



**KOMPARASI FLUKS MAGNETIK ORBITAL
ELEKTRO MOTOR TIPE BELT TERHADAP RADIAL
ELEKTRO MOTOR BERBASIS
SOFTWARE MAGNET**

Skripsi

Diajukan sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar

Sarjana Teknik Program Studi Teknik Mesin

Oleh

Muhammad Wais Al Qorni

NIM. 5212414044

TEKNIK MESIN

JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

2019

PERSETUJUAN PEMBIMBING

Nama : Muhammad Wais Al Qorni
Nim : 5212414044
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : Komparasi Fluks Magnetik Orbital Elektro Motor Tipe Belt
Terhadap Radial Elektro Motor Berbasis *Software MagNet*

Skripsi ini telah disetujui oleh pembimbing untuk diajukan ke sidang panitia ujian Skripsi Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.

Semarang,
Dosen Pembimbing



Widya Aryadi, S.T., M.Eng.
NIP. 197209101999031001

PENGESAHAN

Skripsi dengan judul "Komparasi Fluks Magnetik Orbital Elektro Motor Tipe Belt Terhadap Radial Elektro Motor Berbasis *Software MagNet*" telah dipertahankan di depan sidang Panitia Ujian Skripsi Fakultas Teknik UNNES pada tanggal ... bulan ... tahun

Oleh

Nama : Muhammad Wais Al Qorni

NIM : 5212414044

Program Studi : Teknik Mesin

Panitia:

Ketua

Sekretaris



Rusiyanto, S.Pd., M.T.

NIP. 197403211999031002



Samsudin Anis S.T., M.T. Ph.D.

NIP. 197601012003121002

Penguji 1

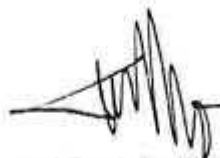
Penguji 2

Pembimbing



Dr. Ir. Rahmat Doni Widodo, ST, MT, IPP.

NIP. 197509272006041002



Ahmad Roziqin, S.Pd., M.Pd.

NIP. 19870419201404100



Widya Aryadi, S.T., M.Eng.

NIP. 197601012003121002

Mengetahui:



PERNYATAAN KEASLIAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa:

1. Skripsi ini, adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik (sarjana, magister, dan/atau doktor), baik di Universitas Negeri Semarang (UNNES) maupun di perguruan tinggi lain.
2. Karya tulis ini adalah murni gagasan, rumusan, dan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan Pembimbing dan masukan Tim Penguji.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah diperoleh karena karya ini, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi ini.

Semarang, 5 Agustus 2019

Yang membuat pernyataan



Muhammad Wais Al Qorni
NIM. 5212414044

MOTTO DAN PERSEMBAHAN

MOTTO :

- Berusahalah walau tidak ada yang mendukungmu, karena hasil usahamu bukan untuk orang lain tetapi untuk dirimu sendiri.
- Jangan terus mencari uang, karena bila terus di cari akan semakin kurang.
- Jangan merubah takdirmu, tapi carilah cara untuk menjalaninya.

PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan kepada:

1. Keluarga dan saudara yang senantiasa memberikan doa
2. Teman-teman TM 2014
3. Almamater yang ku kenakan
4. Sahabat yang selalu menyemangati tika iswarini, dany eka, dan dwi sofi
5. Semua yang belum tersebut satu per satu

SARI ATAU RINGKASAN

Muhammad Wais Al Qorni. 2019. Komparasi Fluks Magnetik Orbital Elektro Motor Tipe Belt Terhadap Radial Elektro Motor Berbasis *Software MagNet*. Skripsi. Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang. Pembimbing (1) Widya Aryadi, S.T., M.Eng .

Tujuan Penelitian ini adalah untuk membandingkan motor orbital tipe belt dan motor radial menggunakan *Software MagNet* dengan variasi perubahan sudut dan pergeseran magnet, yang ditentukan pada kedua motor. Gaya, torsi, dan fluks magnet yang dihasilkan pada motor orbital tipe belt mengalami peningkatan seiring dengan bergesernya medan magnet pada motor.

Pada penelitian ini variasi perubahan sudut dan pergeseran magnet yang digunakan adalah -0,3,-2,-1,0,1,2,3 dan -30° , -20° , -10° , $0,10^{\circ}$, 20° , 30° minus menunjukkan arah keluar dan masuk magnet. Tegangan, dan arus akan diatur pada 40 volt dan arus 8,5 A. sampel akan diambil dari masing-masing step pada perpindahan magnet.

Hasil penelitian menunjukkan perbedaan yang sangat besar pada masing-masing perpindahan step setelah dilakukan pengujian dengan *software magnet*. Gaya, torsi dan fluks magnet tertinggi untuk motor orbital sebesar 14,40 N, 3,50 N-m dan 0,0042 Wb. Sedangkan pada motor radial sebesar 11,65 N, 1,55 N-m dan 0,0032 Wb. Gaya, torsi dan fluks magnet terendah untuk motor orbital sebesar 2,44 N, 0,23 N-m, 0,0028 Wb. Sedangkan pada motor radial sebesar 1,155 N, 0,228 N-m dan 0,001 Wb. Hasil perhitungan daya yang dihasilkan motor orbital tipe belt 44,32 % lebih besar dari motor radial. Dengan demikian hasil perbandingan dari motor orbital tipe belt berbanding lebih besar dari pada motor radial.

Kata Kunci: *Fluks Magnetik (Wb), Orbital Elektro Motor dan Software Magnet*

PRAKATA

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas segala limpahan berkat dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “*Komparasi Fluks Magnetik Orbital Elektro Motor Tipe Belt Terhadap Radial Elektro Motor Berbasis Software MagNet*” ini dengan baik.

Skripsi ini disusun sebagai salah satu persyaratan meraih gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin S1 Universitas Negeri Semarang. Perwujudan karya tulis ini tidak lain berkat bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang tiada terkira kepada:

1. Dr. Nur Qudus, M.T., Dekan Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang
2. Rusiyanto, S.Pd., M.T., Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Negeri Semarang.
3. Samsudin Anis, S.T., M.T., Ph.D., Ketua Program Studi Teknik Mesin S1 Universitas Negeri Semarang
4. Widya Aryadi, S.T. M.Eng., selaku pembimbing yang bijaksana memberikan bimbingan, nasihat serta waktunya selama penulisan skripsi ini.
5. Kedua orang tua dan keluarga yang senantiasa selalu memberikan doa agar penulis diberikan kemudahan dan kelancaran.
6. Teman-teman Program studi Teknik Mesin yang senantiasa memberikan penulis semangat dan motivasi.

7. Semua pihak yang telah banyak membantu penulis dalam menyelesaikan penyusunan skripsi.

Penulis menyadari bahwa penulisan skripsi ini masih memiliki banyak kekurangan yang disebabkan keterbatasan kemampuan dan pengetahuan penulis. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran demi penyempurnaan penulisan selanjutnya.

Semarang, 5 Agustus 2019



Penulis

DAFTAR ISI

JUDUL DALAM	i
LEMBAR PERSETUJUAN PEMBIMBING	ii
LEMBAR PENGESAHAN KELULUSAN	iii
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN	iv
MOTTO	v
SARI.....	vi
PRAKATA	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL.....	xvi
BAB I	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Identifikasi Masalah.....	2
1.3 Pembatasan Masalah.....	3
1.4 Rumusan Masalah.....	3
1.5 Tujuan Penelitian	4
1.6 Manfaat Penelitian	4
BAB II	5
KAJIAN PUSTAKA DAN KAJIAN TEORI	5
2.1 Kajian Pustaka	5
2.2 Kajian Teori	7

2.2.1 Sejarah Motor Listrik.....	7
2.2.2 Motor AC.....	9
2.2.3 Motor DC.....	15
2.2.4 Motor Radial (Konvensional).....	18
2.2.5 Motor Axial	19
2.2.6 <i>Motor Brushless Direct Current (BLDC)</i>	23
2.2.7 Solenoid Motor	30
2.2.8 Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSM)	34
2.2.9 Magnetic Fluks	36
2.2.10 Software SolidWork	38
2.2.11 <i>Software MagNet</i>	39
BAB III	42
METODE PENELITIAN.....	42
3.1 Alat Penelitian	42
3.1 Desain Perancangan.....	43
3.2 Prosedur Perancangan.....	43
3.3 Validasi Desain.....	48
BAB IV	57
HASIL DAN PEMBAHASAN.....	57
4.1 Deskripsi Data	57
4.1.1 Hasil Rancangan.....	57
4.1.2 Data Hasil Uji Dengan <i>Software MagNet</i>	58
4.2 Pembahasan	59

4.2.1 Gambar Bentuk Fluks Magnet.....	59
4.2.2 Analisis Data	62
4.2.3 Perbandingan Gaya Antara Motor Listrik Orbital dan Motor Listrik Radial	66
4.2.4 Perbandingan Torsi Antara Motor Listrik Orbital dan Motor Listrik Radial	68
4.2.5 Perbandingan Fluks Magnet Antara Motor Listrik Orbital dan Motor Listrik Radial.....	70
4.2.6 Perbandingan Daya Antara Motor Listrik Orbital dan Motor Listrik Radial	72
BAB V	75
KESIMPULAN DAN SARAN.....	75
5.1 Kesimpulan	75
5.2 Saran	75
DAFTAR PUSTAKA	77
LAMPIRAN.....	80

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Motor AC	10
Gambar 2.2 Prinsip kerja motor AC	11
Gambar 2.3 Stator motor AC	11
Gambar 2.4 Rotor Sangkar.....	12
Gambar 2.5 Gambaran motor satu fasa.....	13
Gambar 2.6 Gambaran motor tiga fasa	14
Gambar 2.7 Rangkaian motor <i>Shunt</i>	17
Gambar 2.8 Aturan tangan kiri prinsip kerja motor.....	17
Gambar 2.9 Prinsip kerja motor DC	18
Gambar 2.10 Posisi Magnet Motor Radial.....	18
Gambar 2.11 Konfigurasi rotor dan stator motor radial.....	19
Gambar 2.12 Motor Radial	19
Gambar 2.13 Konfigurasi rotor dan stator motor axial.....	20
Gambar 2.14 Bagian Dalam Motor axial.....	20
Gambar 2.15 AFMPM / AFMEPM	21
Gambar 2.16 Axial motor	21
Gambar 2.17 Magnax <i>Next- Gen Axial Motor</i>	22
Gambar 2.18 <i>EMRAX 188</i>	22
Gambar 2.19 Representasi Grafis <i>Hukum Lorentz</i>	23
Gambar 2.20 Gaya Electromagnet yang ditimbulkan oleh magnet dan konduktor	25
Gambar 2.21 Mode Tangan Kiri Fleming.....	25

Gambar 2.22 Reaksi Garis Flux	26
Gambar 2.23 EMF di dalam sebuah konduktor	27
Gambar 2.24 Stator	27
Gambar 2.25 Rotor.....	28
Gambar 2.26 Sensor hall	30
Gambar 2.27 Solenoid.....	31
Gambar 2.28 Gambar Pergerakan Magnet didalam kumparan.....	31
Gambar 2.29 Gambar Simulasi Selenoid Motor	32
Gambar 2.30 Aliran Arus pada Kumparan	32
Gambar 2.31 Perhitungan Medan Magnet Solenoid	33
Gambar 2.32 PMSM dengan 1 stator dan 1 rotor	35
Gambar 2.33 Komponen <i>Permanent Magnet Synchronous Motors</i>	35
Gambar 2.34 Fluks magnetik menembus permukaan dalam arah tegak lurus.....	37
Gambar 2.35 Fluks magnetik melewati kumparan	37
Gambar 2.36 Model 2D <i>Software MagNet</i>	40
Gambar 2.37 Model Permukaan <i>Software MagNet</i>	41
Gambar 2.38 Tampilan 3D <i>Software MagNet</i>	41
Gambar 3.1 Desain Motor Orbital Tipe Belt	43
Gambar 3.2 Diagram Alir	44
Gambar 3.3 Sketsa 2D Motor Orbital Pada <i>Software MagNet</i>	49
Gambar 3.4 Input Material Coil	49
Gambar 3.5 Input Material Inti Besi	50
Gambar 3.6 Input Material Belt	50
Gambar 3.7 Input Material Magnet.....	50

