



TESIS - EE185401

PENINGKATAN PERFORMA PADA AXIAL SWITCHED RELUCTANCE MOTOR (SRM) MENGUNAKAN MAGNET

YOGA UTA NUGRAHA
07111750012004

DOSEN PEMBIMBING
Dr. Dimas Anton Asfani, ST., MT
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D
Dr. Muhammad Nur Yuniarto

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO DAN INFORMATIKA CERDAS
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2020



TESIS - EE185401

**PENINGKATAN PERFORMA PADA AXIAL
SWITCHED RELUCTANCE MOTOR (SRM)
MENGUNAKAN MAGNET**

YOGA UTA NUGRAHA
07111750012004

DOSEN PEMBIMBING

Dr. Dimas Anton Asfani, ST.,MT
Dedet Candra Riawan, ST.,M.Eng.,Ph.D
Dr. Muhammad Nur Yuniarto

PROGRAM MAGISTER

BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO DAN INFORMATIKA CERDAS

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2020

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

Magister Teknik (MT)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

YOGA UTA NUGRAHA

NRP: 07111750012004

Tanggal Ujian: 6 Januari 2020

Periode Wisuda: Maret 2020

Disetujui oleh:

Pembimbing:

1. Dr. Dimas Anton Asfani, ST., MT
NIP: 198109052005011002
2. Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D
NIP: 197311192000031001
3. Dr. Muhammad Nur Yuniarto
NIP: 197506301998021001

Penguji:

1. Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT
NIP: 196308171990031001
2. Ir. Ni Ketut Aryani, MT
NIP: 196509011991032002
3. Dr. I. Made Yulistya Negara, ST., M.Sc
NIP: 197007121998021001

Kepala Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas

Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D

NIP: 197311192000031001

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tesis saya dengan judul **“PENINGKATAN PERFORMA PADA AXIAL SWITCHED RELUCTANCE MOTOR (SRM) MENGGUNAKAN MAGNET”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 23 Januari 2020

Yoga Uta Nugraha

NRP. 07111750012004

Halaman ini sengaja dikosongkan

PENINGKATAN PERFORMA PADA AXIAL SWITCHED RELUCTANCE MOTOR (SRM) MENGGUNAKAN MAGNET

Nama mahasiswa : Yoga Uta Nugraha
NRP : 07111750012004
Pembimbing : 1. Dr. Dimas Anton Asfani, ST., MT
2. Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D
3. Dr. M. Nur Yuniarto

ABSTRAK

Tiga tipe motor penggerak utama yang digunakan pada kendaraan listrik adalah *Brushless DC Motor* (BLDC), *Induction Motor* (IM) dan *Switched Reluctance Motor* (SRM). Secara umum, terdapat dua struktur motor listrik, axial dan radial. Axial motor listrik menghasilkan torsi yang lebih besar dibanding radial dengan dimensi yang sama. *Switched Reluctance Motor* (SRM) memiliki keunggulan struktur motor yang sederhana, murah dan kuat. Untuk dapat diaplikasikan pada kendaraan listrik, SRM memiliki kelemahan yaitu torsi yang rendah.

Axial SRM digunakan sebagai objek dasar penelitian. Axial SRM diberi tambahan magnet sehingga gaya magnetisasi yang dibangkitkan pada kutub stator lebih kuat dan torsi yang dihasilkan lebih besar. Simulasi menggunakan *Finite Element Magnetic Method* (FEMM) untuk mengetahui besaran dan persebaran arah magnetisasi. *Ansys Maxwell* digunakan untuk mengetahui besaran torsi dan daya pada axial SRM. Hasil dari desain tersebut dilakukan pembuatan prototipe axial SRM dan axial PM-SRM yang selanjutnya dilakukan pengujian guna memperoleh validasi dan perbandingan hasil antara simulasi dan prototipe.

Hasil dari penelitian ini adalah peningkatkan performa pada axial SRM dengan menggunakan *Aluminium Nickel Cobalt* (Alnico) magnet dibandingkan dengan axial SRM tanpa penambahan magnet. Daya output pada axial PM-SRM meningkat hingga 15% dan torsi meningkat hingga 10%.

Kata kunci: (*axial*, magnet, kerapatan torsi, *switched reluctance motor*, simulasi)

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERFORMANCE IMPROVEMENT OF AXIAL SWITCHED RELUCTANCE MOTOR (SRM) USING LOW-COST MAGNET

By : YOGA UTA NUGRAHA
Student Identity Number : 07111750012004
Supervisor(s) : 1. Dr. Dimas Anton Asfani, ST.,MT
2. Dedet Candra Riawan,ST .,M.Eng .,Ph.D
3. Dr. Muhammad Nur Yuniarto

ABSTRACT

The three main types of driving motors used in electric vehicles are the Brushless DC Motor (BLDC), Induction Motor (IM) and Switched Reluctance Motor (SRM). In general, there are two electric motor structures, axial and radial. Axial electric motors produce greater torque than radials with the same dimensions. Switched Reluctance Motor (SRM) has the advantage of a simple, inexpensive and powerful motor structure. To be applied to electric vehicles, SRM has the disadvantage of low torque.

Axial SRM is used as a basic object of research. SRM axial is given an additional magnet so that the magnetization force generated at the stator pole is stronger and the resulting torque is greater. The simulation uses the Finite Element Magnetic Method (FEMM) to determine the magnitude and distribution of flux directions. Ansys Maxwell is used to determine the amount of torque and power on the SRM axial. The results of the design are made by making the SRM axial prototype and PM-SRM axial which are then tested to obtain validation and comparison of the results between simulation and prototype.

The results of this study were to improve performance on SRM axials by using Aluminum Nickel Cobalt (Alnico) magnets compared to SRM axials without the addition of magnets. The output power on the PM-SRM axial increases up to 15% and torque increases up to 10%.

