemen Hingga (FEA)

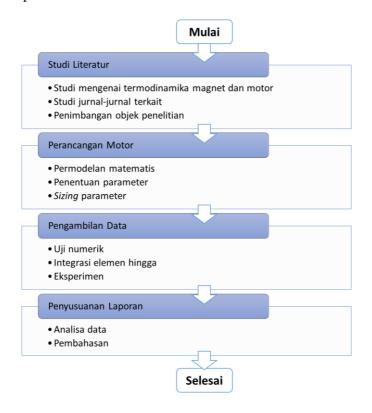
Elemen hingga merupakan metode yang terbukti secara umum bersifat fleksbel, handal, dan ekfektif dalam analisis dan sintesis daya-frekuensi dan divais elektromekanik (Gieras, 2004). Metode ini dibangun untuk menyelesaikan permasalahan terkait diferensial parsial dan solusi integral yang rumit. Sifat dan besaran kemagnetan yang dibangun atas persamaan Maxwell sulit diturunkan secara analitik untuk berbagai kasus geometri dan posisi karena integral permukaan dan volume merupakan faktor dari besaran magnet fungsi posisi. Metode ini disingkat sebagai FEM (finite element method).

'' Halaman ini sengaja dikosongkan''

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Pelaksanaan Tugas Akhir

Diagram alir digunakan untuk mempermudah alur penelitian agar sesuai dengan tujuan yang diharapkan. Bab ini berisi uraian tentang tahapan-tahapan pengerjaan dalam tugas akhir mulai dari studi literatur, pemodelan sistem, perancangan sistem kendali, simulasi FEMM 4.2 hingga penyusunan laporan tugas akhir. Gambar 3.1 merupakan diagram alir tugas akhir yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 3.1 Diagram Alir Pelaksanaan Tugas Akhir

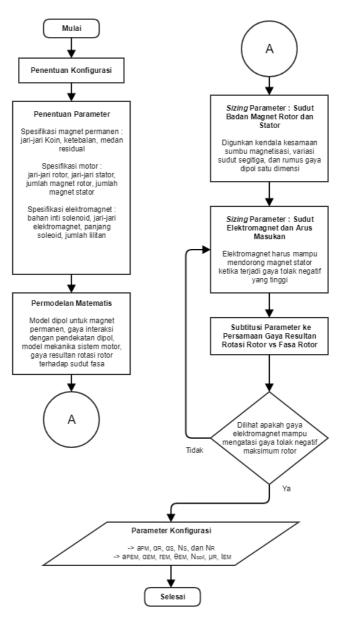
3.2 Studi Literatur

Pada penelitian ini, dilakukan studi literatur mengenai analisis kemagnetan, interaksi, serta hubungannya dengan konfigurasi motor. Adapun buku teks utama yang digunakan adalah Permanent Magnet and *Electromechanical Devices* (Furlani, 2001). Jurnal ilmiah utama yang digunakan adalah Magnetostatic interactions and forces between cylindrical permanent magnet (Vokoun et.al, 2009). Adapun referensi lain yang mendukung dasar teori serta pertimbangan-pertimbangan dalam peneltian ini namun tidak ditentukan untuk dituliskan.

Pertimbangan objek penelitian didasarkan pada ketersediaan serta kemungkinan untuk didapatkan dan dilakukan untuk penelitian ini. Karakteristik magnet permanen, inti logam, serta beberapa material lain yang merupakan faktor penelitian telah dipastikan ketersediaannya di pasar disertai dengan data pabrik standar (data sekunder).

3.3 Perancangan Motor Magnet Permanen Berpendorong Gabungan Elektromagnet – Magnet NdFeB dengan Pendekatan Dipol

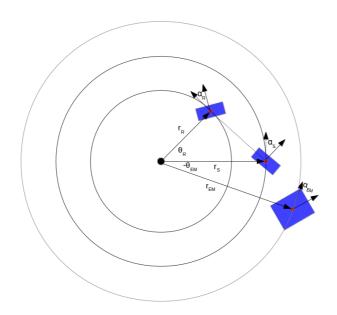
Adapun dalam perancangan motor ini terbagi menjadi lima tahap. Tahap pertama adalah penentuan konfigurasi, yakni layout seperti apa dinamika motor yang akan dirancang. Tahap ke-dua adalah penentuan parameter. Tahap ke-tiga adalah penentuan parameter desain. Tahap ke-empat adalah permodelan matematis, dimana pada tahap ini parameter desain terbagi menjadi parameter teroptimalisasi dan parameter perlakuan. Tahap terakhir adalah sizing parameter. Secara detail, alur perancangan motor dijelaskan melalui bagan berikut:



Gambar 3.2 Langkah-Langkah Perancangan Motor

3.3.1 Penentuan Konfigurasi Motor Magnet Permanen

Konfigurasi merupakan susunan komponen-komponen sistem dalam menjalankan mekanisme tertentu. Konfigurasi yang digunakan dalam perancangan motor ini didefinisikan seperti yang ditampilakan pada gambar 3.3.



Gambar 3.3 Konfigurasi Motor Magnet Permanen

Dari gambar 3.3, gambar kotak berwarna biru (berturutturut pada lingkaran terluar hingga terdalam) adalah elektromagnet, magnet stator, dan magnet rotor. Pada konfigurasi ini, motor bergerak secara angular dan terdiri atas dua bagian mekanis yaitu rotor dan stator. Rotor merupakan komponen sistem yang bergerak sepanjang trayektori lingkaran berjari-jari r_R sebesar sudut θ_R terhadap sumbu x positif, dimana magnet permanen rotor berjumlah N_R terdistribusi merata di sepanjang lingkaran dan berarah polarisasi $-\alpha_R$ terhadap arah geraknya. Stator merupakan komponen sistem yang tidak bergerak ($\theta_S = 0^\circ$) dengan spesifikasi

yang sama dengan stator. Dalam konfigurasi ini, sudut pandang pendorong gerak sistem adalah stator. Dengan kata lain, magnet permanen stator dipandang sebagai pemberi gaya dorong terhadap magnet permanen rotor. Oleh karena itu, elektromagnet sebagai pendukung pendorong rotor ditempatkan pada stator juga.

Spesifikasi magnet yang digunakan dalam konfigurasi ini kami tetapkan identik untuk memudahkan pengujian dan penarikan kesimpulan.

3.3.2 Penentuan Parameter dan Variabel Perancangan Motor Magnet

Parameter dan variabel yang diperlukan dalam perancangan ini terdiri atas dua kelompok, yakni parameter dan variabel konfigurasi dan parameter konstan. Parameter konfigurasi pada dasarnya merupakan keluaran dari penelitian perancangan ini, sedangkan parameter konstan merupakan masukan desain yang didasarkan pada ketersediaan data dan objek, batasan masalah, pertimbangan referensi serta dipersempit dengan hasil uji coba model matematis.