Gambar 3.8 Input Material Udara	51
Gambar 3.9 Tool Make Simple Coil	52
Gambar 3.10 Input Setting Putaran Pada Coil	52
Gambar 3.11 Input Setting Arus Pada Coil.....	52
Gambar 3.12 Setting Material	53
Gambar 3.13 Setting Material	53
Gambar 3.14 Proses Analisis	54
Gambar 3.15 Bentuk Proses Analisis.....	54
Gambar 3.16 Hasil Analisis Menggunakan <i>Software MagNet</i>	55
Gambar 4.1 Gambar 2D Motor Orbital Tipe Belt Dan Motor Radial Menggunakan <i>Software Magnet</i>	58
Gambar 4.2 Bentuk Fluks Magnet Motor Orbital Tipe Belt, Step 1 (0 mm).....	60
Gambar 4.3 Bentuk Fluks Magnet Motor Radial, Step 1 (sudut 0 °).....	60
Gambar 4.4 Bentuk Fluks Magnet Motor Orbital Tipe Belt, Step 2 (4mm).....	60
Gambar 4.5 Bentuk Fluks Magnet Motor Radial, Step 2 (sudut 10 °).....	60
Gambar 4.6 Bentuk Fluks Magnet Motor Orbital Tipe Belt, Step 3 (8 mm).....	60
Gambar 4.7 Bentuk Fluks Magnet Motor Radial, Step 3 (sudut 20 °).....	60
Gambar 4.8 Bentuk Fluks Magnet Motor Orbital Tipe Belt, Step 4 (12 mm).....	61
Gambar 4.9 Bentuk Fluks Magnet Motor Radial, Step 4 (sudut 30 °).....	61
Gambar 4.10 Bentuk Fluks Magnet Motor Orbital Tipe Belt, Step 5 (16 mm).....	61
Gambar 4.11 Bentuk Fluks Magnet Motor Radial, Step 5 (sudut 40 °).....	61
Gambar 4.12 Bentuk Fluks Magnet Motor Orbital Tipe Belt, Step 6 (20 mm).....	61
Gambar 4.13 Bentuk Fluks Magnet Motor Radial, Step 6 (sudut 50 °).....	61
Gambar 4.14 Bentuk Fluks Magnet Motor Orbital Tipe Belt, Step 7 (24 mm).....	62

Gambar 4.15 Bentuk Fluks Magnet Motor Radial, Step 7 (sudut 60°)	62
Gambar 4.16 Grafik perbandingan gaya antara motor orbital dengan motor radial dengan variasi perubahan sudut dan pergeseran magnet	67
Gambar 4.17 Grafik perbandingan torsi antara motor orbital dengan motor radial dengan variasi perubahan sudut dan pergeseran magnet	69
Gambar 4.18 Grafik perbandingan fluks magnet antara motor orbital dengan motor radial dengan variasi perubahan sudut dan pergeseran magnet	71
Gambar 4.19 Grafik perbandingan daya antara motor orbital dengan motor radial dengan variasi perubahan sudut dan pergeseran magnet	73

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Data Ukuran Komponen 3D <i>SolidWork</i>	45
Tabel 3.2 Data Ukuran Komponen Desain Analisis 2D <i>Software Magnet</i>	45
Tabel 3.3 Data Material.....	47
Tabel 3.4 Boundary Condition.....	47
Tabel 4.1 Data Gaya Hasil Analisis Kedua Motor Menggunakan Software MagNet.....	58
Tabel 4.2 Data Torsi Hasil Analisis Kedua Motor Menggunakan Software MagNet.....	58
Tabel 4.3 Data Fluks Magnet Hasil Analisis Kedua Motor Menggunakan Software MagNet.....	59
Tabel 4.4 Data Daya Hasil Analisis Kedua Motor Menggunakan Software MagNet.....	59
Tabel Lampiran Data Gaya Pada Sumbu X	85

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Perhitungan Daya Pada Motor Orbital Tipe Belt Dan Motor Radial	80
Lampiran 2 Bentuk Desain Motor Orbital Tipe Belt	87
Lampiran 3 Bentuk Sketsa 2D Motor Orbital Tipe Belt Menggunakan Software MagNet	88
Lampiran 4 Surat Tugas	89
Lampiran 5 Surat Ijin Penelitian	90

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Menurut Margana (2016: 1) pada tahun 1832-1839 di Skotlandia diperkenalkan mobil listrik pertama oleh *Robert Anderson*, namun pada saat itu harga bahan bakar minyak relative murah sehingga masyarakat dunia cenderung mengembangkan motor bakar yang menggunakan BBM. Saat ini harga BBM semakin mahal dan cadangannya menjadi semakin terbatas serta sulit dikendalikan untuk masa mendatang. Salain itu kerusakan lingkungan menjadi perhatian dunia, yang memicu pengembangan transportasi berbasis energi listrik sebagai pengganti transportasi dengan bahan bakar fosil.

Prinsip kerja dari motor listrik dilakukan dengan mengubah tenaga listrik menjadi magnet yang disebut sebagai elektro magnet. Dengan cara kutub-kutub dari magnet yang sama akan bertolak-menolak. dengan itu maka sebuah poros akan bisa berputar dengan memperoleh gaya dari dorongan perbedaan kutub magnet.

Di dunia industri sudah ada dua jenis motor listrik yang sering di gunakan yaitu jenis motor axial dan jenis motor radial. kedua motor ini sudah banyak di terapkan di jaman sekarang ini. Dengan adanya sebuah penemuan yang dilakukan oleh Michael John Werson (1999) bahwa motor *brushless* DC kurang efisien digunakan karena torsi yang dihasilkan tidak terlalu besar. Hal ini yang menyebabkan arah magnet dari stator terhadap rotor atau sebaliknya tidak tepat pada inti toroid medan magnet.

Konstruksi motor listrik saat ini belum menghasilkan torsi yang besar karena arah medan magnet yang dihasilkan oleh rotor tidak tepat sehingga energi yang dihasilkan kurang maksimal. Gaya medan magnet terhadap arah gerak rotor tidak membentuk gaya aksi dan reaksi yang besar. Hal ini mengakibatkan letak arah lilitan stator tidak benar-benar mengintari rotor atau sebaliknya.

Dengan melihat perkembangan motor dan melihat kelemahan-kelemahan motor diatas dan menurunnya bahan bakar fosil maka perlu dibuat inovasi motor baru yang disebut orbital elektro motor. Oleh sebab itu, maka penelitian ini mengambil judul tentang *Magnetik Orbital Elektro Motor Tipe Belt Terhadap Radial Elektro Motor Berbasis Software MagNet*. Dimana pusat medan magnet berada pada belt. yang nantinya akan di bandingkan dengan motor radial. penelitian ini dilakukan menggunakan *software MagNet* dan *software SolidWorks*, dimana *software SolidWorks* untuk melakukan desain dan *software MagNet* untuk melakukan analisis secara statis.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan uraian di atas, maka dapat diambil beberapa identifikasi masalah antara lain.

1. Daya dorong dari magnet sangat berpengaruh terhadap kinerja mesin, sehingga diperlukan desain dan model baru agar bisa menghasilkan daya dorong yang lebih besar untuk meningkatkan kinerja mesin agar lebih optimal.
2. Arus yang diberikan pada motor sangat berpengaruh terhadap torsi dan daya yang dihasilkan

3. Performa motor tergantung pada jumlah, diameter kumparan dan material magnet yang digunakan
4. Bahan bakar fosil yang semakin menipis, yang berbanding dengan pemakaian kendaraan yang semakin meningkat. Sehingga membutuhkan energi alternatif sebagai pengganti bahan bakar fosil.

1.3 Pembatasan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah di atas, terdapat beberapa batasan masalah yaitu sebagai berikut.

1. Rancangan bukan berbentuk alat jadi, berupa desain 3D
2. Desain rancangan menggunakan bantuan *Software SolidWorks*
3. Analisis uji statis 2D dilakukan menggunakan bantuan *Software MagNet*
4. Menggunakan arus sebesar 8,5 Ampere dan jumlah lilitan sebanyak 100 lilitan.
5. Material magnet menggunakan *PM12: Br 1.2 mur 1.0* dan inti besi menggunakan *CR10: Cold rolled 1010 steel*
6. Data yang didapat berupa grafis hasil performa kedua motor menggunakan *Software MagNet*

1.4 Rumusan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah diatas, maka rumusan masalah dalam skripsi ini sebagai berikut.

1. Bagaimana perbandingan gaya dan torsi motor orbital dibandingkan dengan motor radial dengan menggunakan *Software MagNet* ?

2. Bagaimana perbandingan daya yang dihasilkan oleh orbital elektro motor tipe belt dan radial elektro motor ?
3. Bagaimana komparasi fluks magnetik antara orbital elektro motor tipe belt dan radial elektro motor pada ukuran sama ?

1.5 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka penelitian ini memiliki tujuan sebagai berikut.

1. Untuk mengetahui gaya dan torsi motor orbital tipe belt dibandingkan dengan motor radial menggunakan *Software MagNet*.
2. Mengetahui perbandingan daya yang dihasilkan oleh orbital elektro motor tipe belt dan radial elektro motor.
3. Mengetahui komparasi fluks magnetik antara orbital elektro motor tipe belt dan radial elektro motor pada ukuran sebanding.

1.6 Manfaat Penelitian

Berdasarkan uraian di atas, maka manfaat yang di harapkan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Memberikan gambaran perbandingan unjuk kerja orbital elektro motor dengan radial elektro motor (motor listrik konvensional).
2. Memberikan pengukuran performa orbital elektro motor dibandingkan dengan radial elektro motor dengan *Software MagNet*.
3. Mampu memberikan informasi baru di dunia industri dan khususnya di kampus UNNES.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA DAN KAJIAN TEORI

2.1 Kajian Pustaka

Pengembangan yang dilakukan oleh Ghoni, et al., (2015: 26) yaitu kendaraan dengan listrik sebagai sumber energi adalah solusi untuk penghematan energi dimasa depan yaitu motor axial flux brushless DC. Motor yang digunakan pada analisis ini dirancang untuk dapat menghasilkan daya output 12 kW. Analisis ini dilakukan dengan menggunakan metode analisis finite element. Hasil desain didapatkan desain motor axial flux brushless DC dengan ukuran 220 cm menggunakan 12 slot stator dan 10 kutub rotor. Menghasilkan daya output 11,2 kW, dengan kecepatan 2388 rpm, rugi-rugi inti 381,5 watt, torsi 44,78 Nm dan efisiensi 79,39 persen.

Menurut Rachmat dan Ruhama, (2014: 7) motor induksi AC mempunyai keunggulan dan banyak digunakan pada kalangan industri. Oleh karena itu banyak penggunaan motor listrik, pengujian performa motor listrik terutama pada daya mekanik suatu motor listrik terhadap beban sangat diperlukan guna membantu pelaku industri memilih motor listrik yang tepat.

Penelitian yang dilakukan oleh Yusnita dan Tjahjono, (2012; 1) cara mengendalikan arus start pada motor AC 3 fasa. Dengan menggunakan software analisa Matlab untuk mengetahui kinerja motor. dengan 1500 W, 380 V, 4 kutub, 50 Hz dan 1400 rpm. Dari hasil penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa untuk mengendalikan arus start sebaliknya pada awal motor diberi

tegangan 26,32% dari tegangan asli, kemudian dinaikkan secara bertahap menjadi 69% dan 100% dari tegangan aslinya.

Indriani (2015: 62) Fungsi rotor dan stator adalah untuk menghasilkan induksi medan magnet karena gerakan yang terjadi antara rotor dan stator. Penempatan stator dan komponen rotor tergantung pada jenis generator yang digunakan, ada stator yang didalam rotor dan ada yang di luar rotor. Kondisi pemasangan dan penempatan stator dan rotor, jumlah lilitan kumparan dan magnet dapat mempengaruhi kinerja generator. Seperti pada generator sinkron fluks radial memiliki rotor sebagai magnet (magnet rotor) yang berada di luar lilitan kumparan stator. Beberapa studi telah meneliti tentang pengaruh jumlah lilitan kumparan, magnet dan jarak celah udara dalam generator fluks aksial dan radial terhadap kinerja generator seperti adanya distorsi harmonik dan lain-lain.

Arsya, et al., (2016: B76) melakukan penelitian bertujuan agar motor mampu dioperasikan pada tingkat kecepatan dan pembebanan yang bervariasi. Hasil dari penelitian converter SEPIC berbasis *power factor correction* dapat memperbaiki daya sistem dari 0.58 menjadi 0.999 . kemudian pada nilai THD menurun sehingga arus dari 74.39% menjadi 1.24%. pada pengujian pembebanan ini motor bisa bertahan pada kecepatan hanya sesaat walaupun pada saat penurunan kecepatan ataupun kenaikan kecepatan.

Bouloukza et al., (2018; 13) melakukan pembuatan rancangan desain baru motor magnet radial dengan memiliki 12 magnet di bagian rotor dan permukaan stator memiliki 36 kumparan yang mengelilingi inti. Awalnya sebuah studi magnet telah dilakukan dan kemudian analisis elemen hingga 2D telah dilakukan

untuk meverifikasi konsep desain baru. Kemudian analisis harmonic dilakukan untuk melihat dampak harmonic pada kinerja desain dan mencapai *prototype* yang baik. Dari hasil analisis dengan mengoptimalkan inti stator 0,5 mm. sehingga nilai torsi rata-rata 65 Nm dengan uji coba tanpa beban.