Key words: (axial, magnet, torque, Switched Reluctance Motor, simulation)

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, pada akhirnya buku tesis dengan judul “PENINGKATAN PERFORMA PADA AXIAL SWITCHED RELUCTANCE MOTOR (SRM) MENGGUNAKAN MAGNET” telah selesai dibuat. Semoga penelitian ini bermanfaat dan dapat digunakan oleh mahasiswa yang ingin melakukan penelitian terhadap performa motor listrik. Penulis mengucapkan terimakasih kepada berbagai pihak yang telah memberi bantuan dan dukungan dalam penyelesaian Thesis, terutama kepada:

- a. Bapak Dr. Dimas Anton Asfani dan Bapak Dr. Dedet Candra Riawan selaku dosen pembimbing yang telah memberikan pelajaran, motivasi, arahan, dan saran.
- b. Bapak Dr. M. Nur Yuniarto selaku dosen pembimbing dan bapak yang telah memberikan bimbingan, saran, dan koreksi kepada penulis selama thesis ini, serta dukungan sepenuhnya dalam hal penelitian motor listrik.
- c. Istriku, Ayuning Fitri Desanti yang selalu membantu penulisan buku ini hehehe, Dega dan Yasa yang selalu menginspirasi. Serta kedua orangtua dan mertua yang selalu mendoakan.
- d. Warga SBS alias stupid but spirit ex. Penghuni gedung riset mobil listrik atas dukungan yang selalu loss gak rewel!
- e. Seluruh staff dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan bantuan administrasi.
- f. Semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir yang tidak dapat penulis sebutkan.

Penelitian dalam thesis ini akan sia-sia jika tidak dapat bermanfaat dan menjadi kontribusi dalam pengembangan motor listrik di Indonesia, khususnya di ITS yang tercinta.

Maturnuwun, maturnuwun, maturnuwun. Salam, Loss Gak Rewel!!

Surabaya, 17 Januari 2020

Yoga Uta Nugraha

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN TESIS	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
NOMENKLATUR	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	21
1.1 Latar Belakang	21
1.2 Rumusan Masalah	25
1.3 Tujuan	25
1.4 Batasan Masalah	25
1.5 Kontribusi	25
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA	27
2.1 Kajian Penelitian Terkait	27
2.2 Teori Dasar	30
2.2.1 Switched Reluctance Motor (SRM)	30
2.2.2 Magnet	31
BAB 3 METODE PENELITIAN	33
3.1 Metodologi	33
3.2 Simulasi	34
3.3 Prototipe dan Pengujian	35
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	39
4.1 SIMULASI	42
4.2 Prototipe	47

4.3	Pengujian	48
4.4	Perbandingan antara simulasi dan prototipe.....	49
BAB 5 KESIMPULAN		53
DAFTAR PUSTAKA.....		55
INDEX.....		57

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Struktur motor axial dan radial.....	24
Gambar 2.1	Radial SRM dengan magnet di stator.....	29
Gambar 2.2	Fluks pada SRM.....	30
Gambar 2.3	Susunan Axial SRM.....	31
Gambar 3.1	Flowchart kegiatan penelitian	33
Gambar 3.2	Simulasi pada FEM	34
Gambar 3.3	Hasil simulasi pada FEM	35
Gambar 3.4	Dinamometer dengan tipe eddy current brake	36
Gambar 3.5	Tampilan output data dinamometer.....	36
Gambar 4.1	Komponen axial SRM.....	41
Gambar 4.2	Pengujian hysteresis-graph	42
Gambar 4.3	<i>BH-Curve</i> dari material core stator	43
Gambar 4.4	Posisi rotor terhadap stator saat (a) kondisi sejajar dan (b) tidak sejajar.....	43
Gambar 4.5	Pemasangan magnet pada bagian stator	44
Gambar 4.6	Fluks magnetisasi saat kondisi tidak sejajar.....	44
Gambar 4.7	Grafik nilai torsi terhadap sudut rotor	45
Gambar 4.8	Kerugian tembaga dan besi terhadap kecepatan	45
Gambar 4.9	Grafik torsi dan daya output motor terhadap kecepatan (RPM) ...	46
Gambar 4.10	Grafik efisiensi terhadap kecepatan (RPM).....	46
Gambar 4.11	Hasil jadi prototipe motor SRM bagian stator	47
Gambar 4.13	Rangkaian untuk pengujian dinamometer.....	48
Gambar 4.14	Grafik hasil pengujian dinamometer	49
Gambar 4.15	(a) Hasil output dari simulasi dan (b) Output dari pengujian prototipe.....	50

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Perbandingan Antara PMSM, IM dan SRM	22
Tabel 2.1	Perbandingan BLDC, PMSM dan SRM	27
Tabel 4.1	Perbandingan jumlah stator dan rotor	40
Tabel 4.2	Perbandingan performa antara simulasi dan prototipe.....	50

Halaman ini sengaja dikosongkan

NOMENKLATUR

SRM	Switched Reluctance Motor, motor dengan konstruksi stator-rotor salient pole
BLDC	Brushless DC Motor, motor listrik tanpa sikat dengan karakteristik seperti motor DC
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Motor, motor listrik dengan sistem sinkron antara rotor dan stator
Axial	Struktur motor antara stator dan rotor dengan arah magnetisasi sesuai sumbu X
Radial	Struktur motor antara stator dan rotor dengan arah magnetisasi sesuai dengan sumbu Y
PM	Permanent Magnet, magnet dengan kekuatan magnetisasi yang tinggi dan bersifat permanen
Ansys Maxwell	Simulasi untuk desain motor listrik
FEMM	Finite Element Method Magnetic, simulasi untuk magnetisasi
Salient pole rotor	Kutub yang menonjol pada rotor
Salient pole stator	Kutub yang menonjol pada stator
Stator	Bagian motor yang tidak berputar (statis)
Rotor	Bagian motor yang berputar
Eddy Current Brake	Metode pengereman pada dinamometer dengan menggunakan kumparan yang dihubungkan singkat
IM	Induction Motor, tipe motor induksi dengan menggunakan induksi dari stator
Torque	Torsi dalam satuan Nm, menyatakan kekuatan untuk memutar poros motor
Power	Daya yang dihasilkan motor
Speed	Putaran rotor dalam satuan RPM