Khusus magnet permanen, adapun spesifikasi yang digunakan ialah sebagai berikut :

Tabel 3.1 Nilai Parameter Magnetik dari Magnet NdFeB N35 (HKCM, 2015)

Spesifikasi	Nilai	Satuan
Induksi sisa, B_r	1.17-1.22	T
Gaya koersif, H_{cb}	0.868	A/m
Gaya koersif intrinsik, H_{cj}	0.955	A/m
Produk energi, BH_{max}	0.263-0.287	J/m ³
Suhu operasi maksimum	80	°C
Jari-jari badan magnet permanen	0.015	M
Tebal badan magnet permanen	0.005	M

Ada beberapa parameter dan variabel yang akan digunakan dalam proses perhitungan, simulasi dan variasi konfigurasi motor. Parameter dan variabel ini disebut parameter dan variabel konfigurasi yang tertera pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Parameter dan Variabel Konfigurasi Magnet Permanen Rotor-Stator

Definisi	Simbol	Nilai	Satuan
Jari-jari badan magnet permanen	агм	0.015	M
Tebal badan magnet permanen	L_{PM}	0.005	M
Sudut yang dibentuk oleh titik pusat badan magnet permanen dengan sumbu 'x' positif	θ_R ; θ_S	0 – 360 ; 0	° (deg)
Jari-jari lintasan, jarak titik pusat badan magnet permanen terhadap titik pusat rotasi sistem 'O'	r _R ; r _S	0.15; 0.18	m
Sudut negatif yang dibentuk oleh arah polarisasi magnet permanen terhadap arah gerak linearnya	α _R ; α _S	diperlukan sizing	° (deg)
Jumlah magnet permanen	N_R ; N_S	Variasi, $N_S = 6$	Tidak berdimensi

Pertimbangan pemilihan nilai-nilai parameter di atas antara lain dijelaskan sebagai berikut :

$a. a_{PM}$

Luasan bidang magnet permanen yang searah dengan arah magnetisasinya merupakan faktor besar gaya interaksi. Maka untuk memaksimalkan gaya, diperlukan magnet koin dengan diameter terbesar (sesuai yang ada di pasaran). Diameter yang digunakan yakni 30 mm.

b. L_{PM}

Ketebalan yang tipis merupakan syarat agar suatu magnet dapat dimodelkan sebagai dipol. Ketebalan magnet permanen yang digunakan disesuaikan dengan ketersediaannya di pasar, yakni 5 mm untuk diameter 30 mm.

c. $\theta_R \operatorname{dan} \theta_S$

Pemilihan nilai sudut magnet permanen rotor bervariasi dari 0° hingga 360° karena merupakan parameter karakterisasi, sesuai dengan tujuan kedua penelitian yakni mengetahui karakter torsi rotor dalam satu putaran penuh. Nilai sudut magnet permanen stator bernilai nol berfungsi sebagai referensi, dimana besarnya sudut kelipatan yang dibentuk akibat jumlah magnet permanen rotor (N_R) dan jumlah magnet permanen stator (N_S) . Besarnya beda sudut dari masing-masing magnet permanen akan diacu nilainya dari ini, termasuk penentuan nilai sudut pendorong elektromagnet nantinya.

d. $r_R \operatorname{dan} r_S$

Faktor besar gaya dorong antar dua magnet salah satunya adalah jarak celah/interaksi (air gap) diantara keduanya. Pada buku Furlani disebutkan bahwa model dipol berlaku apabila jarak interaksi diantara keduanya jauh lebih besar dibandingkan ketebalan magnetnya [1]. Karena tidak ada referensi yang menyebutkan bagaimana batas yang tepat untuk memenuhi kondisi tersebut, maka diasumsikan jarak 30 mm jauh lebih besar dibandingkan ketebalan magnet permanen yaitu 5 mm. Nilai ini detentukan bahwa gaya interaksi semakin besar (harapan) seiring kecilnya jarak interaksi [3], dan batas jarak minimum bagi masingmasing badan magnet permanen untuk dapat divariasikan adalah sebesar jari-jari magnet permanen stator ditambah jari-jari magnet permanen rotor yakni 30 mm.

e. $\alpha_R \operatorname{dan} \alpha_S$

Sudut badan magnet rotor dan stator masing-masing ditentukan dengan menggunakan konsep "muatan dipol" [2] dimana salah satu faktor gaya adalah luas permukaan interaksi dan vektor medan magnet. Pada magnet permanen yang digunakan, arah magnetisasi searah dengan bidang alas silinder, dimana bidang ini merupakan komponen permukaan yang terluas. Oleh karena itu, kriteria dalam melakukan *sizing* sudut badan magnet permanen rotor dan stator adalah, arah magnetisasi magnet

permanen stator dan rotor keduanya berada pada sumbu yang sama, dan pada saat sudut rotor berapa untuk didapatkan nilai gaya tolak terbesar (menggunakan konsep segitiga pada gambar 3.2)

f. $N_R \operatorname{dan} N_S$

Penentuan jumlah magnet permanen stator merujuk pada bagaimana karakter gaya rotasi terhadap sudut rotor untuk satu magnet permanen stator dan satu magnet permanen rotor. Rentang sudut rotor dimana gaya bernilai di atas sekitar 0.1 N (gaya yang bernilai di bawah nilai ini dianggap diabaikan) merupakan batas dimana gaya tersebut tidak boleh diganggu oleh interaksi antar magnet permanen lain pada sudut yang lain. Dari gambar 3.5, diketahui rentang gaya yang terjadi mendekati $\pm 60^{\circ}$ (-30° hingga 30°), dan nilai 60° digunakan untuk memudahkan analisis. Jadi jumlah magnet permanen stator adalah nilai sudut dalam satu putaran penuh per rentang sudut tersebut, yakni :

$$N_S = \frac{360^0}{60^0} = 6 \tag{3.1}$$

Khusus jumlah magnet permanen rotor, variasi dilakukan dengan nilai 4 dan 8.

Khusus pendorong elektromagnet, konfigurasi yang digunakan adalah solenoid silinder. Fungsi kerja dari komponen ini adalah mendorong rotor ketika gaya berarah negatif (terhadap arah putaran seharusnya) terjadi pada magnet permanen rotor. Adapun spesifikasi yang ditentukan sebagai berikut :

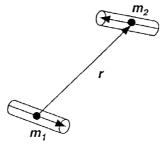
Tabel 3.3 Spesifikasi Pendorong Elektromagnet

Spesifikasi	Simbol	Jenis/Nilai	Satuan
Material inti,	μ_r	Steel 1018	
permeabilitas relatif			
Jumlah lilitan kumparan	N_{coil}	200	
Panjang solenoid	l_{EM}	0.05	M
Tegangan sirkuit	V_C	maksimal 48	Volt
Arus masukan	I_{EM}	diperlukan sizing	A
Jari-jari silinder,	аем	0.015	M
Jari-jari lintasan, jarak	reм	0.2025	M
antara badan			
elektromagnet dengan			
titik pusat sistem 'O',			
<i>т</i> ЕМ			
Sudut negatif yang	αем	diperlukan sizing	o (deg)
dibentuk oleh arah			
polarisasi			
elektromagnet terhadap			
lintasan lingkaran			
Sudut yang dibentuk	θ_{EM}	diperlukan sizing	o (deg)
oleh titik pusat badan			
elektromagnet dengan			
sumbu x positif			

3.3.3 Pemodelan Matematis

Pemodelan bertujuan menggambarkan karakteristik sistem terhadap suatu perlakuan. Selain itu, model matematis yang dihasilkan dari pemodelan berguna dalam memperhitungkan kriteria, *sizing*, serta optimalisasi nilai variabel.