Wengi dan Yuniarto (2014: 1 & 7) Merancang sebuah motor listrik *brushless* dengan arah fluks axial. Karena motor listrik dengan fluks magnetik *axial* ini dapat didesain tanpa angker (*coreless*). Sehingga hambatan *cogging* dapat dihilangkan dan lebih ringan. Selain itu dengan desain axial ini akan memudahkan motor listrik dihubungkan paralel. Dengan sistem hubungan paralel diharapkan motor listrik akan memiliki pertimbangan *power to weight* yang lebih baik dari motor listrik DC *brushless konvensional*. Analisis yang dilakukan meliputi parameter daya dan torsi. Hasil dari perhitungan yang didapatkan ialah dengan efisiensi maksimum 84.31 % pada kecepatan putar 553.4 rpm, dan torsi peak 15.85 N/m. *Operasional Axial Brushless DC Motor* ini dapat ditinjau pada setengah torsi maksimumnya sebagai acuan untuk menentukan *continous torsi* atau *rated torquencya* adalah 7.95 Nm.

2.2 Kajian Teori

2.2.1 Sejarah Motor Listrik

Sejarah motor listrik pertama kali diawali dengan penemuan baterai oleh *Allessandro Volta* tahun 1800, kemudian dilanjutkan pada generasi medan magnet dari arus listrik oleh *Hans Christian Oersted*, tahun 1820 dan elektromagnet oleh *William Sturgeon* tahun 1825, dari ketiga penemu mendapatkan pondasi untuk membangun motor listrik. Pada saat itu masih belum terpikir apakah motor listrik

harus berputar atau reciprocating, yaitu meniru batang pendorong mesin uap (Doppelbauer, 2018: 1).

Perangkat berputar pertama yang digerakkan oleh *elektromagnetisme* dibangun oleh orang Inggris bernama *Peter Barlow* pada tahun 1822 (*Barlow's Wheel*). Setelah banyak usaha yang lebih dan kurang berhasil dengan *aparatus rotating* dan *reciprocating* yang relatif lemah, *Prussia Moritz Jacobi* yang berbahasa Jerman menciptakan motor listrik berputar pertama pada Mei 1834 yang benar-benar mengembangkan kekuatan output mekanis yang luar biasa. Motornya menetapkan rekor dunia yang diperbaiki hanya empat tahun kemudian pada bulan September 1838 oleh Jacobi sendiri. Motor keduanya cukup kuat untuk mengemudikan perahu dengan 14 orang menyeberangi sungai yang lebar. Tidak sampai tahun 1839 sampai 1840 pengembang lain di seluruh dunia berhasil membangun motor yang sama dan kemudian juga memiliki kinerja yang lebih tinggi (Doppelbauer, 2018: 1).

Pada 1833 Jerman *Heinrich Friedrich Emil Lenz* menerbitkan sebuah artikel tentang hukum timbal balik dari fenomena magneto-listrik dan elektromagnetik, yaitu *reversibilitas* generator listrik dan motor. Pada 1838 ia memberikan penjelasan rinci tentang eksperimennya dengan generator Pixii yang ia operasikan sebagai motor. Tahun 1835, dua orang Belanda Sibrandus Stratingh dan Christopher Becker membuat sebuah motor listrik yang menggerakkan sebuah mobil model kecil. Ini adalah aplikasi praktis pertama dari motor listrik. Pada bulan Februari 1837 paten pertama untuk motor listrik diberikan kepada Thomas Davenport Amerika Serikat (Doppelbauer, 2018: 1).

Namun, semua perkembangan awal oleh Jacobi, Stratingh, Davenport dan lain-lain akhirnya tidak mengarah pada motor listrik yang kita kenal sekarang. Motor DC ditemukan oleh ilmuwan asal Inggris bernama Michael Faraday, lahir pada tahun 1791 di Inggris. Dari penelitian yang dilakukan oleh Michael tidak dibuat dari mesin ini, melainkan dari pengembangan pembangkit listrik (dynamometers). Pondasinya diletakkan oleh William Ritchie dan Hippolyte Pixii pada tahun 1832 dengan penemuan komutator dan, yang paling penting oleh Werner Siemens pada tahun 1856 dengan Double-T-anchor dan oleh chief engineer-nya, Friedrich Hefner-Alteneck, pada tahun 1872 dengan drum anker. Motor DC masih memiliki posisi pasar yang dominan saat ini dalam rentang daya rendah (di bawah 1 kW) dan tegangan rendah (di bawah 60 V) (Doppelbauer, 2018: 1).

Tahun 1885 hingga 1889 melihat penemuan sistem tenaga listrik tiga fase yang menjadi dasar transmisi tenaga listrik modern dan motor listrik canggih. Penemu tunggal untuk sistem daya tiga fase tidak dapat disebutkan namanya. Ada beberapa nama yang kurang lebih dikenal yang semuanya sangat terlibat dalam penemuan (Bradley, Dolivo-Dobrowolsky, Ferraris, Haselwander, Tesla dan Wenström). (Doppelbauer, 2018: 1).

2.3 Jenis-jenis Motor Listrik

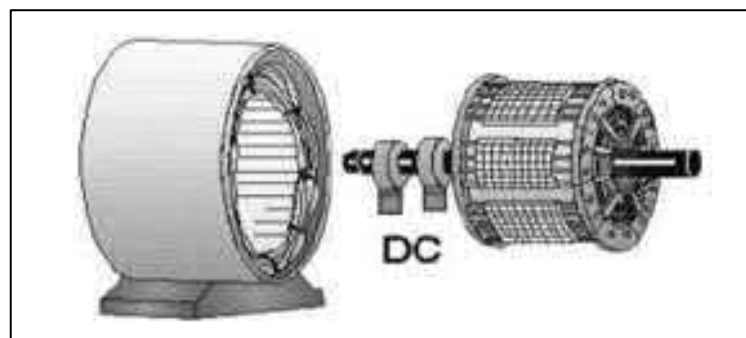
2.2.2 Motor AC

Motor induksi AC diperkenalkan oleh Arago pada tahun 1824. Dari percobaan Arago diketahui bahwa magnet berputar di sekitar tembaga, selanjutnya fenomena ini dijelaskan pada hukum Faraday induksi elektromagnetik.

Prinsip ini merupakan prinsip kerja dasar motor induksi AC (Lee, et al. 2018: 301).

Motor induksi AC adalah motor listrik yang bekerja pada tegangan AC (Alternating Current). Motor yang paling umum digunakan pada berbagai peralatan industri. Karena rancangannya yang sederhana, murah dan mudah didapat (Parekh, 2003: 1).

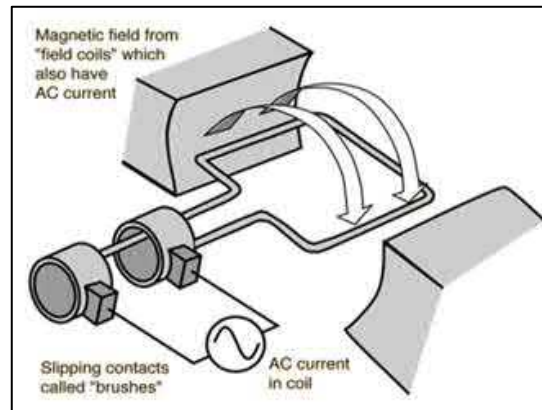
Motor Induksi adalah motor AC yang memiliki kecepatan konstan, kecepatan motor AC dapat diatur karena berbanding lurus dengan frekuensi. Motor induksi AC biasa digunakan pada kecepatan rendah. Kelebihan motor induksi AC ini dapat dioperasikan pada daya *lagging* maupun *leading*, pada motor ini tidak akan terjadi slip yang mengakibatkan terbuangnya daya sehingga efisiensi tinggi. Sedangkan kelemahan dari motor induksi AC adalah tidak ada torka awal, sehingga memerlukan daya untuk memicunya (Almanda dan Alamsyah, 2007: 1)



Gambar 2.1 Motor AC
(Sumber : <http://zoniaelektro.net/motor-ac/>)

Motor AC dapat dilengkapi dengan penggerak frekuensi variabel yang berguna untuk mengendalikan kecepatan sekaligus menurunkan konsumsi daya.

Prinsip kerja motor AC arus yang lewat melalui kumparan medan magnet, akan menghasilkan torsi yang memicu motor agar bergerak.

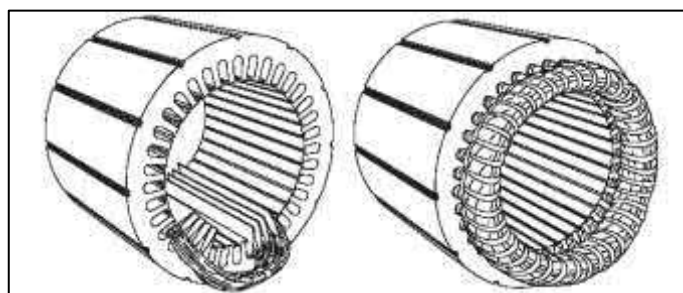


Gambar 2.2 Prinsip kerja motor AC

(Sumber : <https://wandasaputra93.wordpress.com/2015/01/10/motor-ac/>)

1. Stator

Pada bagian stator memiliki beberapa bagian aluminium, fungsi dari aluminium untuk menekan dan menjepit bersama-sama untuk membentuk rongga silinder (*stator core*) dengan slot seperti yang ditunjukkan pada (Gambar 2.3) menghasilkan medan magnet yang berputar sama dengan frekuensi yang diberikan. Motor berputar dengan kecepatan sinkron dengan persamaan berikut :

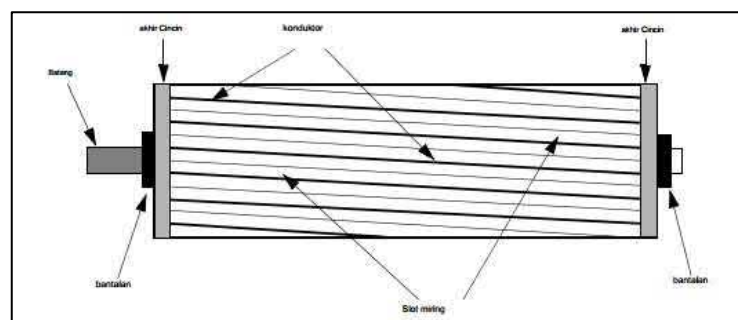


Gambar 2.3 Stator motor AC

(Parekh, 2003: 1)

2. Rotor

Rotor pada motor AC yang sering digunakan adalah rotor jenis sangkar, karena memiliki konstruksi yang sederhana, murah dan mudah di dapat, terdiri dari tembaga dan aluminium. Rotor memiliki magnet permanent dengan arus DC excited, yang berguna untuk mengunci medan magnet.



Gambar 2.4 Rotor Sangkar
(Parekh, 2003: 2)

Setiap stator dan rotor terdapat celah udara untuk induksi, sehingga energi yang mengalir dari stator ke rotor lancar. Dan torsi yang dihasilkan memaksa rotor dan beban memutar.

3. Jenis Motor AC

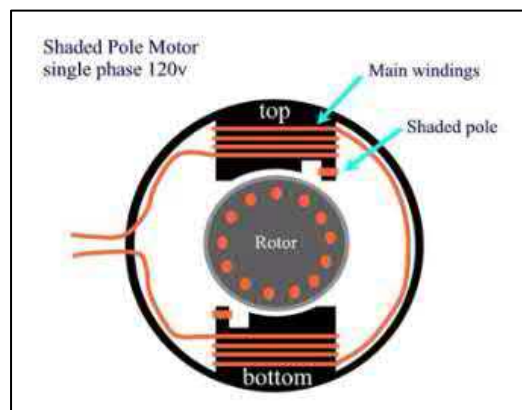
Motor AC dikategorikan menjadi dua :

a. Motor AC satu fasa

Menurut Atmam et al (2017: 2) motor induksi satu fasa dirancang untuk beroperasi menggunakan suplai tegangan satu phasa dan motor induksi tiga fasa dengan suplai tegangan tiga fasa. Motor induksi sering digunakan sebagai penggerak pada peralatan dengan kecepatan yang relatif konstan. Hal ini disebabkan karena motor induksi satu fasa memiliki

beberapa kelebihan yaitu konstruksi yang cukup sederhana, kecepatan putar yang hampir konstan terhadap perubahan beban.