RPM	Rotation Per Minute, satuan untuk putaran rotor
Nm	Newton meter, satuan untuk torsi motor
W	Watt, satuan untuk daya motor
HP	Horse Power, satuan untuk daya motor, 1 HP = 0,73 kW
V	Volt, satuan untuk tegangan
Kg	Kilogram, satuan untuk berat motor
mm	Milimeter, satuan untuk pengukuran jarak
T	Tesla, satuan untuk kekuatan magnet
KA/m	Kilo Ampere per meter, satuan kekuatan magnet dalam suatu luasan
KJ/cubic	Kilo Joule per cubic, satuan energi magnet dalam suatu luasan centimeter
g/cubic	Gram per cubic, satuan berat dalam gram dibanding luasan centimeter
°C	Derajat Celcius, satuan suhu
HV	Hardness of Vickers, satuan tingkat kekerasan suatu benda

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kendaraan listrik hingga saat ini masih menjadi topik penelitian yang terus dikembangkan melalui berbagai cara dan fokus pada tiap komponen-komponen kendaraan listrik. Secara elektrik, tiga komponen utama pada kendaraan listrik adalah baterai, motor listrik dan pengatur kecepatan motor listrik (*controller*). Baterai merupakan sumber daya listrik yang memiliki banyak keunggulan. Berbagai macam tipe baterai dikembangkan untuk memperoleh rasio daya terhadap berat yang semakin besar. Dengan daya baterai yang lebih besar dan berat baterai yang lebih ringan maka kendaraan listrik akan lebih efisien dan memiliki jarak tempuh yang lebih jauh. Selain itu, dengan perkembangan *Ultra-Capacitor* (UC) yang semakin pesat maka banyak penelitian terkait penggunaan dua sumber energi (*hybrid*) antara baterai dan UC untuk memperoleh performa terbaik dan jarak tempuh yang lebih jauh.

Pengatur kecepatan (*speed controller*) secara mendasar berfungsi sebagai pengatur kecepatan motor listrik. Dapat menghasilkan putaran motor yang halus dan mampu menghasilkan torsi tinggi menjadi tantangan dari penelitian pengatur kecepatan motor listrik. Setiap tipe motor listrik mempunyai karakteristik tersendiri sehingga pengatur kecepatan motor listrik harus dapat menyesuaikan dan memaksimalkan kemampuan dari motor listrik.

Pada penelitian motor listrik untuk kendaraan listrik terdapat beberapa tipe motor listrik yang banyak digunakan yaitu *Brushless DC Motor* (BLDC), *Permanent Magnet Synchronous Motor* (PMSM), *Induction Motor* (IM) dan *Switched Reluctance Motor* (SRM). Awalnya motor tipe DC dengan sikat (*DC brush*) merupakan motor yang populer digunakan pada kendaraan listrik karena menghasilkan torsi yang besar saat akselerasi. Sikat arang (*commutator*) dapat menimbulkan percikan api saat putaran tinggi dan sikat tersebut seiring waktu penggunaan dapat habis dan perlu penggantian pada sikat tersebut. Motor listrik dengan karakteristik yang sama dengan motor tipe DC dengan sikat (*DC brush*) adalah BLDC dan PMSM. Dua motor tersebut tidak menggunakan sikat arang

sehingga bebas perawatan dalam hal penggantian sikat arang. BLDC dan PMSM secara struktur sama-sama menggunakan permanent magnet pada bagian rotor. Begitu juga dengan bagian stator dan tipe kumparan yang digunakan. Yang membedakan adalah teknik kontrol putaran motor tersebut. BLDC secara mendasar dapat menggunakan komutasi enam langkah (*six step commutation*) dengan menggunakan tiga sensor magnet untuk mendeteksi posisi rotor. Sedangkan PMSM menggunakan teknik kontrol dengan teknik yang lebih rumit karena posisi rotor dan rotor harus selalu sinkron untuk dapat berputar.

Tabel 1.1 Perbandingan Antara PMSM, IM dan SRM {1}

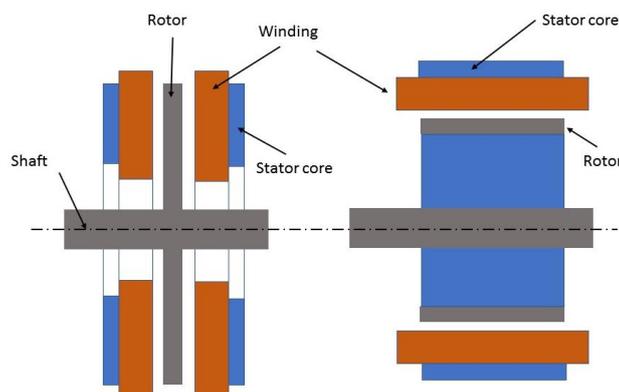
Parameter	PMSM	IM	SRM
DC Voltage (V)		500	
Peak Power (kW)		50	
Max speed (RPM)		6000	
Operating speed (RPM)		300	
Peak torque (Nm)	120	90	100
Rated torque (Nm)	2500	3300	3000
Pole pairs	4	4	-
Stator outer diameter (mm)		269	
Stator inner diameter (mm)	166	177.9	172
Rotor outer diameter (mm)	100	94	90
Rotor inner diameter (mm)	83.8	108	105
Stack length (mm)	83.82	108	105
Air gap length (mm)	0.7	0.45	0.5
Armature core weight (kg)	13.75	17.25	17.83
Armature copper weight (kg)	8.13	13.05	15.29
Rotor core weight (kg)	6.7	10.06	9.24
Magnet weight (kg)	1.3	-	-
Rotor bar & ring (kg)	-	8.43	-
Total weight (kg)	30	48.8	42.5
Magnet type	N36Z_20	-	-
Steel type		M19-29G	

Berdasarkan Tabel 1.1 yang menampilkan perbandingan antara PMSM, IM dan SRM yang menunjukkan bahwa dengan daya, torsi dan kecepatan yang relatif sama SRM lebih berat dari PMSM namun lebih ringan daripada IM [1].