Pada penelitian ini digunakan magnet permanen NdFeB kelas N35 dengan dimensi yang telah ditentukan pada penentuan parameter, dimana model magnet permanen ini didekati sebagai dipol [1]. Merujuk pada Furlani, interaksi gaya antar dua dipol magnetik dimodelkan sebagai berikut :



Gambar 3.4 Model Dipol Magnetik (Furlani, 2001)

$$F_{12} = \frac{3\mu_0}{4\pi r^5} \left[(m_1 \cdot m_2)r + (m_1 \cdot r)m_2 + (m_2 \cdot r)m_1 - \frac{5(m_1 \cdot r)(m_2 \cdot r)r}{r^2} \right]$$
(3.2)

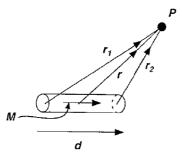
Dimana:

 F_{12} : Gaya yang dirasakan dipol (2) akibat dipol (1) : Permeabilitas magnetik pada ruang vakum

r : Jarak antar dipol

m : momen magnetik dipol

Sedangkan untuk memodelkan momen dipol m, diperkenalkan istilah muatan muka Q_m (surface charge). Pada kasus pendekatan dipol, dituliskan hubungan sebagai berikut :



Gambar 3.5 Momen Dipol Magnetik (Furlani, 2001)

$$\mathbf{m} = Q_m \mathbf{d} \tag{3.2}$$

dimana:

$$Q_m = M_s \pi a_{PM}^2 \tag{3.3}$$

dan:

$$M_S = \frac{B_r}{\mu_0} \tag{3.4}$$

Persamaan F_{12} kemudian diformulasi ulang dengan pendefinisan baru (dapat dilihat pada tabel 3.5) menjadi :

$$F_{SR} = \frac{_{3\mu_{0}}}{_{4\pi r_{gap}^{5}}} \left[(m_{S} \cdot m_{R}) r_{gap} + (m_{S} \cdot r_{gap}) m_{R} + (m_{R} \cdot r_{gap}) m_{S} - \frac{_{5}(m_{S} \cdot r_{gap}) (m_{R} \cdot r_{gap}) r_{gap}}{r_{gap}^{2}} \right]$$

$$(3.5)$$

Perlu diketahui bahwa nilai α_S dan α_R perlu dicari terlebih dahulu, sedangkan θ_R adalah parameter karakterisasi (berubah dari 0 hingga 360 derajat) serta θ_S bernilai nol dan tidak berubah. Untuk itu, perlu dibangun model matematis sebagai fungsi θ_R , α_R dan α_S . Dalam melakukan permodelan, dilakukan pemecahan komponen vektor ke dalam satuan kartesian (tanpa melibatkan komponen sumbu z). Pemodelan dinamika sistem sesuai dengan konfigurasi pada gambar 3.2 dan nilai-nilai parameter pada tabel 3.1 adalah sebagai berikut :

Tabel 3.4 Permodelan Matematis Komponen Dinamika Rancangan Motor

Pemodelan	Simbol	Fungsi Matematis
'muatan magnetik' permukaan magnet permanen	Q_{PM}	$M_s\pi a_{PM}^2$
kutub utara magnet permanen rotor	x_{O_R}	$\begin{bmatrix} r_R \cos(\theta_R) + \frac{L_{PM}}{2} \cos(\theta_R + 90 - \alpha_R) \\ r_R \sin(\theta_R) + \frac{L_{PM}}{2} \sin(\theta_R + 90 - \alpha_R) \end{bmatrix}$
kutub selatan magnet permanen rotor	x_{I_R}	$\begin{bmatrix} r_R \cos(\theta_R) + \frac{L_{PM}}{2} \cos(\theta_R + 270 - \alpha_R) \\ r_R \sin(\theta_R) + \frac{L_{PM}}{2} \sin(\theta_R + 270 - \alpha_R) \end{bmatrix}$
titik pusat badan magnet permanen rotor	x_{0_R}	$\begin{bmatrix} r_R \cos(\theta_R) \\ r_R \sin(\theta_R) \end{bmatrix}$
vektor panjang magnetisasi magnet permanen rotor	d_R	$x_{O_R} - x_{I_R}$
kutub utara magnet permanen stator	x_{o_s}	$\begin{bmatrix} r_S \cos(\theta_S) + \frac{L_{PM}}{2} \cos(\theta_S + 90 - \alpha_S) \\ r_S \sin(\theta_S) + \frac{L_{PM}}{2} \sin(\theta_S + 90 - \alpha_S) \end{bmatrix}$
kutub selatan magnet permanen stator	x_{I_S}	$\begin{bmatrix} r_S \cos(\theta_S) + \frac{L_{PM}}{2} \cos(\theta_S + 270 - \alpha_S) \\ r_S \sin(\theta_S) + \frac{L_{PM}}{2} \sin(\theta_S + 270 - \alpha_S) \end{bmatrix}$
titik pusat badan magnet permanen stator	x_{0s}	$\begin{bmatrix} r_S \cos(\theta_S) \\ r_S \sin(\theta_S) \end{bmatrix}$
vektor panjang magnetisasi magnet permanen stator	d_S	$x_{O_S}-x_{I_S}$
vektor lebar gap udara antara magnet permanen rotor – stator	r_{gap}	$x_{0_S}-x_{0_R}$

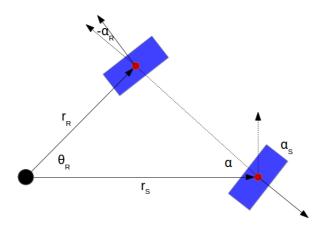
Hasil subtitusi persamaan pada tabel 3.4 ke persamaan [3.5] menghasilkan vektor gaya yang dialami magnet permanen rotor pada komponen sumbu x dan y. Untuk mendapatkan resultannya terhadap arah putar positifnya (berlawanan arah jarum jam), maka gaya putar positif rotor (disimbolkan dengan F_R) dirumuskan dengan :

$$F_R = \begin{bmatrix} \sin(\theta_R) \\ -\sin(90 - \theta_R) \end{bmatrix} \cdot \mathbf{F}_{SR}$$
 (3.6)

3.3.3 Sizing Parameter

Berdasarkan penentuan parameter sebelumnya, parameterparameter yang perlu dilakukan sizing antara lain α_R , α_S , α_{EM} , θ_{EM} , dan N_{coil} . Sizing parameter-parameter tersebut dilakukan secara berurutan, karena dalam penentuan nilai-nilai parameter khusus elektromagnet, perlu diketahui karakteristik gaya negatif (arah putar) antara magnet permanen stator dan magnet permanen rotor dengan sudut terbaik α_R dan α_S .

Merujuk pada tabel 3.6, *sizing* parameter α_R dan α_S harus memenuhi kriteria yakni gaya dorong putar positif pada rotor (disimbolkan dengan F_{rot}) harus mencapai nilai tertingginya dengan peyempitan batasan bahwa nilai tersebut dapat dicapai pada saat kutub-kutub magnet permanen rotor dan magnet permanen stator berada pada satu garis [2]. Dengan demikian, proses *sizing* parameter α_R dan α_S dapat diarahkan menjadi analisa geometri segitiga:



Gambar 3.6 Hubungan α_R dan α_S dengan Konsep Segitiga

Pada segitiga tersebut, diperkenalkan parameter baru yaitu α , dimana:

$$\alpha = 90 + \alpha_S \tag{3.7}$$

Jumlah sudut dalam segitiga:

$$\theta_R + (90 - \alpha_R) + \alpha = 180$$
 (3.8)
 $\theta_R + (90 - \alpha_R) + (90 + \alpha_S) = 180$ (3.9)

$$\theta_R + (90 - \alpha_R) + (90 + \alpha_S) = 180$$
 (3.9)

sehingga:

$$\alpha_R = \theta_R + \alpha_S \tag{3.10}$$

x adalah jarak gap antara magnet permanen rotor dengan magnet permanen stator (dimana ketebalan magnet permanen diabaikan karena relatif sangat kecil). Dengan menggunakan aturan cosinus, x dapat dituliskan sebagai:

$$x = \sqrt{r_R^2 + r_S^2 + r_R r_S \cos(\theta_R)}$$
 (3.11)

Aturan sinus dapat digunakan untuk mengetahui persamaan lain dari parameter α . Pada kasus segitiga ini, dapat dituliskan :

$$\frac{r_R}{\sin(\alpha)} = \frac{r_S}{\sin(90 - \alpha_R)} = \frac{x}{\sin(\theta_R)}$$
 (3.12)

sehingga:

$$\alpha = \sin^{-1}(\frac{r_R}{x}\sin(\theta_R)) \tag{3.13}$$

Rumus gaya antar 2 magnet dengan posisi dan arah magnetisasi berada pada satu sumbu dituliskan sebagai pendekatan interaksi dua dipol (Vokoun, 2009):

$$F_Z \approx \frac{-\mu_0 \pi M^2 a^4}{4} \left(\frac{1}{x^2} + \frac{1}{(x+2t)^2} - \frac{2}{(x+t)^2} \right)$$
 (3.14)