Prinsip kerja motor induksi satu fasa dapat dijelaskan melalui teori medan putar ganda. Teori medan putar ganda (double revolving-field theory) adalah suatu metode lain untuk menganalisis prinsip perputaran motor induksi satu fasa disamping teori medan putar silang. Menurut teori ini, medan magnet yang berpulsa dalam waktu tetapi diam dalam ruangan dapat dibagi menjadi dua medan magnet, dimana besar kedua medan magnet ini sama dan berputar dalam arah yang berlawanan. Dengan kata lain, suatu fluks sinusoidal bolak-balik dapat diwakili oleh dua fluks yang berputar, yang masing-masing nilainya sama dengan setengah dari nilai fluks bolak-balik tersebut dan masing-masing berputar secara sinkron dengan arah yang berlawanan (Atmam et al, 2017: 3)

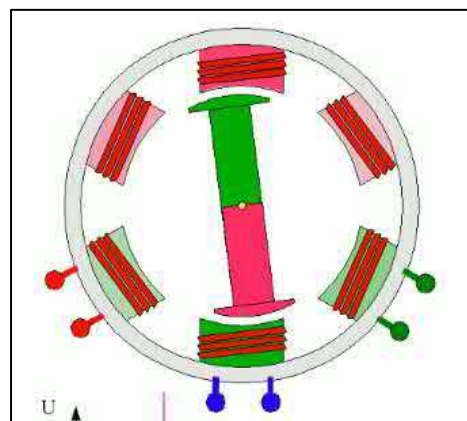


Gambar 2.5 Gambaran motor satu fasa
(Sumber : <https://artikel-teknologi.com/macam-macam-motor-listrik-ac/3/>)

b. Motor AC tiga fasa

Menurut Muchsin (2003: 5) Motor induksi 3 fasa adalah alat penggerak yang paling banyak digunakan dalam dunia industri. Hal ini dikarenakan motor induksi mempunyai konstruksi yang sederhana, kokoh, harganya relatif murah, serta perawatannya yang mudah, sehingga motor induksi mulai menggeser penggunaan motor DC pada industri

Motor ini adalah motor yang tidak menggunakan kapasitor menggunakan senftrifugal switch untuk memicunya (Parekh, 2003: 6). Menurut Yusnita dan Tjahjono, (2012: 1) motor AC tiga fasa berkerja berdasarkan medan elektromagnetik yang diinduksikan dari kumparan stator ke rotor. Kecepatan pada medan magnet dipengaruhi oleh frekuensi sumber yang masuk ke motor. Motor ini mempunyai arus start yang besar hingga mencapai beberapa kali lipat dari arus nominalnya. Karateristiknya dapat dilihat dengan menganalisa kondisi motor dengan beban rendah hingga kondisi beban maksimum yang membuat motor berhenti.



Gambar 2.6 Gambaran motor tiga fasa
(Sumber : <https://artikel-teknologi.com/macam-macam-motor-listrik-ac/3/>)

2.2.3 Motor DC

Motor DC merupakan motor yang memerlukan suplai daya yang searah pada kumparan untuk diubah menjadi energi mekanik. motor DC terdapat dua kumparan yaitu kumparan yang berfungsi untuk menghasilkan medan magnet yang berfungsi untuk tempat terbentuknya gaya gerak listrik (ggl E). jika arus dalam kumparan berinteraksi dengan medan magnet, akan timbul torsi (T) yang akan menjadi kan gaya putar pada motor (Nugroho dan Agustina, 2015: 29).

Motor arus searah (DC) bekerja berdasarkan prinsip interaksi antara dua fluks magnetik. Ketika kumparan medan dan kumparan jangkar dihubungkan dengan suatu sumber tegangan DC maka pada kumparan medan akan mengalir arus medan sehingga menghasilkan fluks magnet yang arahnya dari kutub utara menuju kutub selatan. Sedangkan pada kumparan jangkar menghasilkan arus jangkar, sehingga pada konduktor jangkar timbul fluks magnet yang melingkar. Sesuai dengan hukum Lorentz, interaksi antara kedua fluks magnet ini akan menimbulkan suatu gaya mekanik pada konduktor jangkar yang disebut gaya Lorentz. Menurut Mayur et al, (2017) Besar gaya ini sesuai dengan persamaan :

$$F = B \cdot I \cdot l \dots\dots\dots 2.1$$

Dimana :

F = gaya yang bekerja pada konduktor (N)

B = kerapatan fluks magnetik (Wb/m²)

I = arus yang mengalir pada konduktor (A)

l = panjang konduktor (m)

Gaya yang timbul pada konduktor tersebut akan menghasilkan momen putar atau torsi. Torsi yang dihasilkan oleh motor dapat ditentukan dengan persamaan pada (<https://taufiqurrokhman.wordpress.com/2012/01/27/menghitung-torsi-dan-daya-mesin-pada-motor-bakar/>) :

$$T = F \cdot r \dots\dots\dots 2.2$$

Dimana :

T = torsi (Newton-meter)

F = gaya (Newton)

r = jari-jari rotor (meter)

Momen putar atau torsi dapat digunakan untuk menentukan daya yang dihasilkan oleh motor. Daya motor dapat dihitung dengan persamaan pada (<https://taufiqurrokhman.wordpress.com/2012/01/27/menghitung-torsi-dandaya-mesin>).

$$P = \frac{2\pi \cdot N \cdot T}{60.000} \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana:

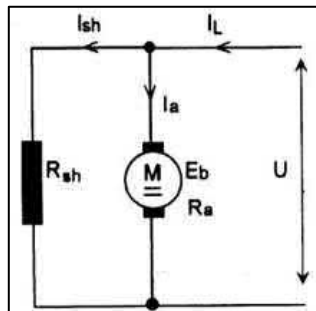
P = Daya motor (KW = KiloWatt)

N = Kecepatan putar motor (rpm)

T = Torsi (N-m)

Motor DC banyak digunakan pada industri, dalam penggunaannya motor DC dapat berkerja secara efisien, dimana efisiennya dapat dilihat dari besar nilainya. Menurut Putra dan Dinzi, (2014: 13) motor DC jenis pengaturan shunt adalah motor listrik yang memiliki kecepatan putaran yang konstan dan tidak tergantung pada beban. Penggunaan motor DC shunt digunakan pada mesin

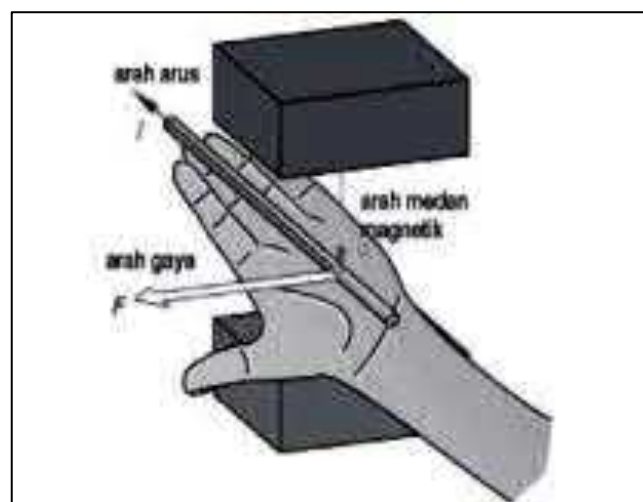
komersial dengan penggunaan beban awal yang rendah seperti pada mesin bubut dan lift.



Gambar 2.7 Rangkaian motor *Shunt*

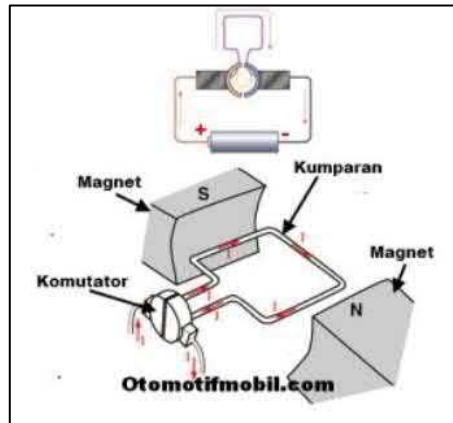
(Sumber : <https://azzahratunnisa.wordpress.com/2009/05/27/jenis-jenis-motor-dc/>)

Prinsip kerja motor DC berdasarkan tangan kiri, sepasang magnet permanen utara selatan menghasilkan garis medan magnet Φ , kawat pengantar diletakkan diatas tangan kiri ditembus garis medan magnet Φ . kawat dialirkan arus listrik DC sebesar I searah keempat jari tangan, maka kawat mendapatkan gaya sebesar F searah ibu jari (Gambar 2.8) (Margana, 2016: F23).



Gambar 2.8 Aturan tangan kiri prinsip kerja motor
(Margana, 2016: F23)

Cara kerja motor DC saat arus listrik DC yang mengalir melalui kumparan pada medan magnet akan menghasilkan torsi yang berguna menggerakkan motor.



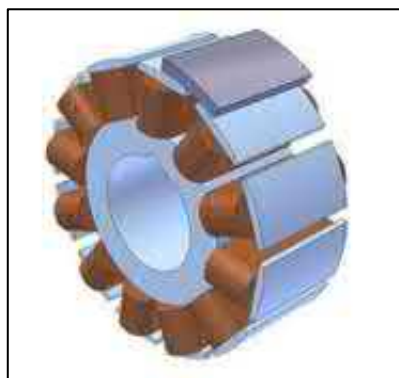
Gambar 2.9 Prinsip kerja motor DC

(Sumber : <https://otomotifmobil.com/prinsip-kerja-motor-dc-atau-cara-kerja-motor-listrik-dc/>)

2.2.4 Motor Radial (Konvensional)

Prinsip kerjanya pada elektromagnetik, dengan menggunakan interaksi dari medan magnet, daya yang dihasilkan dari kumparan dan magnet. Motor radial memiliki satu stator dan satu rotor pada bagian dalam.

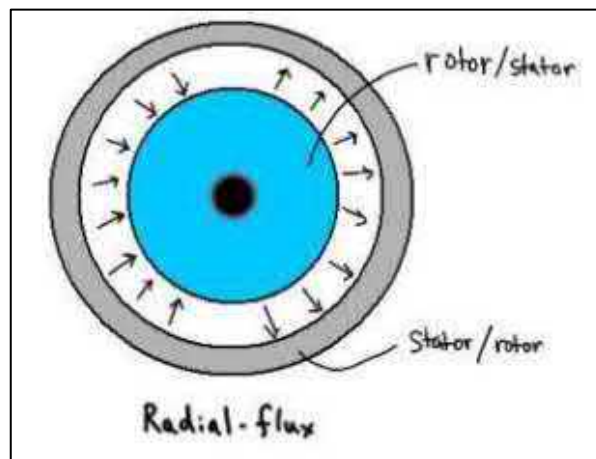
Motor Radial merupakan generator permanent magnet yang mempunyai sumbu putar sehingga arah *fluks* searah dengan arah putaran rotor. Sehingga menghasilkan *fluks* oleh medan magnet yang melingkari lilitan bagian luar.



Gambar 2.10 Posisi Magnet Motor Radial

(Sumber : <https://otomotifmobil.com/prinsip-kerja-motor-dc-atau-cara-kerja-motor-listrik-dc/>)

Motor radial memiliki keunggulan yaitu mudah dalam pemasangan magnet permanent ke inner rotor. Motor radial memiliki struktur yang mirip dengan motor DC maupun motor AC. Motor radial memiliki struktur yang kuat dan bentuk sederhana. Pada bagian motor ini terdapat stator pada bagian dalam dan rotor pada bagian luar magnet yang ditempatkan pada sekeliling rotor.