Tegangan kerja dari baterai (*DC Voltage*) merupakan tegangan kerja dari baterai dengan daya tertinggi (*peak power*) yang menggunakan suatu nilai sehingga performa dari komparasi tersebut sama. Kecepatan maksimal (*max speed*) merupakan saat motor berputar dengan kondisi tanpa beban, sedangkan kecepatan operasi (*operating speed*) merupakan kondisi motor saat beroperasi dengan suhu yang normal. Torsi puncak (*peak torque*) dan torsi normal (*rated torque*) didapat pada kondisi tertentu berdasarkan karakteristik dari motor. Jumlah kutub (*pole pair*) sangat mempengaruhi performa dari motor tersebut. Ukuran dari stator ditentukan dengan diameter luar (*outer diameter*) dan diameter dalam (*inner diameter*). Hal yang sama pada sisi rotor ditentukan dengan diameter luar (*rotor outer diameter*) dan diameter dalam (*rotor inner diameter*). Ketebalan dari susunan stator (*stack length*) direpresentasikan dalam milimeter. Berat kumparan kawat (*armature copper winding*) turut mempengaruhi rasio berat terhadap performa dari motor. Selain itu, berat stator (*armature core weight*) juga cukup berat karena terbuat dari besi. Berat rotor (*rotor core weight*) dan berat magnet (*magnet weight*) mempengaruhi desain dari poros dan bantalan besi (*bearing*) yang digunakan. Pada motor IM juga dipengaruhi oleh berat cincin besi (*rotor bar and ring*). Berat keseluruhan (*total weight*) dari material-material tersebut akan mempengaruhi performa dari kendaraan listrik. *Induction Motor* (IM) merupakan motor yang sangat banyak digunakan pada berbagai aplikasi. Sebagian besar penggunaannya pada bidang industri untuk menggerakkan peralatan dengan kecepatan yang konstan. Untuk digunakan pada kendaraan listrik, pengaturan kecepatan pada IM memerlukan sistem kontrol yang tidak sederhana. Selain itu, efisiensi dari motor tersebut sekitar 85-90% yang masih lebih rendah dibandingkan dengan BLDC atau PMSM. Struktur rotor pada IM menggunakan kumparan yang dihubungkan singkatkan atau menggunakan material silicon steel. Kelemahan dari rotor tersebut adalah berat dan memerlukan pendinginan yang lebih jika diaplikasikan pada kendaraan listrik.

SRM memiliki struktur yang paling sederhana. Pada bagian stator dan kumparan memiliki kesamaan dengan BLDC dan PMSM. Pada rotor menggunakan tipe salient pole atau kutub yang menonjol sesuai dengan jumlah kutubnya. Tidak ada komponen lain dibagian rotor sehingga tidak ada resiko kerusakan pada bagian rotor. Hal tersebut menjadi keunggulan karena motor menjadi lebih ringan,

sederhana dan kuat. Secara umum, SRM banyak digunakan untuk motor stepper. Karena keunggulannya tersebut kini semakin banyak penelitian untuk dapat diaplikasikan pada kendaraan listrik. Meskipun dengan struktur rotor dengan kutub yang menonjol tersebut dapat menimbulkan suara mendengung apabila motor diputar secara konstan atau dengan putaran yang dinamis. Selain itu torsi yang dihasilkan oleh SRM jauh lebih rendah daripada BLDC, PMSM dan IM. Struktur pada motor listrik berdasarkan arah fluks magnetisasi dibagi menjadi dua yaitu axial dan radial. Seperti pada Gambar 1.1. [2] menunjukkan bahwa struktur motor axial memiliki arah magnetisasi (*fluks*) yang dihasilkan oleh kumparan (*winding*) searah dengan sumbu pada poros (*shaft*). Posisi kumparan tersebut di inti stator (*stator core*) dengan arah tertentu. Motor radial memiliki arah magnetisasi (*fluks*) ke arah tegak lurus terhadap poros. Secara umum, pada motor listrik axial menghasilkan torsi yang lebih besar daripada motor radial dengan dimensi yang sama. Bentuk dari motor axial adalah pipih sehingga untuk daya yang lebih besar dapat dilakukan dengan menyusun motor yang sama secara paralel di sisi kiri dan kanan dengan perubahan pada panjang poros. Selain itu, dengan menggunakan stator pada dua sisi dapat meningkatkan torsi pada motor axial. Kekurangan dari struktur motor axial adalah proses perakitan yang rumit dan harus presisi.



Gambar 1.1 Struktur motor axial dan radial

Berdasarkan permasalahan yang telah diperoleh, pada kegiatan tesis ini melakukan penelitian untuk peningkatan performa pada axial SRM motor dengan menggunakan magnet.

1.2 Rumusan Masalah

Penelitian ini dilakukan karena terdapat beberapa tantangan riset yang diharapkan dapat memberi alternatif solusi penggunaan SRM pada kendaraan listrik. Masalah yang ada saat ini adalah:

- a. Cara untuk melakukan desain dan simulasi *axial Switched Reluctance Motor* (SRM).
- b. Penempatan posisi dan arah magnet pada *axial Switched Reluctance Motor* (SRM) yang efektif untuk peningkatan torsi.
- c. Selisih kenaikan torsi setelah ditambahkan magnet.

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan desain dan pembuatan prototipe *axial Switched Reluctance Motor* (SRM) untuk meningkatkan performa dengan menambahkan magnet.