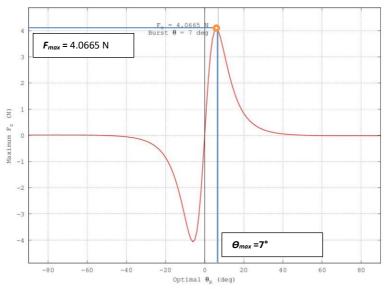
dimana a adalah jari-jari magnet permanen dan t adalah ketebalan magnet permanen. Dengan mengganti variabel-variabel pada F_z dengan parameter-parameter yang telah ditentukan, maka persamaan F_z ditulis :

$$F_Z \approx \frac{-\mu_0 \pi M_{PM}^2 a_{PM}^4}{4} \left(\frac{1}{x^2} + \frac{1}{(x + 2L_{PM})^2} - \frac{2}{(x + L_{PM})^2} \right)$$
 (3.15)

Perlu diingat bahwa F_z adalah gaya dorong yang bekerja pada satu sumbu, sedangkan pengaruhnya terhadap resultan gaya putar rotor positif harus terintegrasi dengan perubahan arah yang terjadi. Pengaruh F_z terhadap gaya putar positif rotor F_{rot} dapat dirumuskan menjadi:

$$F_{rot} = (\cos(\theta_R).\sin(\alpha + 180) - \cos(90 - \theta_R).\cos(\alpha + 180))F_{\tau}$$
(3.16)

Dengan batas θ_R dari 0° hingga 360°, atau bisa disederhanakan menjadi -90° sampai 90° untuk mempermudah analisa sehingga dengan mensubtitusikan batas tersebut ke dalam persamaan 3.16 diperoleh karakteristik gaya putar positif seperti tertera pada Gambar 3.7. Pada Gambar 3.7, terlihat gaya putar F_{rot} bervariasi terhadap perubahan sudut θ_R dimana gaya putar positif terbesar terjadi pada saat θ_R sebesar 7° dengan nilai 4,0665 N.



Gambar 3.7 Karakter Gaya Putar Positif F_{rot} Terhadap θ_R Sesuai Kriteria $Sizing \alpha_R$ dan α_S

Hal ini menandakan bahwa pada saat fasa rotor sebesar 7° terhadap posisi magnet permanen stator, gaya dorong yang dihasilkan bernilai maksimum untuk kasus kedua magnet berada pada satu sumbu magnetisasi yang berlawanan arah.

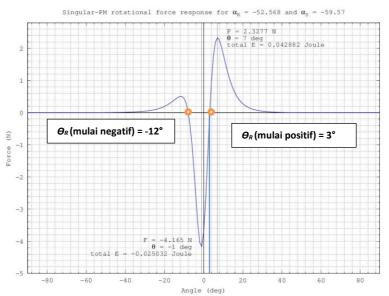
Untuk mendapatkan nilai α_R dan α_S , nilai F_{rot} =4.0665 N dan θ_R =7° kemudian disubtitusikan ke persamaan (3.8), (3.10) dan (3.13), sehingga didapatkan:

$$\alpha_{\rm S} = -59.57^{\rm o} \tag{3.17}$$

dan

$$\alpha_R = -52.57^o \tag{3.18}$$

Setelah nilai parameter α_R dan α_S diketahui, tahap selanjutnya ialah mensubtitusikannya ke persamaan (3.5) guna mengetahui karakteristik alami gaya rotasi rotor terhadap magnet permanen stator. Dengan batas θ_R yang dianalisa adalah dari -90° hingga 90°, didapat karakteristik gaya putar positif rotor antara satu magnet permanen rotor dengan satu magnet permanen stator :



Gambar 3.8 Karakter Gaya Putar Positif Rotor F_R Terhadap θ_R

Hasil dari karakterisasi di atas menunjukkan bahwa, gaya dorong tertinggi teoretis yang mampu dicapai magnet permanen stator terhadap magnet permanen rotor adalah sebesar 2.327 N. Gaya dorong negatif relatif mulai terjadi pada fasa θ_R bernilai -12°. Apabila α_{EM} didesain sama berdasarkan *sizing* untuk α_S

sebelumnya, maka pada saat fasa θ_R inilah elektromagnet didesain untuk mulai mendorong magnet permanen rotor hingga θ_R bernilai 3° (magnet permanen stator mulai mendorong pada arah positif). Untuk mengetahui nilai α_{EM} dan θ_{EM} digunakan hubungan :

$$\alpha_R = \theta_R + \alpha_{EM} \tag{3.19}$$

Karena kutub magnet permanen rotor dengan kutub magnet permanen stator akan segaris apabila θ_R bernilai 7° dimana θ_S bernilai 0, maka untuk θ_R bernilai -12° , θ_{EM} berada pada $-12^{\circ}+(-7^{\circ})$ atau -19° . Dengan demikian didapatkan :

$$\alpha_{EM} = -59.57^o \tag{3.20}$$

dan

$$\theta_{FM} = -19^{\circ} \tag{3.21}$$

Jari-jari sistem elektromagnet ditentukan dengan menyamakan posisi permukaan terdekat ke pusat sistem dengan magnet permanen stator untuk menyamakan karakteristik dorong dengannya:

$$r_{EM} = r_S + \frac{L_{EM} - L_{PM}}{2} \tag{3.22}$$

$$r_{EM} = 0.2025 m \tag{3.23}$$

Selanjutnya dalam penentuan nilai arus masukan I_{EM} disesuaikan dengan seberapa gaya dorong yang dibutuhkan untuk berhasil melawan gaya tolak rotasi negatif dari interaksi antar magnet permanen. Karena penurunan gaya positif rotor terjadi pada saat fasa rotor bernilai -12° dan kembali bernilai positif di 3°, maka kedua angka tersebut dijadikan nilai awal dalam *sizing* arus:

$$F_{EM} = \frac{-F_R(-12^0)}{\cos(\alpha_R)}$$
 (3.24)

$$F_{EM} = 6.8524 \, N \tag{3.25}$$

$$F_{EM} = \frac{\mu_0 Q_{PM} N I_{EM} A}{4\pi r_{gap}^2 L_{EM}} \tag{3.26}$$

Dimana:

$$r_{gap} = \frac{r_S - r_R}{\cos(\theta_{PM})} \tag{3.27}$$

$$r_{gap} = 3.609 \times 10^{-2} \, m \tag{3.28}$$

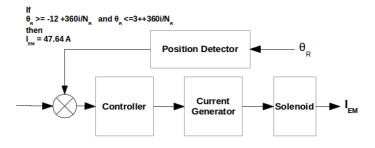
Sehingga:

$$I_{EM} = \frac{4\pi r_{gap}^2 L_{EM}}{\mu_0 Q_{PM} NA} \tag{3.29}$$

$$I_{EM} = 47.64 A \tag{3.30}$$

Selanjutnya dalam penentuan pembangkitan sinyal I_{EM} perlu didefinisikan syarat kontrol yakni elektromagnet harus mendorong magnet permanen rotor ketika fasa tersebut berada pada nilai -12° hingga 3°:

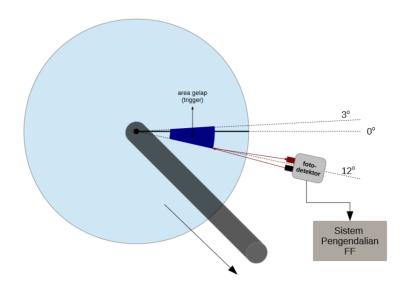
Set point function:



Gambar 3.9 Skema Kontrol Pengaktifan Pendorong

Elektromagnet

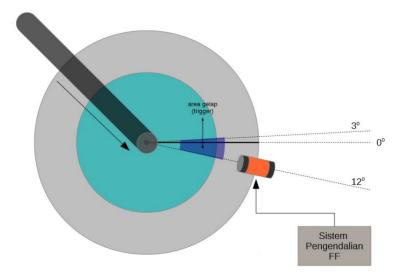
Diagram kontrol di atas bermakna bahwa, ketika sudut magnet permanen rotor berada pada rentang nilai -12° hingga 3° terhadap posisi magnet permanen stator, maka sirkuit kontrol elektromagnet harus membangkitkan arus ke selenoid (I_{EM})sebesar 47.64 A. Untuk dapat mengetahui posisi tersebut, dibuat sistem pembacaan fasa rotor dengan membuat area gelap berbentuk jorong dimulai dari sudut -12° hingga 3°, serta menempatkan sensor berupa fotodetektor pada sisi stator.