Gambar 2.11 Konfigurasi rotor dan stator motor radial (Hincapie, et al. 2012: 6)

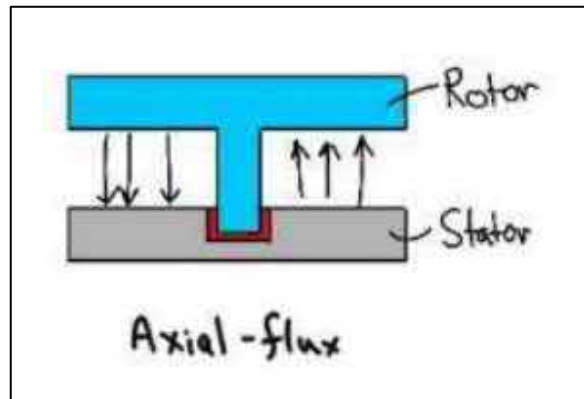


Gambar 2.12 Motor Radial (Moreels dan Leijnen, 2018: 9)

2.2.5 Motor Axial

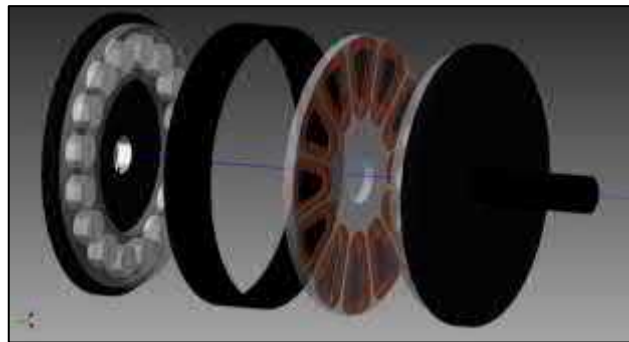
Menurut Hincapie et al (2012: 6) motor Axial adalah motor yang prinsip kerjanya pada elektromagnetik, dengan menggunakan interaksi dari medan magnet, daya yang dihasilkan dari kumparan dan magnet. Terdiri dari dua bagian stator

dan rotor. Motor listrik ini dirancang menggunakan proses fluks dimana rotor dan stator memiliki celah udara kecil. diantaranya seperti Gambar 2.15



Gambar 2.13 Konfigurasi rotor dan stator motor axial
(Hincapie, et al. 2012: 6)

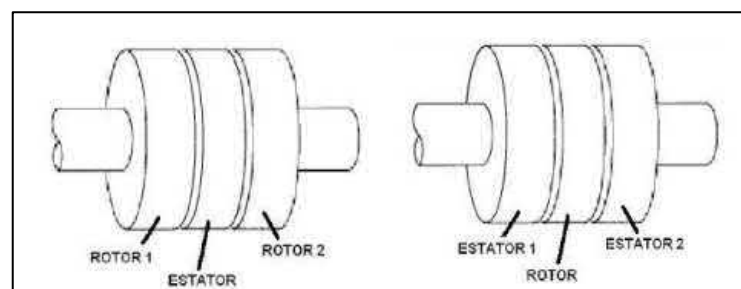
Pada konfigurasi motor axial terdapat celah udara kecil yang berfungsi untuk mengurangi tekanan pada mesin. Axial memiliki posisi magnet yang berapa didalam sejajar dengan kumparan Gambar 2.16.



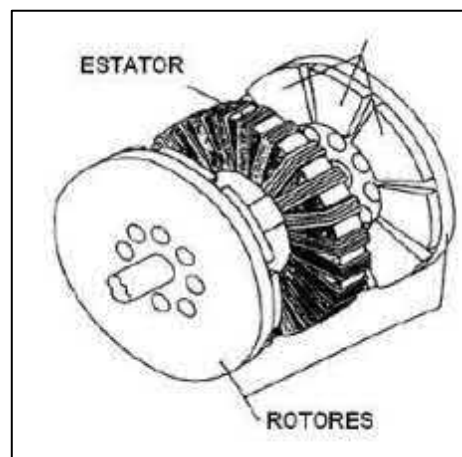
Gambar 2.14 Bagian Dalam Motor axial
(Sumber: <https://grabcad.com/library/axial-flux-electric-motor-1>)

Mesin berputar karena adanya stator dan rotor, diantaranya adalah *reversible*, dapat berfungsi sebagai motor dan generator. Kemajuan zaman bahan superkonduktor dan bahan magnet kemungkinan dapat memecahkan masalah dengan cara mengganti bahan fosil menggunakan bahan magnet tinggi seperti *magnet Neodymium* (NdFeb) berasal dari senyawa $Nd_2 Fe_{14} B$ ditemukan oleh

General Motor (GM) pada tahun 1984, dan dikembangkan menjadi magnet disintesis padat berdasarkan senyawa yang ditemukan. Dengan menggunakan bahan yang di kembangkan secara khusus untuk digunakan dalam pembuatan motor listrik dan mesin listrik dapat digunakan sebagai pengganti mesin karburator yang menonjolkan Mesin Listrik *Fluks Axial Magnet Permanen* (AFMPM) atau sinkron dan mesin induksi (AFIM) (Hincapie, et al. 2012: 7)



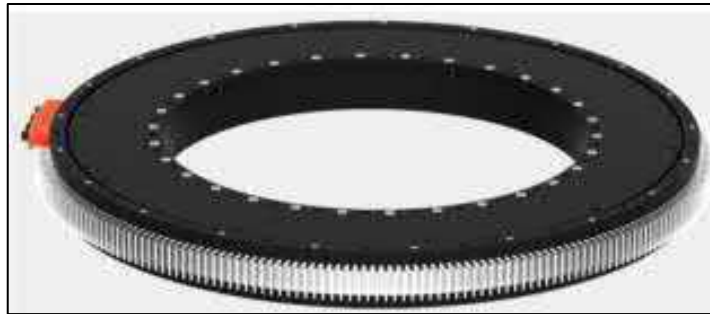
Gambar 2.15 AFMPM / AFMEPM
(Hincapie, et al. 2012: 7)



Gambar 2.16 Axial motor
(Hincapie, et al. 2012: 7)

Menurut Hincapie et al (2012: 8) Motor axial memiliki konfigurasi fluks yang memiliki keuntungan yang signifikan sehubungan dengan motor radial, yang jenis konfigurasinya digunakan untuk memastikan efisiensi motor lebih besar dari 90%. Perusahaan *MAGNAX* telah mengembangkan *Next- Gen Axial Flux Motor*

(Gambar 2.19) yang merupakan motor perakitan langsung dengan menawarkan efisiensi 96% untuk dipakai dalam turbin angin dan listrik. Mesin dengan proporsi besar memiliki ukuran panjang 140mm dan diameter 1600mm dengan berat 850 kg, dengan generator sebesar 16 Nm.



Gambar 2.17 Magnax *Next- Gen Axial Motor*
(Hincapie, et al. 2012: 8)

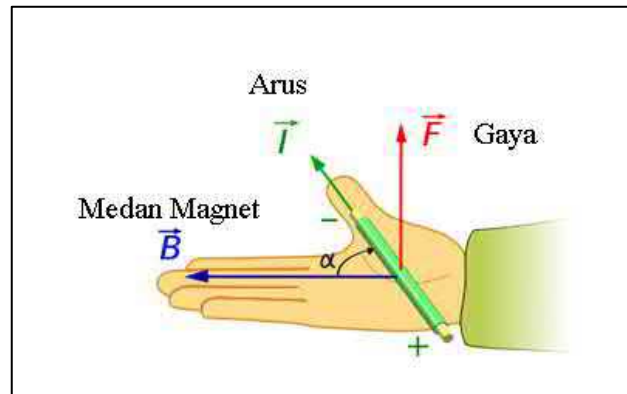
Pengembangan motor axial dengan menggunakan model motor tiga-phase power adalah *EMRAX 188* di tunjukkan pada (Gambar 2.20) dapat menghasilkan mesin dengan torsi 50 Nm dengan efisiensi 98%, dengan ukuran mesin diameter 188 mm dan panjang 77 mm (Hincapie, et al. 2012: 10).



Gambar 2.18 *EMRAX 188*
(Hincapie, et al. 2012: 10)

Motor Axial didasarkan pada interaksi magnet pada rotor dengan menggunakan medan elektromagnetik yang dihasilkan oleh kumparan, hasil induksi arus pada rotor untuk menghasilkan torsi, penjelasan dari fenomena ini

didasarkan pada Hukum *Lorentz*, bahwa setiap muatan listrik yang bergerak dalam medan magnet menghasilkan kekuatan (Hincapie, et al. 2012: 11).



Gambar 2.19 Representasi Grafis *Hukum Lorentz*
(Sumber: https://id.wikipedia.org/wiki/Gaya_Lorentz)

Dengan prinsip bahwa gerakan motor listrik dapat dicapai dengan menjaga beban konstan dan memvariasikan arah fluks medan magnet agar dapat menghasilkan gerakan (Hincapie, et al. 2012: 11).

2.2.6 *Motor Brushless Direct Current (BLDC)*

Menurut Indradewa et al (2013: 1) motor BLDC merupakan motor yang di gerakkan dengan menggunakan arus searah, pada motor BLDC memiliki beberapa prinsip namun untuk kerjanya semua sama. Motor BLDC biasanya digunakan dalam jangka waktu yang panjang, maka saat pemilihan motor ini ada banyak faktor yang harus di perhatikan, contohnya biaya, jumlah daya yang dibutuhkan dan berapa lama pemakaian.

BLDC merupakan motor yang paling meningkat perkembangannya. Penggunaannya yang diminati banyak industri. Karena banyak memiliki keuntungan di banding motor DC dan motor induksi biasa. Penggunaan BLDC

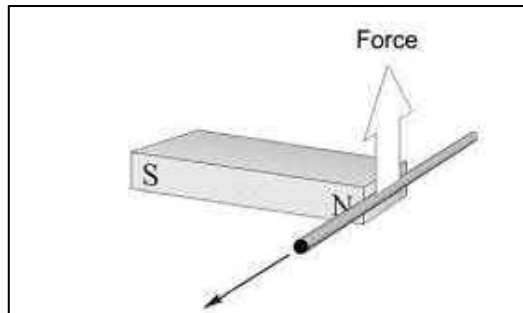
tidak dengan sikat atau brush untuk medan magnet melainkan *elektronis commutated* (Indradewa, et al., 2013: 2).

Motor DC *brushless* memiliki banyak keuntungan dibandingkan motor DC konvensional. Namun mempunyai prinsip kerja yang rumit karena memerlukan rangkaian kendali semikonduktor tenaga. Dengan merancang kendali semikonduktor yang mempunyai daya besar dimasa mendatang motor DC *brushless* dapat ditingkatkan kapasitas dayanya (Antono, 2012: 37).

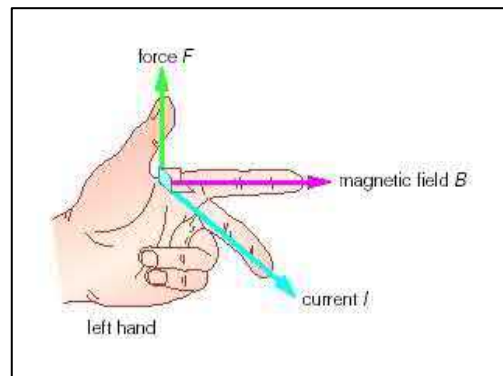
Menurut Indradewa et al (2013: 1) BLDC mempunyai performa yang tinggi, karena itu BLDC dapat memberikan torsi dalam jumlah yang besar pada rentang kecepatan yang luas. Pada motor BLDC memiliki dua bagian utama, rotor dan stator. Bagian penting lainnya adalah gulungan stator dan magnet rotor. Konsep dasar motor BLDC terdapat pada karakteristik motornya yang berguna untuk mengubah energy elektrik (listrik) menjadi energy mekanis. Bedanya dengan motor AC yaitu motor AC memiliki kelebihan diantaranya dalam perawatan, mudah dalam pengontrolan kecepatan.

Salah satu komponen motor BLDC memiliki kemampuan untuk saling tarik menarik dan tolak menolak yaitu pada bagian magnet. Magnet memiliki 2 kutub yaitu kutub selatan dan utara. Inti pada Medan magnet yaitu dibentuk oleh 2 kutub. Jika ada sebuah konduktor yang di letakan pada sebuah medan magnet, maka konduktor tersebut akan mendapatkan sebuah gaya (Gambar 2.20). Pada percobaan yang dilakukan menunjukkan bahwa arah dari gaya tersebut tergantung dari arus pada konduktor dan kekuatan medan magnet. Gaya yang diterima oleh konduktor paling besar akan terjadi ketika medan magnet tegak lurus dengan

konduktor. Arah gaya yang terjadi pada konduktor dapat ditentukan melalui prinsip tangan kiri (Gambar 2.21) Dimana telunjuk menunjukkan flux magnet, jari tengah menunjukkan arah arus sementara pada bagian jempol menunjukkan gerak dari konduktor (Indradewa, et al. 2013: 1)



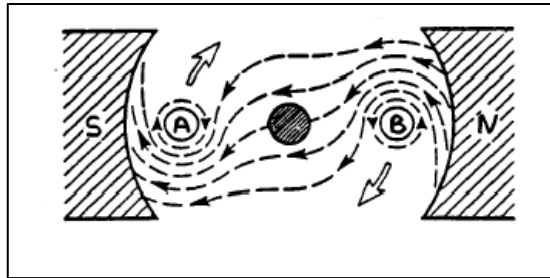
Gambar 2.20 Gaya Electromagnet yang ditimbulkan oleh magnet dan konduktor (Indradewa, et al. 2013: 1)



Gambar 2.21 Mode Tangan Kiri Fleming (Indradewa, et al. 2013: 1)

Gerak pada motor BLDC menggunakan konduktor yang berbentuk U diletakkan diantara kedua kutub magnet, yang menyebabkan terjadinya reaksi antara medan magnet yang ditimbulkan oleh konduktor itu sendiri dengan medan magnet dari magnet. Pada (Gambar 2.22) menjelaskan diagram reaksi medan magnet tersebut. Lingkaran A dan B menunjukkan ujung dari konduktor yang berbentuk U. kemudian arus mengalir dari ujung A ke ujung B. pada lingkaran A,

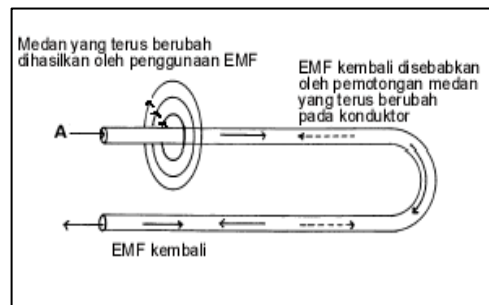
arus masuk kedalam konduktor sehingga menurut kaidah ulir kanan, akan ada medan magnet pada bagian A searah jarum jam. Sementara pada ujung B, arus menuju keluar sehingga akan ada medan magnet pada konduktor berlawanan arah jarum jam (Indradewa, et al. 2013).