1.4 Batasan Masalah

Kegiatan penelitian ini dilakukan dengan batasan-batasan sebagai berikut:

- a. Simulasi menggunakan *Finite Element Method Magnetics* (FEMM) digunakan untuk mengetahui nilai besaran dan persebaran arah magnetisasi dan *Ansys Maxwell* untuk mengetahui performa dari motor.
- b. Penambahan magnet ditempatkan pada stator dan rotor dari SRM
- c. Data yang dianalisis adalah perbandingan performa antara SRM tanpa magnet dan SRM dengan magnet.

1.5 Kontribusi

Melalui penelitian ini dihasilkan prototipe axial SRM menggunakan magnet dengan performa yang lebih baik daripada SRM tanpa magnet sehingga dapat menjadi alternatif pengganti BLDC motor yang menggunakan *neodymium magnet permanent* pada aplikasi kendaraan listrik.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

Perbandingan motor listrik yang digunakan pada kendaraan listrik secara umum sudah disajikan pada pendahuluan bab 1. Pada bab ini dijelaskan secara lebih detail terkait dengan kajian penelitian yang sudah dilakukan dan komponen-komponen pada SRM dan magnet.

2.1 Kajian Penelitian Terkait

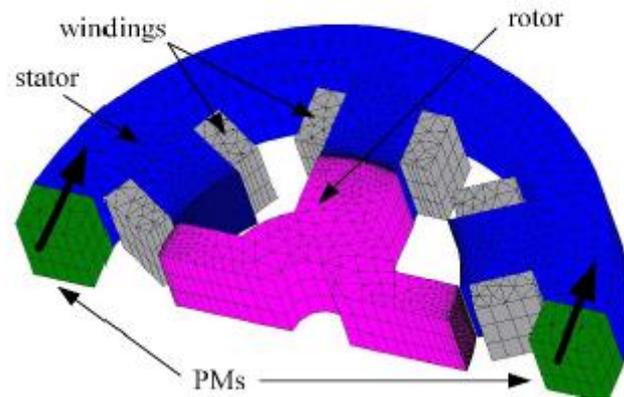
Penelitian terkait aplikasi SRM pada kendaraan listrik sudah banyak dilakukan. Pada penelitian [1], membandingkan antara *Permanent Magnet Synchronous Motor* (PMSM), *Induction Motor* (IM) dan *Switched Reluctance Motor* (SRM). Pada kendaraan listrik, parameter motor listrik yang paling sederhana digunakan sebagai perbandingan adalah daya, kecepatan, torsi dan berat. Dari perbandingan pada penelitian tersebut menunjukkan bahwa dengan daya, kecepatan dan torsi yang relatif sama, berat dari SRM motor lebih dari PMSM namun lebih ringan daripada IM. Berdasarkan hal tersebut maka SRM motor masih dapat diaplikasikan pada kendaraan listrik. Selain itu, pada penelitian [3] melakukan perbandingan antara *Brushless DC Motor* (BLDC), PMSM dan SRM dengan parameter disebutkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Perbandingan BLDC, PMSM dan SRM

Items	Maximum	BLDC	PMSM	SRM
Power density	10	9	10	8
Overload	10	7	7	8
High speed	20	9	10	8
Control	20	15	15	16
Noise	10	8	8	6
Torque ripple	10	6	8	5
Size and weight	10	8	9	7
Maintenance	10	8	8	9
Manufacturing	20	14	12	18
Cost	30	20	18	26
Total	180	128	135	146

Berdasarkan Tabel 2.1, menunjukkan bahwa SRM memiliki penilaian angka yang paling tinggi. Dengan parameter hasil performa (*power density*) yang relatif sama, terdapat perbedaan yang signifikan pada nilai perakitan (*manufacturing*) dan biaya (*cost*). Karena pada bagian rotor tidak menggunakan magnet permanen atau kumparan sehingga lebih murah dan proses perakitannya lebih sederhana. Ukuran dan berat (*size and weight*) pada SRM paling ringan dengan nilai paling rendah. Pada kondisi beban berlebihan (*overload*) nilai tertinggi diperoleh SRM. Selain itu, SRM juga memiliki nilai yang paling tinggi pada kondisi kecepatan penuh (*high speed*) dan pengaturan (*control*). SRM dengan nilai paling rendah pada kebisingan (*noise*) yang artinya adalah motor tersebut paling senyap. Hal itu disebabkan oleh riak torsi (*torque ripple*) yang kecil.

Tantangan dari penelitian SRM adalah kerapatan torsi yang lebih rendah daripada BLDC dan PMSM. Penelitian [4], menggunakan struktur motor axial pada SRM untuk meningkatkan kerapatan torsi. Dari hasil desain dan pengujian yang dilakukan diperoleh hasil peningkatan kerapatan torsi pada jika menggunakan axial SRM dibandingkan dengan radial SRM. Selanjutnya dengan menggunakan struktur axial tersebut terdapat beberapa penelitian lebih lanjut untuk lebih meningkatkan kerapatan torsi. Penelitian [5], menggunakan material dengan kualitas yang lebih baik dan lebih ringan sehingga didapatkan kenaikan kerapatan torsi. Tantangan riset yang terjadi adalah material masih dalam tahap pengembangan dan biaya yang masih sangat tinggi. Selain itu, pada penelitian [6] menggunakan perbandingan antara ukuran diameter luar dan dalam pada axial SRM untuk memperoleh kenaikan kerapatan torsi yang paling optimal. Dengan simulasi *Finite Element Method* (FEM) dilakukan analisis persebaran dan kekuatan magnetisasi (*magnetic flux*) pada beberapa ukuran diameter hingga diperoleh nilai perbandingan yang paling optimal.