Gambar 3.10 Skema Posisi Angular Fotodetektor

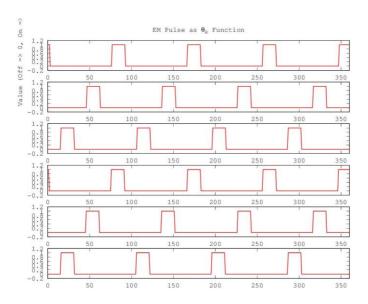
Skema di atas menjelaskan bagaimana penempatan sensor yang menginformasikan posisi rotor dimana arus akan diaktifkan ke elektromagnet. Pada *shaft* rotor dipasang kepingan dengan tanda warna gelap mulai dari sudut -12° hingga 3° terhadap garis 0° referensi rotor, dan disalin secara simetri putar sesuai posisi magnet permanen rotor. Area gelap di sepanjang sudut tersebut kemudian dideteksi oleh fotodetektor (dimana sensor ini ditempatkan pada

posisi -12° pada sisi stator) untuk mengirimkan perintah ke kontroler agar mengaktifkan arus ke solenoid (lihat pada Gambar 3.9).



Gambar 3.11 Skema Posisi Angular Elektromagnet Pada Motor

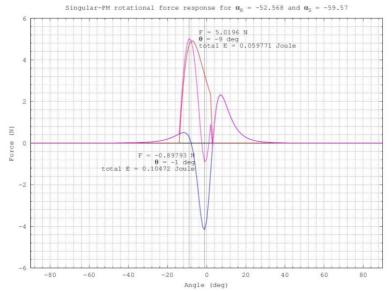
Ketika magnet permanen rotor berada di luar rentang tersebut (termasuk simetri putarnya), I_{EM} bernilai nol dimana gaya dorong selanjutnya dilakukan oleh magnet permanen stator. Karakteristik dinamik pada pembangkitan sinyal I_{EM} ini idealnya adalah step. Pembangkitan sinyal I_{EM} terhadap fasa rotor untuk konfigurasi 6x4 di setiap posisi solenoid digambarkan sebagai berikut:



Gambar 3.12 Fungsi Pembangkitan Sinyal *I_{EM}* Terhadap Fasa Stator untuk Konfigurasi 6x4

Selebihnya mengenai perancangan rangkaian kontrol I_{EM} tidak dilakukan dalam penelitian ini (harapan untuk penelitian selanjutnya) karena perancangannya memperhitungkan faktor permeansi dan respon dinamik pembangkitan medan elektromagnet pada solenoid secara mendalam.

Pembangkitan I_{EM} dengan rentang yang telah ditetapkan kemudian disubtitusikan ke persamaan (3.12) untuk mengetahui karakteristik gaya dorong rotasi setelah diberikan elektromagnet (sesuai dengan fungsi yang ditetapkan). Didapatkan dengan rentang fasa rotor demikian (-12° hingga 3° terhadap magnet stator) dan arus yang terhitung, menghasilkan gaya dorong yang besar dan dominan (walaupun terdapat sedikit rentang fasa rotor dimana terjadi gaya dorong negatif, namun bernilai sangat kecil dibandingkan daerah sekitarnya). Apabila rentang fasa rotor diperbesar ke arah



Gambar 3.13 Karakter Gaya Putar Positif Rotor F_R Terhadap θ_R Setelah Diberikan Kriteria Pengaktifan Elektromagnet (Biru : Hasil Interaksi Antar Magnet Permanen, Merah : Hasil Interaksi Magnet Permanen-Elektromagnet, Magenta : Resultan)

Dalam perhitungan energi keluaran per putaran, digunakan rumus berikut :

$$E_{rot} = \int_0^{360} \frac{T_R(\theta_R)}{2\pi} d\theta_R \tag{3.32}$$

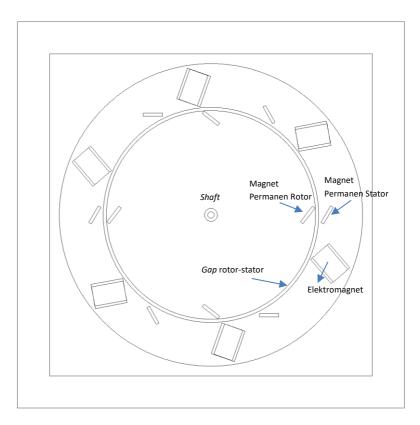
$$E_{rot} = \frac{1}{2\pi} \sum_{\theta_R=0}^{359} T_R \, \Delta \, \theta_R \tag{3.33}$$

Dengan telah ditentukannnya nilai-nilai parameter dan variabel konfigurasi yang telah disebutkan melalui pertimbangan dan proses perhitungan (*sizing*), maka berikut merupakan rekapitulasi nilai-nilai parameter konfigurasi :

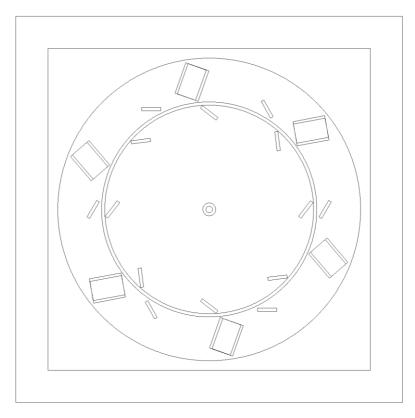
Tabel.3.5 Nilai-Nilai Parameter dan Variabel Konfigurasi

Simbol	Jenis/Nilai	Satuan
B_r	1.17-1.22	T
аРМ	0.015	m
L_{PM}	0.005	m
θ_R ; θ_S	0 - 360; 0	° (deg)
r_R ; r_S	0.15 ; 0.18	m
α_R ; α_S	-52.57 ; -59.57	° (deg)
N_R ; N_S	4 dan 8 ; 6	Tidak berdimensi
μ_r	Steel 1018	
N _{coil}	200	
l_{EM}	0.05	m
IEM	47.64 dan 0 (sesuai pola pada Gambar 3.9)	A
аем	0.015	m
rem	0.2025	m
α_{EM}	-59.67	° (deg)
$ heta_{EM}$	-19	° (deg)

Dengan nilai- nilai parameter yang telah didapatkan pada Tabel 3.5 divisualisasikan desain motor secara dua dimensi sebagai berikut.