Gambar 2.22 Reaksi Garis Flux
(Indradewa, et al. 2013: 2)

Pada lingkaran A, medan magnet konduktor A akan memberi medan yang kuat dibawah konduktor sehingga pada lingkaran B, medan yang kuat akan timbul dibawah konduktor sehingga pada lingkaran B, medan yang kuat akan timbul dibawah konduktor. Maka akan menyebabkan lingkaran B akan terdorong kebawah sementara lingkaran A akan naik. Hal ini akan terus berulang sehingga terjadi perputaran pada konduktor (Indradewa, et al. 2013: 2).

Kemudian dalam BLDC ada *Gaya Elektromotif*, EMF induksi di timbulkan karena adanya gaya yang dihasilkan oleh konduktor yang melawan gaya yang diberikan kepada konduktor tersebut. Jadi jika sebuah konduktor listrik memotong garis medan magnet maka akan terjadi gaya gerak listrik pada konduktor tersebut seperti (Gambar 2.23), bahwa gaya elektromotif yang berkerja pada konduktor jika tidak elektromotif, tidak akan terjadi pergerakan pada konduktor.



Gambar 2.23 EMF di dalam sebuah konduktor
(Inradewa, et al. 2013: 2)

Pada BLDC ada berbagai komponen yang berfungsi untuk menggerakkan :

1. Stator

Menurut Inradewa, et al. (2013: 3) stator adalah sebuah bagian pada motor yang diam/statis fungsinya adalah sebagai medan putar motor yang digunakan untuk memberikan gaya elektromagnetik pada rotor sehingga motor dapat berputar. BLDC mempunyai stator yang berjumlah 12 lilitan (electromagnet) yang bekerja secara electromagnet dimana stator pada BLDC terhubung dengan tiga buah kabel yang kemudian disambungkan dengan rangkaian control sedangkan pada motor BLDC konvensional statornya terdiri dari dua buah kutub magnet permanen.



Gambar 2.24 Stator
(Inradewa, et al. 2013: 3)

Lilitan stator pada BLDC terdiri dari dua jenis, yaitu belitan stator jenis trapezoidal dan jenis sinusoidal. yang menjadi perbedaan dari kedua jenis lilitan adalah pada hubungan antara koil dan lilitan stator yang bertujuan untuk memberikan EMF (*Electro Motive Force*) yang selalu berbeda. EMF adalah tegangan balik yang dihasilkan oleh lilitan BLDC pada saat BLDC tersebut berputar sehingga memiliki polaritas tegangan yang berlawanan arahnya dengan tegangan sumber yang dibangkitkan. Besar dari EMF di pengaruhi dari kecepatan sudut putar motor (Indradewa, et al. 2013).

2. Rotor

Menurut Indradewa, et al. (2013: 3) rotor adalah sebuah bagian dari rotor yang berputar karena adanya gaya elektromagnetik dari stator, pada motor BLDC rotornya berbeda dengan rotor pada motor BLDC konvensional, yang tersusun dari satu buah electromagnet.



Gambar 2.25 Rotor
(Indradewa, et al. 2013: 3)

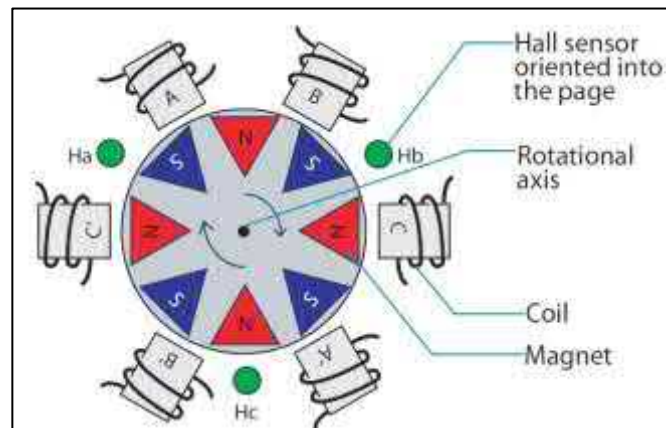
Rotor dibuat dari magnet tetap dan desain dari dua sampai delapan kutub Magnet Utara (N) atau Selatan (S). material magnet yang bagus

digunakan untuk mendapatkan kerapatan medan magnet yang bagus. Magnet ferrit yang digunakan untuk membuat magnet tetap. Pada kemajuan teknologi campuran logam sudah jarang digunakan. *Magnet Ferrit* lebih murah tetapi material ini mempunyai kekurangan yaitu *flux density* yang rendah untuk ukuran volume material yang diperlukan untuk membuat rotor (Indradewa, et al. 2013: 3).

3. Hall Sensor

Tidak sama dengan DC motor brushed, putaran pada BLDC motor dikendalikan secara elektronik. Dalam proses berputarnya motor BLDC, gulungan-stator harus diberi tenaga secara berurutan dan teratur. Hall ini penting untuk mengetahui posisi rotor sehingga kontrol dapat mengetahui lilitan mana yang harus diberi tegangan sesuai urutan. Posisi rotor, digunakanlah Hall Sensor yang ditempelkan ke dalam stator (Indradewa, et al. 2013: 4).

Menurut Indradewa, et al. (2013: 4) pemasangan Hall sensor ini harus benar-benar sesuai dengan posisi magnet pada rotor. Kesalahan posisi pada pemasangan akan menyebabkan kesalahan pula pada saat pemberian tegangan pada lilitan stator. Biasanya Hall sensor ini dipasang pada suatu board atau PCB dengan posisi yang sudah fix kira-kira selisih 60° sampai 120° antara sensor yang satu dengan yang lain.



Gambar 2.26 Sensor hall
(Indradewa, et al. 2013: 4)

Prinsip kerja hall sensor harus ada arus yang mengalir jika ingin digunakan sebagai pendeteksi fluks magnet.

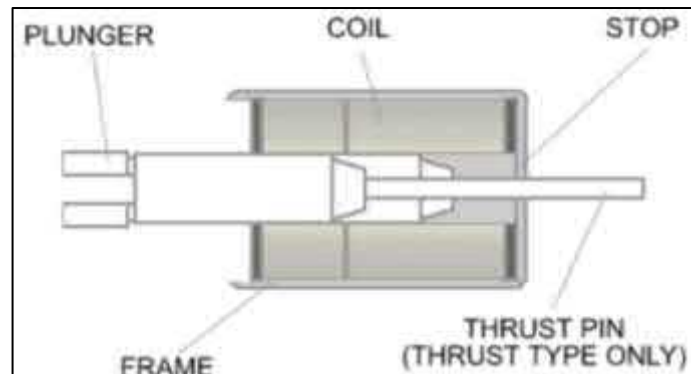
4. Rangkaian Pengendalian (*Controller*)

Menurut Indradewa, et al. (2013: 4) sebuah motor BLDC memiliki sebuah *Controller* yang berfungsi sangat penting pada operasi BLDC karena itu *trigger pulsa* yang berada pada elektromagnetik (stator) motor BLDC sangat dibutuhkan karena memberikan pengaturan besarnya arus yang mengalir sehingga putaran pada motor bisa stabil dan akurat. Inverter pada motor berperan untuk mengubah tegangan DC yang masuk pada *Controller* biasanya *multipole* tiga phase maka dibutuhkan inveter tiga phase tegangan DC menjadi AC agar dapat berputar.

2.2.7 Solenoid Motor

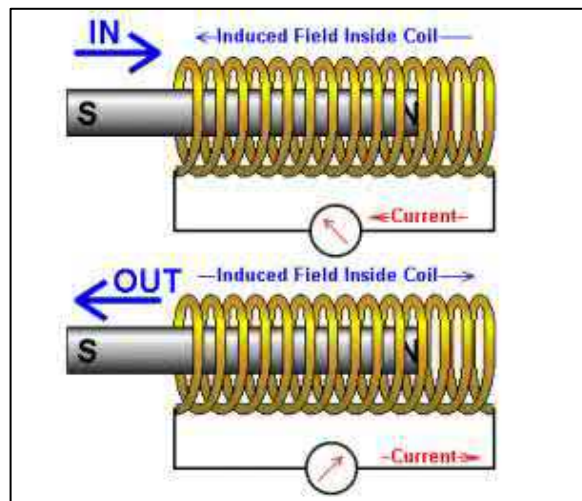
Solenoid adalah sebuah kawat yang dililit dengan pola *heliks*, saat membawa arus, *solenoid* menjadi perangkat elektro-mekanik, dimana energi listrik diubah menjadi pekerjaan mekanis. Inti dari sebuah solenoid biasanya terbuat dari dua bagian, yang dapat dipindahkan dengan actuator atau pendorong

dan inti pada solenoid adalah pada backstop. *Plunger* pada *solenoid* akan bergerak tetapi pada satu pusat. untuk menggerakkan plunger diperlukan arus atau energi listrik, yang menyebabkan *plunger* secara otomatis akan bergerak secara tarik-menarik (Akhtar et al., 2017: 1).

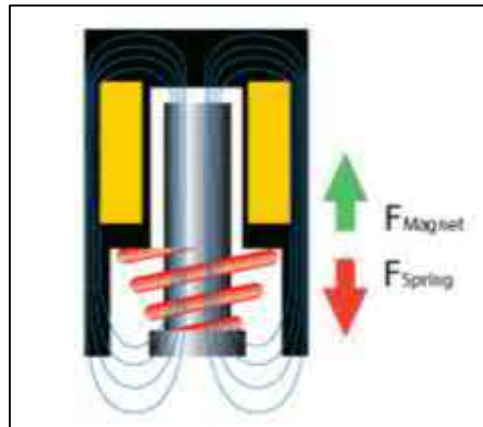


Gambar 2.27 Solenoid
(Mittal, 2017: 2)

Poros *solenoid* ada sebuah piston seperti silinder yang terbuat dari besi atau baja, yang disebut dengan *plunger*.



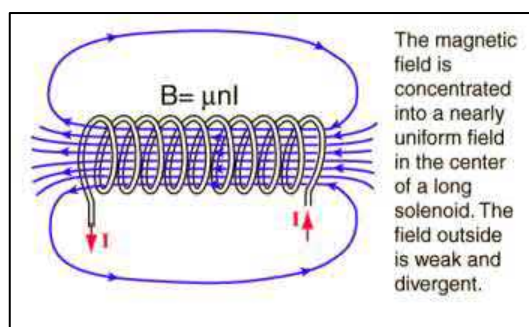
Gambar 2.28 Gambar Pergerakan Magnet didalam kumparan
(Mittal, 2017: 3)



Gambar 2.29 Gambar Simulasi Selenoid Motor
(Mittal, 2017: 3)

Medan magnet yang dihasilkan di sekitar solenoid didasarkan pada dua hukum. Salah satunya adalah Hukum *Ampere* dan yang lainnya adalah Hukum *Biot-Savart*.

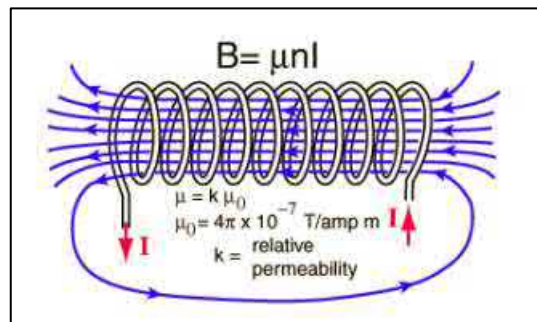
Bidang Solenoid Sebuah gulungan kawat dapat digunakan untuk menghasilkan medan magnet yang hampir seragam mirip dengan magnet batang. Gulungan seperti itu, yang disebut solenoida, memiliki jumlah yang sangat besar aplikasi praktis. Medan bisa sangat diperkuat dengan penambahan besi inti. Inti semacam itu khas dalam elektromagnet.