Gambar 2.1 Radial SRM dengan magnet di stator

Di sisi lain, pada radial SRM juga telah dilakukan beberapa penelitian untuk meningkatkan kerapatan torsi. Penelitian [7], menambahkan magnet pada radial SRM. Magnet tersebut dipasang disetiap kutub dari stator. Magnet yang digunakan tipe *neodymium*. Hasil yang diperoleh adalah peningkatan torsi pada radial SRM motor namun jumlah magnet yang digunakan cukup banyak sehingga biaya motor tersebut tinggi seperti pada BLDC dan PMSM. Terdapat penelitian lain yang juga menggunakan magnet dibagian stator. Seperti pada penelitian [8] tersebut menggunakan magnet tipe Alnico yang biayanya jauh lebih murah dan hanya menggunakan dua buah magnet. Pada Gambar 2.1 permanen magnet (PM) dipasang pada stator disisi kanan dan kiri. Pemasangan magnet tersebut digunakan untuk meningkatkan kekuatan magnetisasi yang dibangkitkan pada kutub stator sehingga terjadi peningkatan torsi. Jumlah rotor yang digunakan adalah empat kutub. Kumputan (*winding*) diletakkan pada masing-masing kutub stator.

Selain menggunakan magnet, terdapat penelitian yang menambahkan kumparan bantu dibagian stator. Penelitian [9] tersebut menggunakan magnet dan kumparan bantu pada bagian stator. Kekurangan dari metode tersebut adalah kumparan bantu harus mendapat suplai arus terpisah dari kumparan utama. Sehingga hal tersebut menjadikan sistem kontrol yang lebih kompleks dan rumit.

Berdasarkan kajian penelitian yang telah dilakukan, untuk meningkatkan kerapatan arus pada SRM dapat menggunakan struktur axial, menambahkan magnet dan menambahkan kumparan bantu. Sehingga pada penelitian ini, penulis

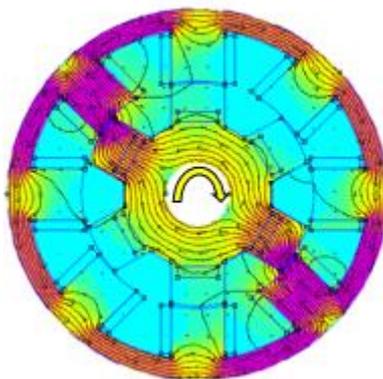
mengusulkan topik untuk meningkatkan torsi dengan menggunakan magnet pada axial SRM.

2.1.1 Teori Dasar

Pada bab materi teori dasar dijabarkan dasar pengertian tentang *Switched Reluctance Motor* (SRM) yang meliputi cara kerja, jumlah kutub stator, struktur motor dan karakteristik dari SRM. Tipe magnet yang meliputi karakteristik masing-masing jenis juga dijelaskan dalam bentuk tabel dan uraian.

2.1.2 *Switched Reluctance Motor* (SRM)

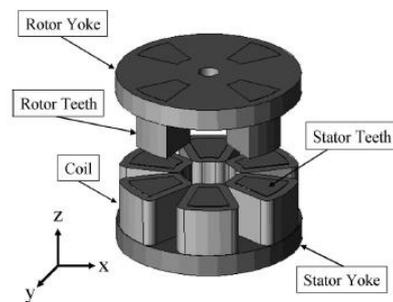
Switched Reluctance Motor (SRM) merupakan mesin listrik dengan desain yang sederhana. SRM terdiri dari stator dan rotor. Konstruksi stator dan rotor memiliki bentuk kutub yang menonjol atau biasa disebut dengan kutub menonjol (*salient pole*). Kumparan/belitan ada di sisi stator dengan konfigurasi belitan disetiap kutub (*concentrated winding*). Rotor pada SRM hanya terdiri dari kutub menonjol (*salient pole*) tanpa ada belitan seperti pada motor induksi ataupun magnet permanen seperti pada BLDC motor. Pada umumnya, perbandingan antara jumlah stator dan rotor yang digunakan adalah 6/4, 8/6 dan 12/8.



Gambar 2.2 Kekuatan magnetisasi pada SRM

Seperti pada Gambar 2.2, Rotor pada SRM dapat berputar akibat adanya reluktansi magnet yang dihasilkan saat kutub pada stator diaktifkan. Reluktansi magnet tersebut merambat pada kutub stator dan mengarah pada rotor yang menyebabkan kutub rotor tertarik terhadap jalur reluktansi magnet tersebut. Konsep untuk meningkatkan kerapatan torsi pada SRM adalah dengan menguatkan

reluktansi magnet tersebut, sehingga kutub rotor semakin kuat ditarik oleh kutub stator. Stator dan rotor dapat disusun menjadi axial dan radial. Seperti dijelaskan pada bab pendahuluan bahwa karakteristik torsi dari axial SRM lebih baik dibandingkan radial SRM dengan dimensi yang sama [4]. Gambar 2.3 merupakan susunan dari axial SRM. Penampang rotor (*rotor yoke*) memiliki fungsi untuk dasar dari struktur rotor dengan menambahkan kutub rotor (*rotor teeth*) sehingga menjadi komponen rotor. Pada penampang stator (*stator yoke*) sama dengan sisi rotor, kutub stator (*stator teeth*) dipasang dan diberi kumparan (*coil*) pada masing-masing kutub tersebut.



Gambar 2.3 Susunan Axial SRM

2.1.3 Magnet

Magnet permanen adalah suatu benda yang memiliki nilai magnetisasi secara permanen. Berbagai macam jenis magnet berdasarkan dari material yang digunakan. *Neodymium* magnet merupakan salah satu dari magnet permanen yang kini paling banyak digunakan. Perbandingan dari beberapa magnet permanen ditampilkan dalam tabel 2.2 [10].