Gambar 3.14 Visualisasi Tampak Dua-Dimensi Desain Motor untuk Konfigurasi 6x4



Gambar 3.15 Visualisasi Tampak Dua-Dimensi Desain Motor untuk Konfigurasi 6x8

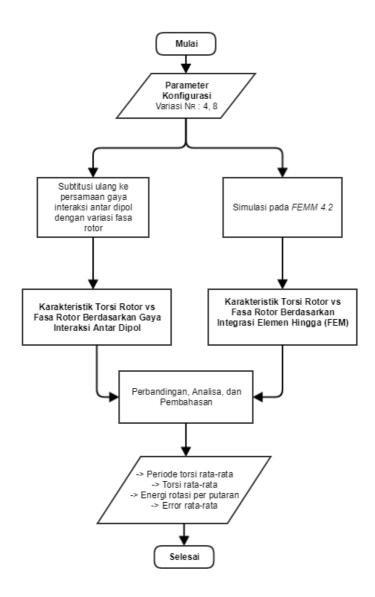
3.4 Pengambilan Data dan Performansi

Untuk dapat mengetahui performa sistem, perlu ditentukan parameter yang menjadi acuannya. Adapun untuk memperinci analisis, dilakukan rancang eksperimental sebagai berikut :

Tabel 3.6 Rancang Simulasi

Sampel	Perlakuan		Grafik	Hasil
$N_R = 4$	$N_S = 6$	Pemasangan	Perhitungan dengan	Karakteristik
$N_R = 8$		magnet	pendekatan dipol	T_R vs θ_R
		permanen stator	(menggunakan	dan energi per
		+ elektromagnet	software GNU Octave	satuan putaran
		dengan	3.8.0	E
		parameter	Integrasi elemen	
		konfigurasi hasil	hingga (FEM)	
		dari permodelan	(menggunakan	
		dengan	software FEMM 4.2	
		pendekatan	-	
		dipol		

Dalam bentuk skema, dapat digambarkan alur dalam tahap ini sebagai berikut :



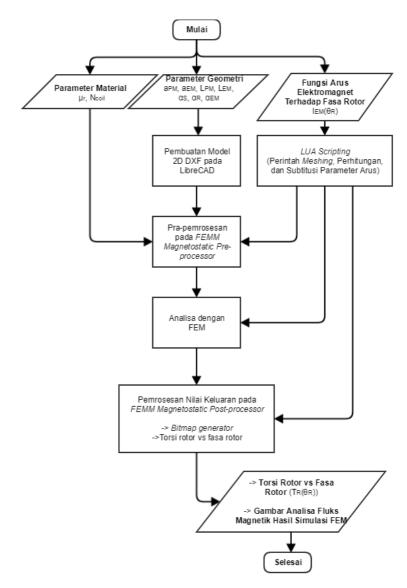
Gambar 3.16 Skema Pengambilan Data dan Analisis

3.4.1 Karakterisasi dengan Pendekatan Dipol

Pengujian numerik dilakukan untuk melihat respon sistem berdasarkan rumusan model yang dibuat dalam persamaan matematika. Pengujian numerik ini menggunakan perangkat lunak setara MATLAB berbasis linux, yakni QtLAB. Dalam pengujiannya, model matematis dan algoritma eksekusi dibuat ke dalam bentuk bahasa pemrograman yang sesuai. Dalam pemrogramannya, nilai-nilai parameter hasil perancangan disubtitusikan kembali ke dalam persamaan gaya interaksi antar dipol di dalam. Karakteristik torsi didapatkan dengan perkaliannya terhadap jari-jari rotor.

3.4.2 Integrasi Elemen Hingga

Metode ini digunakan dalam menguji performa hasil desain yang telah dibuat dengan lingkungan komputasi. Metode ini merupakan representasi dari performa analitis dengan tingkat kepercayaan data yang tinggi namun lebih rendah dari eksperimen. Perangkat lunak yang digunakan untuk uji ini adalah FEMM 4.2. Berikut merupakan alur simulasi bermetode elemen hingga menggunakan perangkat lunak ini.



Gambar 3.17 Skema Simulasi FEM dengan Perangkat Lunak *FEMM 4.2*

Perangkat lunak ini memiliki keterbatasan analisa yaitu geometri yang dapat ditampilkan hanya sebatas dua dimensi saja, dan hanya melibatkan integrasi pada sumbu-z untuk kasus kedalaman geometri yang identik (semisal kubus). Oleh karena itu, integrasi pada sumbu-z pada perangkat lunak ini tidak dapat menangani kasus lingkaran tegak (magnet koin pada kasus perancangan motor ini) karena dimensi panjang magnet berubah terhadap kedalaman berdasarkan geometri lingkaran. Oleh karena itu, dilakukan pendekatan luas permukaan lingkaran magnet dengan luasan dimana dimensi pada sumbu-z identik. Permukaan segiempat digunakan karena memenuhi kriteria dari parameter masukan simulasi FEMM tersebut.

Faktor galat akibat geometri tidak begitu dipertimbangkan mengingat faktor utama pada magnitud gaya antar magnet adalah luas permukaan ketika kedua magnet berada pada satu garis magnetisasi (dapat dilihat pada persamaan []). Untuk itu, dalam memperkecil galat magnitud torsi, perlu ditentukan kedalaman sumbu-z Didapatkan kedalaman sumbu-z untuk simulasi pada FEMM 4.2 dengan menyamakan luas permukaan magnet dengan luas permukaan segi-empat (luas permukaan operasi pada FEMM 4.2). Hasil perhitungan menghasilkan nilai kedalaman sumbu-z untuk simulasi ialah sebesar 23.5619 mm. Dengan demikian, simulasi pada FEMM untuk hasil desain motor ini tidak murni mengikuti geometri yang ada pada perancangan (silinder), melainkan dengan pendekatan balok.

3.5 Analisa performansi

Analisa performansi dilakukan untuk melihat bagaimana karakter angular T_R vs θ_R serta energi keluaran per putaran berdasarkan kedua uji tersebut. Kesimpulan yang dirumuskan adalah bagaimana perbandingan karakteristik tersebut dengan metode validasi FEM, serta apakah berhasil atau tidak hasil perancangan dengan model pendekatan dipol (dari perbandingan hasil uji numerik dengan integrasi elemen hingga dan eksperimen) dengan melihat galat biasnya.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

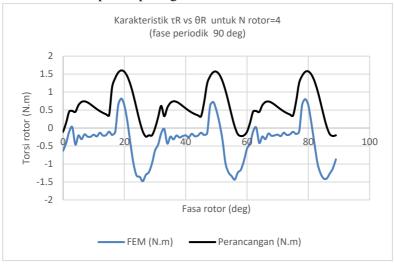
Pada bab ini akan dilakukan analisis karakter motor hasil perancangan

4.1 Analisa Perancangan

Dari hasil pemodelan, didapatkan karakteristik F_R vs θ_R sebagai berikut:

4.1.1 Karakterisasi T_R vs θ_R untuk N_S =6 dan N_R = 4

Adapun karakteristik T_R vs θ_R hasil perancangan dengan perbandingan grafik menggunakan model dipol dan FEM ditampilkan pada grafik berikut:



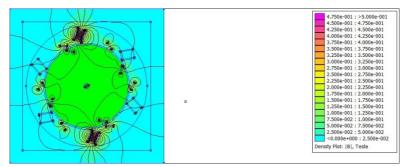
Gambar 4.1 Karakter Torsi Rotor T_R Terhadap θ_R untuk N_R = 4 Hasil Perancangan untuk Hasil Perhitungan (dengan Pendekatan Dipol) dan FEM

Tabel 4.1 Perbandingan Hasil Analisa Model Dipol dengan FEM untuk Konfigurasi 6x4

Besaran	Metode Dipol	FEM
Periode rerata	30 deg	30 deg
Torsi maksimum	1.6025 Nm	0.8202 Nm
Torsi minimum	-0.2402 Nm	-1.4799 Nm
Torsi rerata	0.6178 Nm	-0.3600 Nm
Energi rotasi per	35.3977 J	20.6251 J
putaran		
Error bias	42.51%	

Pada grafik di atas, torsi maksimum dan minimum yang terjadi ialah sebesar 0.8202 Nm dan -1.4799 Nm. Torsi rerata per satu putaran ialah sebesar -0.3600 Nm. Periode keberulangan pola torsi sebesar 30°. Energi rotasi per putaran yang dihasilkan ialah sebesar 20.6251 J. Error bias torsi dari model dipol terhadap FEM adalah sebesar 42.51%.