Gambar 2.30 Aliran Arus pada Kumparan
(Mittal, 2017: 4)

Medan magnet yang dihasilkan disekitar *solenoid* Gaya elektromagnetik bergantung pada arus yang mengalir melalui koil dan jumlah putaran yang melilit

pada koil. Berdasarkan hukum Ampere, gaya elektromagnetik bergantung pada arus yang mengalir melalui *coil* dan jumlah lilitan pada *coil*. Sehingga medan magnet pada solenoid dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.



Gambar 2.31 Perhitungan Medan Magnet Solenoid
(Mittal, 2017: 4)

Dimana :

μ = permeabilitas

n = jumlah lilitan

I = arus

Sedangkan untuk kekuatan medan magnet dapat dihitung dengan persamaan menurut Mayur et al., (2017) sebagai berikut.

$$H = NI / L \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana:

N = jumlah lilitan

I = arus yang mengalir pada kumparan (*coil*)

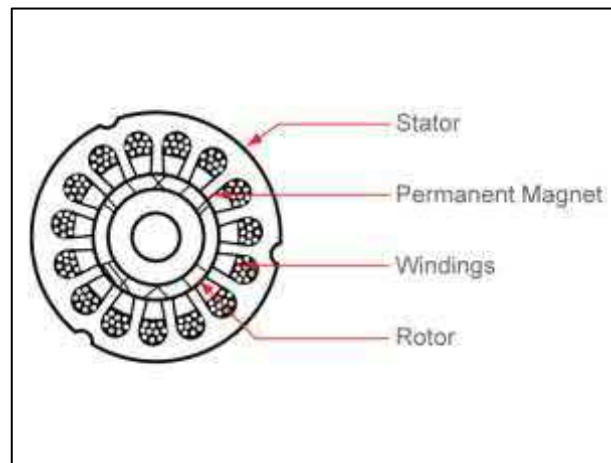
L = panjang kumparan (*coil*)

2.2.8 Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSM)

Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSM) menggunakan magnet permanen yang tertanam di rotor baja untuk menciptakan medan magnet konstan. Stator membawa gulungan yang terhubung ke suplai AC untuk menghasilkan medan magnet yang berputar. Pada kecepatan sinkron, kutub rotor terkunci pada medan magnet yang berputar. Motor *sinkron* magnet permanen mirip dengan motor DC brushless.

PMSM digunakan pada aplikasi dengan daya kecil sampai tinggi, keuntungan menggunakan PMSM adalah efisiensinya tinggi, daya tinggi, ukurannya sederhana membuat penggunaan baik diterapkan pada motor konvensional, pada PMSM terdapat *cogging torsi* (CT), namun pemakaiannya masih dipertimbangkan. *Cogging torsi* adalah karakteristik pada permanent magnet yang disebabkan oleh geometri, mempengaruhi kemampuan awal, menimbulkan bising dan vibrasi mekanik bila dipasang pada magnet didalam turbin. Didalam PMSM *cogging torsi* berinteraksi pada fluk magnet dan gigi stator (Ilka et al, 2018).

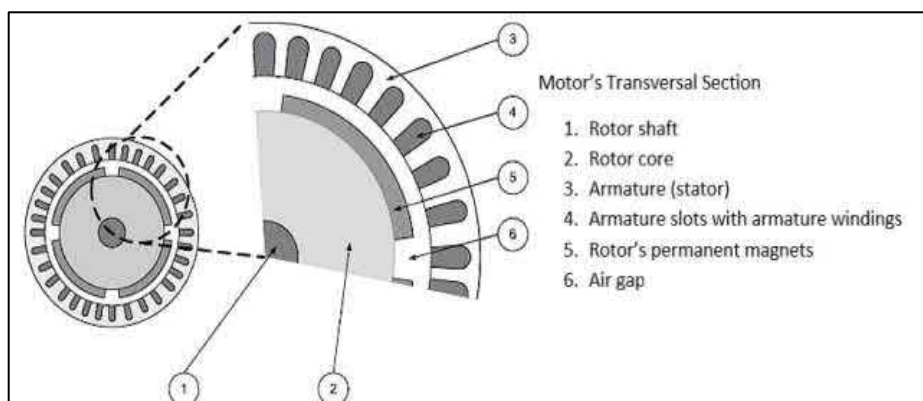
Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSM) memiliki keuntungan efisiensi yang tinggi dan toleransi kesalahan yang tinggi, namun dalam kondisi didalam motor jika tidak seimbang torsi dapat menyebabkan *fluktuasi* bahkan mengarah pada kerusakan. Toleransi kesalahan dalam sistem kontrol pada PMSM sangat penting (Ilka et al, 2018).



Gambar 2.32 PMSM dengan 1 stator dan 1 rotor
 (Sumber : <https://www.microchip.com/design-centers/motor-control-and-drive/motor-types/permanent-magnet-synchronous-motor>)

Komponen-komponen utama *Permanent Magnet Synchronous Motors* (PMSM) hampir sama dengan komponen pada BLDC, komponen utama dibagi menjadi 4 yaitu sebagai berikut :

1. Rotor
2. Stator
3. Permanen magnet
4. Windings (coil)



Gambar 2.33 Komponen *Permanent Magnet Synchronous Motors*
 (Sumber : Microchip, 2018: 4)

2.2.9 Magnetik Fluks

Fluks adalah garis-garis gaya (magnet dan listrik). Menurut Warsito dan Haning (2018: 23), fluks magnetik adalah suatu keadaan dimana sejumlah garis kuat medan magnetik dapat menembus suatu luas permukaan tertentu. Timbulnya medan magnetik bisa diakibatkan oleh beberapa penyebab, seperti adanya arus listrik yang mengalir pada suatu kawat ataupun adanya suatu benda magnetik. Gejala fluks magnetik dapat diamati dengan mengukur jumlah induksi medan magnetik yang menembus suatu luas permukaan tertentu.

Fluks magnetik yang melalui bidang tertentu sebanding dengan jumlah medan magnet yang melalui bidang tersebut. Jumlah ini termasuk pengurangan atas medan magnet yang berlawanan arah. Jika medan magnet seragam melalui bidang dengan tegak lurus, nilai fluks magnetik didapat dari perkalian antara medan magnet dan luas bidang yang dilaluinya. Fluks magnetik yang datang dengan sudut tertentu diperoleh menggunakan perkalian titik antara medan magnet dan vektor luas A .

$$\Phi = B \cdot A \dots \dots \dots (2.5)$$

Menurut Warsito dan Haning, (2018: 24) Jika garis medan membentuk sudut (θ), maka fluks magnetik dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

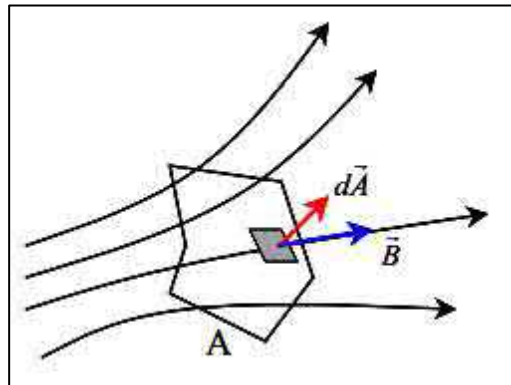
$$\Phi = B a \cos \theta \dots \dots \dots (2.6)$$

Dimana:

B = kuat medan magnet (Weber/m²)

A = luas area (m²)

θ = sudut antara garis normal dan garis medan



Gambar 2.34 Fluks magnetik menembus permukaan dalam arah tegak lurus (Abdullah, 2006: 225)

Flux linkage sering diartikan sebagai fluks magnetik yang melewati kumparan. *Flux linkage* dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$= N \cdot B \cdot A \dots \dots \dots 2.7$$

(sumber: <https://kidskunst.info/37/05609-magnetic-flux-formula.htm>)

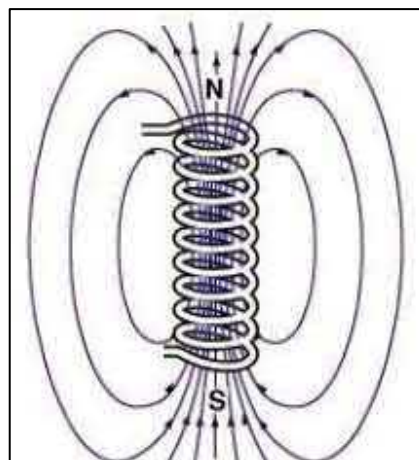
dimana:

Φ = fluks magnetik

N = jumlah lilitan pada kumparan

B = kuat medan magnet (Weber/m^2)

A = luas area (m^2)



Gambar 2.35 Fluks magnetik melewati kumparan
Sumber: Hincapie, et al., (2012: 11)

Menurut Allen (2012) fluks yaitu garis-garis gaya (magnet dan listrik). Dalam optika, fluks berarti berkas cahaya yang menembus luas permukaan. Fluks cahaya menyatakan energi per satuan waktu, dinyatakan dalam satuan lumen atau intensitas cahaya. Fluks atau garis-garis gaya magnet dan listrik, merupakan garis khayal di sekitar magnet dan muatan listrik yang dapat menentukan besar kuat medan magnet dan medan listrik. Di dalam magnet, arah fluks magnet dari kutub selatan (KS) menuju kutub utara (KU), sedangkan di luar magnet, dari kutub utara (KU) menuju kutub selatan (KS). Arah fluks listrik adalah dari muatan positif (+) menuju muatan negatif (-).

2.2.10 Software SolidWork

Software desain yang digunakan untuk industri saat ini sangat banyak. *Software SolidWorks* adalah salah satu software yang mumpuni dalam desain sebagai rekayasa didalam dunia industri. Pada mulanya tahun 1993 *SolidWorks* dikembangkan oleh *Jon Hirschtick*, Dalam perkembangan *SolidWork* yang selalu mengedepankan kemudahan dalam penggunaan (*Easy to Use*) Sebagai acuan. Dimana filosofi *Easy to Use* inilah yang menjadi pondasi *SolidWorks* dalam proses pembuatannya. Selain itu juga saat ini *SolidWorks* bukan hanya dikenal sebagai software 3D CAD biasa, tetapi *SolidWorks* juga menawarkan solusi terintegrasi untuk membantu produktifitas dalam bekerja.

Menurut *AppliCADIndonesia* *SolidWorks* dibagi dalam 3 jenis dalam mengedepankan fungsi dan kebutuhan. Agar mudah dalam membantu kebutuhan desain.

1. *SolidWorks* Standard untuk membuat desain 3D dan 2D. sangat cocok untuk membuat *weldment*, *sheet metal*, permukaan dan alan percetakan dengan sempurna
2. *SolidWorks* Premium Software 3D dengan desain komprehensif dengan fitur tambahan seperti simulasi dan alat validasi. *SolidWorks* Premium dilengkapi dengan ECAD/MCAD, *Reverse Engineering* serta *routing* untuk membuat kawat dan pipa yang fungsional
3. *SolidWorks* Professional adalah software yang memiliki fitur diatas *SolidWorks* Standard, dengan adanya peningkatan produktivitas desain, render *photorealistic* dan dilengkapi dengan komponen-komponen canggih lain.

2.2.11 Software MagNet

Menurut Edwards (2014) *Software MagNet* adalah software percobaan untuk memecahkan persamaan *Maxwell* agar dapat menemukan medan magnet dalam model *magnetostatic* 2D. percobaan ini juga menawarkan proses adaptasi yang secara otomatis mengidentifikasi pada daerah yang paling membutuhkan perbaikan untuk meningkatkan kualitas dan solusi analisis. Medan magnet yang dihitung dapat dipandang sebagai bayangan, panah, atau kontur plot atau gambaran lapangan secara 2D.

Software MagNet berfungsi agar dapat membantu memudahkan untuk menganalisis model magnetostatic, teknologi *infolytica* ini menghasilkan tampilan elemen hingga sehingga memberikan solusi lapangan yang akurat (Edwards, 2014).