Tabel 2.2 Jenis magnet permanen

Properties	Units	Neodymium	Sam/Co	Ferrite	Alnico
Remanence	T	<1.26	<1.03	0.385	<1.25
Coercivity bHC	KA/m	<859	640	<230	<47.7
Coercivity iHC	KA/m	<955	1190	<235	<47.7
Max energy product	KJ/cubic	<260	<140	<27.9	<38.2
Density	g/cubic	7.3-7.5	8.3	4.8-5.0	7.3-7.4
Max. heat resistant	°C	80	200	300	400
Vicker's hardness	HV	500-600	600	480-560	650

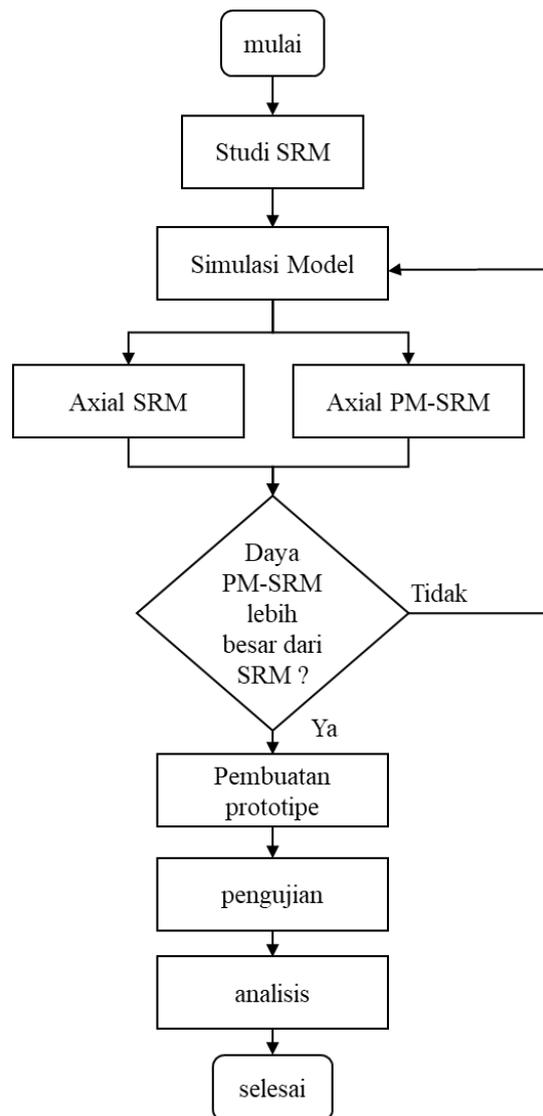
Berdasarkan Tabel 2.2, diketahui bahwa kekuatan magnet (*remanence*) paling tinggi ada pada Neodymium. Begitu pula dengan ketahanan magnet (*coercivity*) dan energi terbesar yang dihasilkan (*max energy product*) ada pada magnet tipe Neodymium. Disisi lain, *Aluminium nickel cobalt* (Alnico) memiliki keunggulan pada ketahanan suhu kerja (*max heat resistant*) dan kekerasan material (*Vicker's hardness*) yang paling tinggi. Kerapatan magnet (*density*) terendah ada pada magnet tipe besi (*Ferrite*). Neodymium magnet disusun dari neodymium, iron dan boron. Keunggulan dari Neodymium magnet adalah kuat medan magnet yang paling tinggi diantara jenis magnet permanen lainnya. Hambatan dari magnet tersebut adalah harga yang sangat mahal dan ketersediaan bahan neodymium yang semakin langka.

Penelitian yang sudah pernah dilakukan adalah menggunakan magnet tipe *Aluminium nickel cobalt* (Alnico) pada radial SRM untuk meningkatkan kerapatan torsi (*torque density*) [8]. Magnet *Aluminium nickel cobalt* (Alnico) dipilih karena harga yang jauh lebih murah, memiliki suhu kerja yang tinggi dan energi yang dihasilkan lebih baik daripada magnet tipe besi (*Ferrite*).

BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 Metodologi

Metodologi dari penelitian ini adalah sebagai berikut:



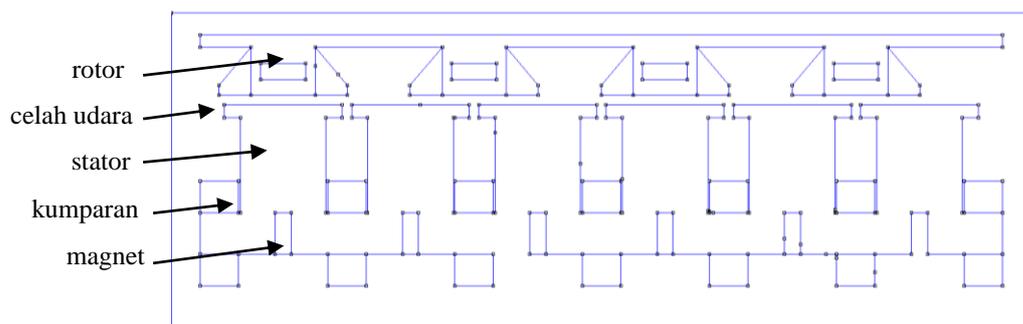
Gambar 3.1 flowchart kegiatan penelitian

penelitian ini diawali dengan studi pustaka terkait *Switched Reluctance Motor* (SRM) yang meliputi aplikasi, struktur, karakteristik, kelebihan dan kelemahannya. Selain itu, melakukan analisis pada buku dan jurnal tentang penelitian yang sudah dilakukan pada SRM. Berdasarkan hal tersebut maka diperoleh celah riset terkait tentang topik peningkatan kerapatan torsi pada SRM.

Kemudian melakukan desain dan simulasi yang ada pada tahap simulasi model. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan dua tipe motor yaitu axial SRM dan axial PM SRM. Apabila simulasi sudah optimal dan sesuai dengan target maka dilakukan pembuatan prototipe. Pengujian dari prototipe dilakukan untuk dapat melakukan evaluasi dan analisis dari penelitian tersebut.