Pada grafik terlihat bahwa karakteristik torsi rotor terhadap fasa rotor hasil simulasi FEM memiliki kemiripan dari segi pola torsinya. Galat yang terlihat pada grafik cenderung merupakan bias, yang berarti adanya parameter konstan yang mempengaruhi gaya interaksi antar komponen motor dalam satu putaran. Permasalahan besarnya adalah, torsi yang terhitung jauh lebih rendah dibandingkan nilai hasil perancangan, bahkan dominan bernilai negatif. Pengecekan untuk kemungkinan adanya kesalahan pada pemrograman telah dilakukan dan hasilnya adalah, berbeda jauhnya nilai dihasilkan bukan dikarenakan kesalahan torsi vang pemrograman. Kebolehjadian adanya pengaruh gaya tarik antara magnet rotor dengan material elektromagnet (steel 1018) menjadikan arah resultan gaya interaksi terjadi demikian. Pembangkitan medan magnetik pada solenoid cenderung jarang terjadi mengikuti jumlah magnet rotor yang sedikit pula. Sebagai contoh, dapat dilihat pemetaan fluks magnetik pada saat fasa rotor sebesar 25°:



Gambar 4.2 Kontur Fluks Magnetik dari Konfigurasi Motor 6x4 pada saat θ_R =25°

Gambar 4.2 di atas merupakan gambaran keadaan fluks magnet pada saat fasa rotor sebesar 25° , dimana terlihat adanya garis-garis melengkung yang keluar dari komponen magnet permanen dan elektromagnet. Garis ini merupakan kontur dari fluks medan magnetik yang nilai pada garisnya diindikasikan dengan warna (lihat Gambar 4.2). Semakin jauh garis fluks dari sumber medan, semakin lemah interaksi magnetisnya (yang berimplikasi pada gaya dorong/tarik yang lemah). Pada lampiran E-2/E-3 dapat dilihat bagaimana pola fluks magnetik untuk masing-masing konfigurasi pada setiap perubahan θ_R sebesar 1° .

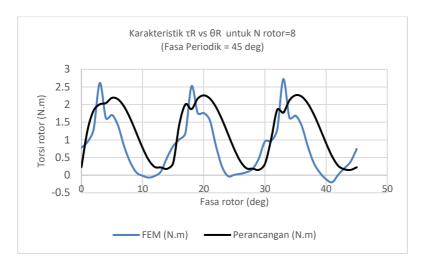
Secara keseluruhan apabila ditelusuri dari muasal penggunaan model pendekatan dipol, maka seharusnya galat yang terjadi lebih sesuai berupa galat rasio, bukan bias. Merujuk pada penurunan rumus gaya interaksi antar magnet (lihat persamaan 3.2), maka faktor gaya hasil pendekatan dipol tersebutlah yang menjadi pengali dan penyebab galat rasio. Namun yang perlu diperhatikan, permodelan dipol sangatlah menyederhanakan kondisi aktual interaksi magnet dan mengabaikan kompleksitas geometri masing-masing komponen yang berinteraksi.

Lebih dalam, faktor terlemah yang telah dikemukakan dalam bab perancangan, yakni geometri permukaan interaksi, justru tidak mempengaruhi bias torsi yang konsisten tersebut. Simulasi dengan FEMM memperhitungkan geometri, namun hanya terbatas pada dua dimensi saja (sumbu z). Integrasi pada sumbu z justru berorde satu, yang artinya dimensi masingmasing komponen akan sama sepanjang sumbu tersebut yang berimplikasi pada pengabaian geometri permukaan komponen magnet dan elektromagnet yang berbentuk lingkaran, menjadi persegi panjang.

Adanya pola gelombang (pada grafik 4.1) dengan nilai torsi negatif pada dasarnya diharapkan untuk dihindari, karena hal tersebut bersifat memperlambat kecepatan rotor sehingga efisiensi melemah. Selain itu, nilai torsi negatif tersebut berperan dalam potensi vibrasi di sepanjang bidang putar rotor, apabila gaya sentrifugal dan sentripetal yang terjadi di fasa tersebut tidak seimbang.

4.1.2 Karakterisasi T_R vs θ_R untuk N_S =6 dan N_R =8

Adapun karakteristik T_R vs θ_R dengan N_R sebesar 8 ditampilkan pada grafik berikut:



Gambar 4.3 Karakter Torsi Rotor T_R Terhadap θ_R untuk $N_R = 8$ Hasil Perancangan untuk Hasil Perhitungan (dengan Pendekatan Dipol) dan FEM

Tabel 4.2 Perbandingan Hasil Analisa Model Dipol dengan FEM untuk Konfigurasi 6x8

Besaran	Metode Dipol	FEM
Periode rerata	15 deg	15 deg
Torsi maksimum	2.2766 Nm	2.7890 Nm
Torsi minimum	0.1360 Nm	-0.1990 Nm
Torsi rerata	1.2341 Nm	0.8156 Nm
Energi rotasi per	70.7059 J	46.7292 J
putaran		
Error bias	14.01%	

Pada grafik di atas, torsi maksimum dan minimum yang terjadi ialah sebesar 2.7890 Nm dan -0.1990 Nm. Torsi rerata per satu putaran ialah sebesar 0.8156 Nm. Periode keberulangan pola torsi sebesar 15°. Energi rotasi per putaran yang dihasilkan ialah sebesar

46.7292 J. Error bias torsi dari model dipol terhadap FEM adalah sebesar 14.01%.

Adanya pola gelombang (pada grafik 4.2) menunjukkan semua torsi yang terjadi bernilai positif, sehingga pada seluruh posisi rotor terjadi akselerasi (apabila friksi diabaikan). Kendati hal tersebut ini merupakan kondisi yang diharapkan, galat yang terjadi apabila validasi dilakukan melalui eksperimen/simulasi Dengan demikian, konfigurasi ini dapat dilanjutkan ke tahap eksperimen. Kendati demikian, gangguan tertentu hampir tidak dapat dihindarkan, mengingat grafik ini merupakan karakter hasil perhitungan pendekatan (yang mengabaikan faktor geometri) dengan validasi terbatas.

4.2 Interpretasi Hasil Analisis

Adapun faktor-faktor penyebab terjadinya galat tersebut ialah pada model dipol itu sendiri. Tujuan dari penelitian ini pada dasarnya adalah mengetahui seberapa performa torsi-angular hasil perancangan model dipol dengan validasi FEM. Namun perlu diketahui sejak awal bahwa pada penelitian ini, objek penelitian adalah pada model dipol itu sendiri sebagai salah metode desain yang didasarkan pada pendekatan, bukan motor. Model dipol sangat valid untuk interaksi antar magnet yang relatif jauh dibandingkan dimensinya, namun perlu diketahui bahwa jarak interaksi yang jauh justru dihindari dalam perancangan motor karena kuat medan magnet (sebagai faktor pendorong) melemah. Karena dari awal permodelan telah dilakukan pendekatan, maka dari pada itu perlu dilihat bagaimana penyimpangan nilai yang terjadi terhadap hasil FEM (sebagai pembanding yang lebih akurat). Nilai galat berada di atas 10% untuk kedua konfigurasi tersebut menjadikaan metode dipol tidak dapat digunakan untuk mengetahui nilai eksak dari hasil perancangan.