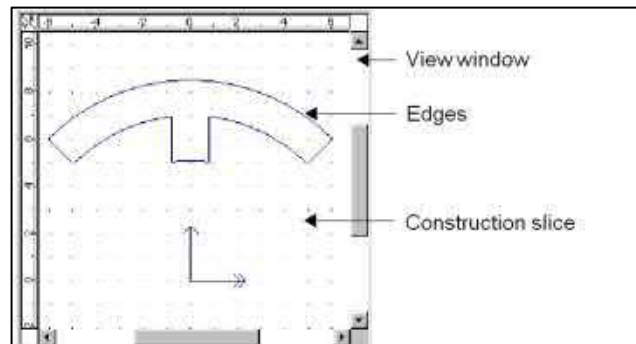
Struktur yang dapat disimulasikan dengan *Software MagNet* :

1. Mesin DC
2. Akuator
3. Solenoid
4. Sensor
5. Pengeras suara

Software MagNet ini membuat model geometris dari kondisi komponen yang mau dianalisis. Pembuatan model dari bidang plot dan menghasilkan numeric yang dapat dilihat. Tampilan elemen hingga dapat disesuaikan untuk meningkatkan akurasi pada saat menganalisis. Model magnet terbuat dari geometric dan material, bentuk dan model yang di tentukan (Edwards, 2014).

Model geometric dibangun dari tiga model dasar seperti :

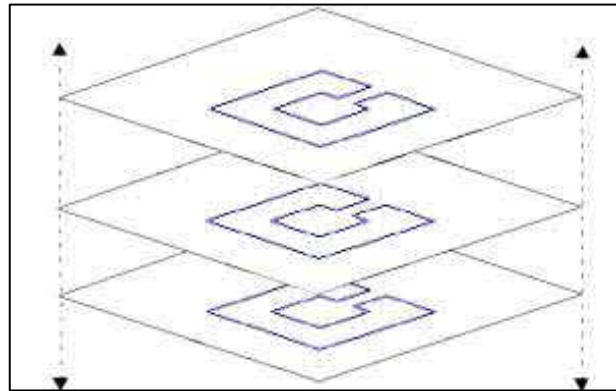
1. Model 2D



Gambar 2.36 Model 2D *Software MagNet*
(Edwards, 2014)

Model 2D merupakan tampilan dari salah satu sisi komponen yang dapat bergerak maju dan mundur. Diambil salah satu bentuk dengan potongan yang sama dalam satu pandangan.

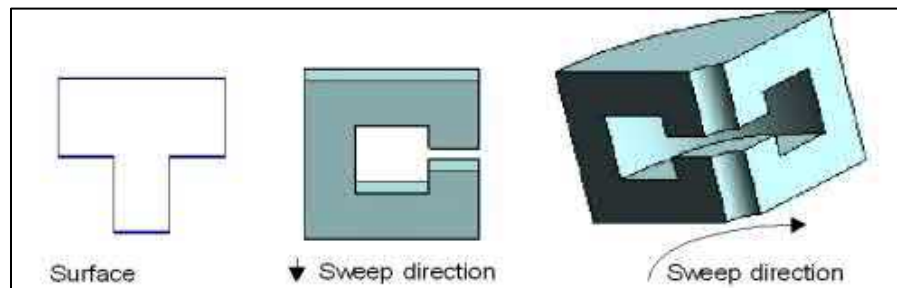
2. Model Permukaan



Gambar 2.37 Model Permukaan *Software MagNet*
(Edwards, 2014)

Model permukaan hampir sama dengan tampilan 2D, model permukaan merupakan tampilan 2D dari komponen 3D yang menampilkan bentuk bagian atas.

3. Model komponen 3D



Gambar 2.38 Tampilan 3D *Software MagNet*
(Edwards, 2014)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pembahasan dan analisa hasil penelitian yang dilakukan pada motor orbital tipe belt dan motor radial menggunakan *Software MagNet*, dapat disimpulkan bahwa:

1. Analisa dan perhitungan yang dilakukan pada motor orbital tipe belt dan motor radial dengan *Software MagNet*. Dengan asumsi 4500 rpm putaran motor, daya sebesar 48 volt dan arus 8,5 ampere. Hasil gaya dan torsi dari motor orbital tipe belt lebih besar dari motor radial. Gaya maksimal motor orbital pada step 3 dan step 5 sama sebesar 14,40 Newton dan pada motor radial step 3 sebesar 11,65 Newton dengan rasio perbandingan 1,80 : 1. Torsi maksimal motor orbital tipe belt pada step 4 sebesar 3,50 N-m dan pada motor radial step 3 sebesar 1,55 dengan rasio perbandingan 1,27 : 1.
2. Hasil perhitungan daya pada motor orbital tipe belt lebih stabil dan sinusoidal dibandingkan motor radial dengan rasio perbandingan 1,79 : 1. Efisiensi yang dihasilkan motor orbital tipe belt lebih tinggi dengan daya sebesar 0,634 HP sedangkan motor radial sebesar 0,358 HP, dengan rasio daya yang dihasilkan motor orbital tipe belt sebesar 44,32 %.
3. Fluks magnet yang dihasilkan pada motor orbital tipe belt lemah, karena arus yang bersilangan, dengan demikian singgungan fluks magnetnya lebih kuat pada motor radial dikarenakan arus yang searah

5.2 Saran

1. Penelitian ini hanya sebatas analisa statis 2D, harus di tingkatkan menjadi analisa 3D.
2. Dengan terbatasnya pemikiran, harus ada peningkatan analisis dari *Software MagNet*.
3. Semoga kedepannya hasil penelitian motor orbital tipe belt bisa dilihat dalam bentuk prototipe.

DAFTAR PUSTAKA

- Akhtar, M. M., S. Kumar. dan P. Kumar. 2017. Solenoid Engine. *Internal Journal of Scientific Development and Research*, 2(4): 297–301.
- Almanda, D., dan A. Alamsyah. (n.d.). Sistem Pengendalian Motor Sinkron Satu Fasa Berbasis *Mikrokontroler*. *Jurnal Teknik Elektro*: 1–6.
- Antono, D. (2012). Motor DC Brushless Tiga Fasa-Satu Kutub. *Jurnal Orbith*. 8(1): 32–37.
- Artikel, Teknologi. 2014. *Macam-macam Motor Listrik*. <https://artikel-teknologi.com/macam-macam-motor-listrik-ac/3>. 19 oktober 2018 (15.40)
- Atmam, Z. Elvira., dan Zulvahri. 2017. Analisis Penggunaan Energi Listrik Pada Motor Induksi Satu Fasa dengan Menggunakan Inverter. *Jurnal Sain, Energi, Teknologi & Industri*. 1(2): 1-8.
- Arsya, N.D., H. Suryanto. Dan S. Anam. 2016. Desain Kontrol Kecepatan Motor Brushless DC Berbasis Power Factor Correction (PFC) Menggunakan Single Ended Primary Inductance Converter (SEPIC). *Jurnal Teknik ITS* 5(2): 1-7.
- Allen., Martha. 2012. Definisi Fluks. <https://www.scribd.com/doc/109589065/Definisi-Fluks-Yaitu-Garis>: 1. 19 oktober 2018 (20.00)
- AppliCAD., Indonesia. 2016. Sejarah SOLIDWORKS dan Perkembangannya. <http://applicadindonesia.com/news/sejarah-solidworks-dan-perkembangannya>: 1-2. 19 oktober 2018 (19.00)
- Abdullah. M. 2006. Diktat Kuliah Fisika Dasar II Tahap Persiapan Bersama ITB. 225: 1-574.
- Bouloukza, I. M. Mordjaoui., dan K, Erol. 2018. *Electromagnetic design of a new radial flux permanent magnet motor*. *Journal Of Energy Systems*. 2(1): 13–275.
- Doppelbauer, M. 2018. *The Invention Of The Electric Motor 1856-1893*. <https://www.eti.kit.edu/english/1376.php> 1–20.
- Edwards, J. 2014. *An Introduction To Magnet For Static 2D Modeling*. 1–137.
- Fansemayur, N., B. Machhijeetkumar, P. Preshitkumar, dan P. Sunny. 2017. Solenoid Engine. *Journal of Impact Factor* 1–7.

- Ghoni, A. A., Heri. S, dan M. Mochamad. 2015. Desain dan Analisis Variabel Air Gap pada Motor Axial Flux Brushless DC Berbasis 3D Finite Element Method Untuk Aplikasi Kendaraan Listrik. *JURNAL TEKNIK*. 4(2): 26-30
- Harind, D., Putra. Y, dan Riswan, D. 2014. Studi Pengaturan Kecepatan Motor DC *Shunt dengan Metode Ward Leonard* (Aplikasi pada Laboratorium Konversi Energi Listrik FT-USU). *Jurnal Fakultas TeknikUSU*. 6(1): 13–18.
- Hincapie, J. S. L., A. Vargas., dan J. Zuluaga. 2012. *Axial Flux Electric Motor*. *Journal Military University of New Granada*: 1-27.
- Indriani, A.2015. Analisis Pengaruh Variasi Jumlah Kutub dan Jarak Celah Magnet Rotor Terhadap Performan Generator Sinkron Fluks Radial. *ELECTRICIAN*. 9(2): 62-71
- Ilka, R., Y. Alinejad-Beromi, dan H. Yaghoobi. 2018. *Cogging Torque Reduction Of Permanent Magnet Synchronous Motor Using Multi-Objective Optimization*. *Mathematics and Computers in Simulation*. 153: 83–95.
- Indradewa, E., F. Jaysyurrahman, dan T. Diah. 2013. Brushless Motor DC. *Jurnal Elektromagnetika-Universitas Pancasila*: 1-5.
- Lee, K., H. Shin, dan Y. Bak. 2018. *Basic Control of AC Motor Drives*. *Control of Power Electronic Converters and Systems*. Suwon: 301
- Margana. 2012. Aplikasi Motor DC 1000 W 48 V sebagai Penggerak Mobil Listrik Ramah Lingkungan. *Jurnal Fakultas Teknik Universitas Wahid Hasyim Semarang*. 7–12.
- Mittal, G. 2017. Technical Paper On Solenoid. *Journal Medicaps Institute of Technology and Management*:1-10.
- Magatrika, UGM. 2014. *Desain Axial dan Radial Generator Permanent Magnet*. <https://ugmmagatrika.wordpress.com/2014/08/03/desain-axial-dan-radial-generator-permanent-magnet-bagian-i>. 19 oktober 2018 (19.00)
- M.Ismail. ST. MT., 2003. MOTOR INDUKSI. 5: 1–5.
- Moreels. D., Dan Leijnen. P. 2018. *High Efficiency Axial Flux Machines*. 9(408): 1–25.
- Microhip., Technology. 2018. Sensored Encoder Based Field Oriented Control of Three Phase-Permanent Magnet Synchronous Motor PMSM. 4: 1-27
- Nugroho, N., dan S. Agustina. 2015. Analisa Motor Dc (*Direct Current*) Sebagai Penggerak Mobil Listrik. *Jurnal Mikrotiga*. 2(1): 28–34.

- Prinsip kerja Motor DC atau Cara Kerja Motor Listrik DC. <https://otomotifmobil.com/prinsip-kerja-motor-dc-atau-cara-kerja-motor-listrik-dc>. 19 oktober 2018 (20.00)
- Parekh, R. 2003. AC Induction Motor Fundamentals. *Microchip Technology Inc*: 1–24.
- Rachmat, A., dan A. Ruhama. 2014. Perancangan Dan Pembuatan Alat Uji Motor Listrik Induksi Ac 3 Fasa Menggunakan Dinamometer Tali (Rope Brake Dynamometer). *Jurnal J-ENSITEC* 1: 7–16.
- Rokhman, Tufiqur. 2012. *Menghitung Torsi dan Daya Mesin Pada Motor Bakar*. <https://taufiqurrokhman.wordpress.com/2012/01/27/menghitung-torsi-dan-daya-mesin-pada-motor-bakar/>. 19 oktober 2018 (16.00)
- Rencana, H., P. Sakti, dan M. Yuniarto. 2014. Perancangan dan Uji Performa *Axial Flux Permanent Magnet Coreless Brushless Direct Current* (DC) Motor. *Jurnal Teknik Pomits* 1(1): 1–7.
- Saputra, W. 2015. *Motor AC*. <https://wandasaputra93.wordpress.com/2015/01/10/motor-ac>. 19 oktober 2018 (15.30)
- Soleha, U. 2009. *Jenis-jenis Motor DC*. <https://azzahratunnisa.wordpress.com/2009/05/27/jenis-jenis-motor-dc>. 19 oktober 2018 (16.00)
- Warsito, A., dan A. Haning. 2018. Komparasi Solusi Kasus Fluks Magnetik di Sekitar Kawat Berarus Listrik dengan Metode Analitik dan Komputasi. *Jurnal ILMU DASAR* 19(1): 23-28
- Werson. 1999. Brushless Dc Motors. *Automotive Motion Technology* 19: 1-17
- Yusnita dan H, Tjahjono. 2012. Sistem pengendali arus start motor induksi fasa tiga dengan variasi beban. *Jurnal Teknik Elektro UMSB* 1(2): 1–5.
- Zona. Elektro. 2015. Motor AC: Teori Motor AC dan Jenis Motor AC. <http://zoniaelektro.net/motor-ac>: 19 oktober 2018 (20.00)