Faktor lain yang menyebabkan galat terjadi ialah ada metode integral. Kelemahan software FEMM 4.2 sebagai media validasi dengan metode FEM adalah, integrasi permukaan terhadap sumbu z adalah berorder satu untuk nilai z. Model magnet yang digunakan dalam perancangan awal adalah koin, dimana keterlibatannya pada sistem motor ini menyebabkan elemen integrasi yang berbeda pada sumbu z. Pada proses simulasi di FEM, digunakan kesetaraan luas permukaan yang menjadikan geometeri magnet yang digunakan dalam simulasi menjadi berbeda. Sehingga baik dari model dipol ataupun FEM memiliki error.

Selain faktor di atas, pengabaian material inti elektromagnet pada metode dipol menjadi salah satu penyebab. Berbasis pada perancangan, elektromagnet bertindak sebagai magnet ketika ia memnuhi persyaratan kontrol (pada subbab 3.3.4, *sizing* parameter). Ketika elektromagnet berada pada keadaan non aktif, ia seharusnya memiliki gaya interaksi dengan magnet akibat permeabilitas bahannya. Hal ini terabaikan pada saat permodelan.

Berikut analisis terkhusus untuk masing-masing konfigurasi :

Konfigurasi $N_S = 6 \, dan \, N_R = 4$

Pada konfigurasi ini, jarak antar rotor lebih renggang dibandingkan pada konfigurasi lain. Renggangnya jarak ini memberikan peluang kecilnya pengaruh antar magnet lain yang terjadi sehingga adanya interaksi magnetik baru (yang tidak termodelkan) menjadi terabaikan. Inilah yang menjadi penyebab kemiripannya respon torsi antara model dengan simulasi. Error bias (dimana respon torsi pada simulasi menunjukkan nilai yang lebih kecil) dapat dikarenakan oleh efek samping pendekatan model dipol dalam permodelannya. Maka dari hal ini dapat ditarik pernyataan bahwa pendekatan model dipol memberikan andil *error*

yang cukup besar sehingga tidak layak digunakan dalam perancangan motor secara komprehensif.

Adapun faktor lain yang menyebabkan terjadinya perbedaan nilai diantara kedua metode ini, adalah pada FEMM dilakukan juga pendekatan geometri untuk magnet dari awalnya berupa silinder menjadi balok (mengubah bentuk kutub) dalam rangka keterbatasan kemampuan perangkat lunak tersebut. Walaupun di awal dipandang bahwa perubahan geometri kutub tidak berpengaruh besar dalam bagaimana fluks interaksi yang terjadi, namun informasi ini perlu dijadikan perhatian bagi penelitian kedepannya karena masih perlunya pembuktian yang lebih akurat (baik menggunakan program simulasi yang lebih canggih ataupun eksperimen).

Konfigurasi $N_S = 6$ dan $N_R = 8$

Dibandingkan dengan konfigurasi sebelumnya, jarak antar magnet rotor lebih sempit. Hal ini mengakibatkan rapat fluks magnetik di sekitar rotor menjadi besar sehingga pengaruh di luar model (interaksi antar magnet rotor) kemungkinan besar mempengaruhi perubahan karakteristik torsi sehingga memiliki pola yang berbeda dengan hasil permodelan. Perlu diingat bahwa pumusan model yang dibuat mengabaikan interaksi magnet pada sesama (di bagian) rotor ataupun stator. Sehingga yang diperhitungkan hanyalah antara rotor dengan stator (tidak sesamanya). Semakin dekatnya jarak antar magnet sesamanya, maka semakin berbeda pula bagaimana fluks medan yang terjadi pada sistem dibandingkan hasil kalkulasi fluks medan berdasarkan permodelan dipol.

Sebagaiman alasan terjadinya *error* pada konfigurasi sebelumya, pendakatan geometri kutub dapat menjadi penyebab adanya perbedaan fluks magnetik yang terjadi di sekitar magnet

walaupun perubahannya dianggap terabaikan di awal. Berikut poin-poin penting hasil analisis :

- Ringkasnya, lebih banyak kebocoran medan pada konfigurasi 6x4 dibanding 6x8 karena kerapatan fluks magnet rotor sebanding dengan jumlah rotor sehingga interaksi medan lebih membarikan dampak berupa gaya dorong antara rotor dan komponen stator (elektromagnet dan magnet stator).
- Semua konfigurasi memiliki kebocoran, sehingga metode ini tidaklah baik dalam prakteknya dibanding desain motor yang ada saat ini. Rekayasa terbalik dapat dipertimbangkan dan prospek untuk penelitian kedepannya.
- Induksi atraktif terjadi antara PM rotor dengan inti besi solenoid ketika solenoid tidak dialiri arus.

Rekomendasi

Berdasarkan diskusi yang disebutkan di atas, penulis menyimpulkan bahwa model pendekatan dipol tidak valid digunakan dalam perancangan motor berdasarkan nilai tertentu secara akurat. Perlu adanya eksperimen pembanding dengan konfigurasi 6x8 sebagai kelanjutan dari penelitian ini.

'' Halaman ini sengaja dikosongkan''

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Perancangan motor magnet permanen berpendorong magnet permanen-elektromagnet dan hasil uji simulasi FEM menggunakan *FEMM 4.2* memberikan kesimpulan sebagai berikut:

- 1. Telah dirancang motor magnet permanen dengan penggerak gabungan elektromagnet-magnet permanen menggunakan pendekatan model dipol magnetik dengan nilai-nilai parameter dan variabel yang telah ditetapkan dan diperhitungkan diantaranya magnet yang digunakan berjenis N35 dengan ketebalan 0.005 m dan diameter 0.015 m, jari-jari sistem rotor sebesar 0.15 m, jari-jari sistem stator sebesar 0.18 m, magnet permanen pada sistem stator berjumlah 6, magnet permanen pada sistem rotor bervariasi yakni 4 dan 8, serta sudut yang dibentuk oleh titik pusat badan elektromagnet dengan sumbu x positif adalah -19°.
- 2. Berdasarkan analisis torsi rotor hasil validasi menggunakan FEMM 4.2 dengan kompensasi integrasi melalui kesetaraan luasan, didapatkan karakteristik untuk konfigurasi motor 6x4 dimana torsi puncak sebesar 0.8202 Nm dan torsi terendah -1.4799 Nm serta torsi rerata sebesar -0.3600 Nm dan total energi rotasi yang dihasilkan sebesar 20.6251 J, sedangkan untuk konfigurasi motor 6x8 didapatkan torsi puncak sebesar 2.7890 Nm dan torsi terendah -0.1990 Nm serta torsi rerata sebesar 0.8156 Nm dan total energi rotasi yang dihasilkan sebesar 46.7292 J.
- 3. Galat bias torsi rotor vs fasa rotor hasil perancangan berdasarkan metode pendekatan dipol magnetik dengan metode element hingga adalah sebesar 42.51% untuk konfigurasi jumlah magnet rotor bernilai 4, dan 14.01% untuk jumlah magnet rotor bernilai 8.

5.2 Saran

Penelitian ini masih perlu dilakukan pengembangan, maka saran yang disampaikan dalam laporan tugas akhir ini adalah perlu adanya metode perancangan lain atau validasi eksperimen untuk mendapatkan nilai yang lebih dipercaya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Furlani, Edward P, "Permanent Magnet and Electromechanical Devices", Academic Press, New York: 2001
- [2] Gieras, Jacek F, "Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications", CRC Press, Boca Ration: 2010
- [3] Vokoun, et al, "Magnetostatic Interactions and Forces Between Cylindrical Permanent Magnets", Elsevier, 2009
- [4] Sosa, V and Camacho, J.M.,"Alternative Method to Calculate The Magnetic Field of Permanent Magnet With Azimuthal Symmetry", Revista Mexicana de Fisica, 2013
- [5] McPherson, A, "Techniques and Circuits for Electromagnetic Instrument Actutation, Queen Mary University of London,