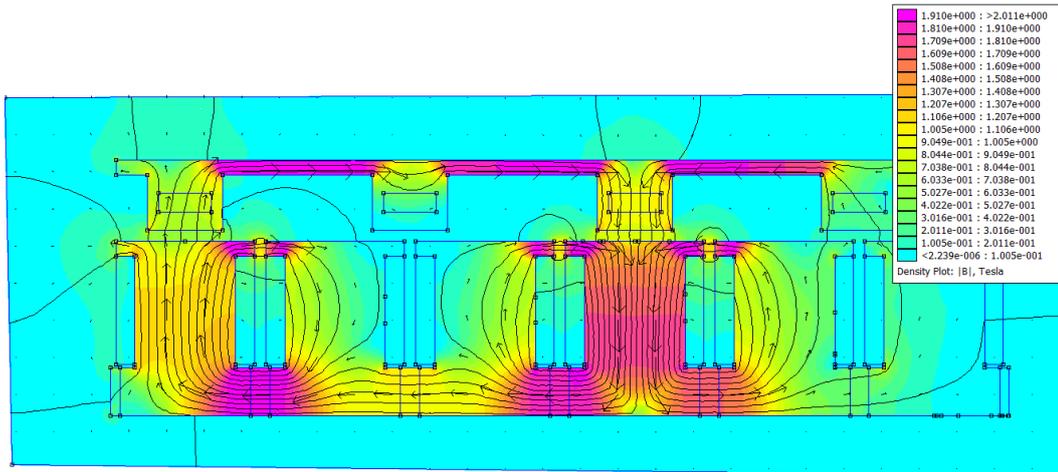
3.2 Simulasi

Penelitian dilakukan dengan menggunakan simulasi *Finite Element Method* (FEM) dan *Ansys Maxwell*. Simulasi FEM digunakan untuk melihat persebaran arah dan kekuatan magnetisasi. Dengan menggunakan beberapa variasi posisi magnet pada bagian stator dan rotor untuk selanjutnya dianalisis posisi yang paling optimal dilihat dari persebaran arah fluks dan kekuatannya. Selain itu, material pada magnet juga dibandingkan antara Neodymium dan Alnico. Seperti pada gambar 3.2. merupakan simulasi pada SRM menggunakan FEM pada kondisi stator dan rotor sejajar. Antara stator dan rotor terdapat celah udara dengan jarak yang bisa diatur. Kumparan berada di masing-masing stator. Pemasangan magnet diletakkan di antara kutub stator. Berdasarkan penelitian [8] analisis dilakukan pada 2 posisi, yaitu saat posisi stator-rotor sejajar dan stator-rotor tidak sejajar. Semua parameter material dan ukuran dimasukkan untuk memperoleh hasil data yang valid. Seperti pada penelitian [11], karena simulasi pada FEM menggunakan dua dimensi maka untuk axial SRM bagian stator dan rotor seolah-olah dibelah dan ditarik lurus sehingga diperoleh penampang yang lurus.



Gambar 3.2 Simulasi pada FEM

Hasil dari simulasi tersebut adalah arah persebaran fluks dan besarnya fluks magnetisasi. Seperti pada Gambar 3.3, arah fluks ditunjukkan dengan arah panah dan garis. Besarnya nilai magnetisasi ditampilkan dengan warna yang mewakili suatu kisaran nilai tertentu. Untuk memperoleh hasil torsi pada motor maka menggunakan *Ansys Maxwell*. Dari hasil FEM yang paling optimum maka desain dua dimensi tersebut dijadikan gambar tiga dimensi.



Gambar 3.3 Hasil simulasi pada FEM

Setelah semua data hasil simulasi dari FEM dan *Ansys Maxwell* maka dilakukan analisis hasil dari simulasi tersebut. Apabila belum optimal maka dilakukan evaluasi. Evaluasi dapat dilakukan disimulasi FEM *ataupun Ansys maxwell*. Apabila sudah optimal dan sesuai dengan tujuan penelitian maka data tersebut diolah dan dianalisis dalam laporan thesis.

3.3 Prototipe dan Pengujian

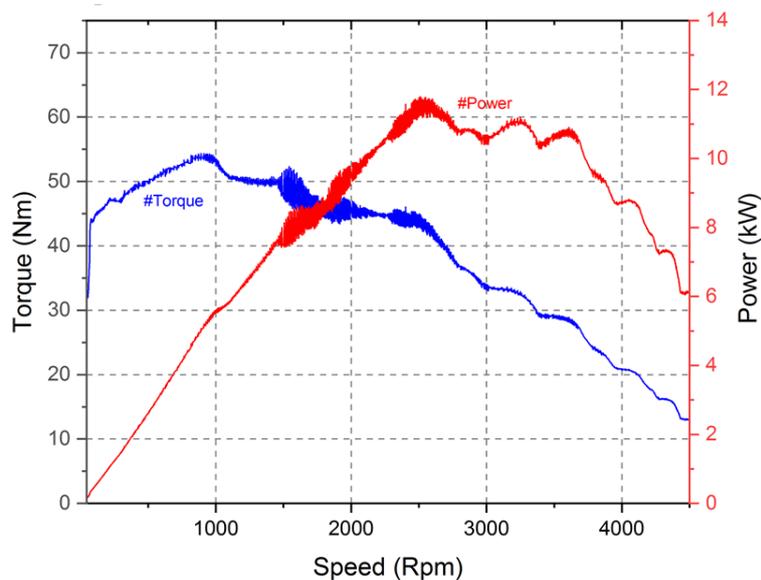
Pembuatan prototipe dilakukan berdasarkan hasil desain dan simulasi. Pada penelitian ini, digunakan motor tipe axial dengan melakukan konversi dari motor *Brushless DC* (BLDC) sehingga diperoleh perbandingan performa dengan dimensi yang sama antara BLDC dengan Switched Reluctance Motor (SRM) hasil dari penelitian ini. Untuk detail tentang prototipe dijabarkan lebih lanjut dalam bab 4.

Kemudian dilakukan validasi melalui pengujian pembebanan menggunakan alat dinamometer. Tipe dinamometer yang digunakan adalah pengereman dengan hubung singkat (*eddy current brake*). Peralatan yang digunakan adalah *Dynomite* tipe 200 HP dengan poros yang terhubung secara langsung antara dinamometer dan motor yang diuji. Dinamometer ini dilengkapi dengan sensor torsi dan kecepatan yang selanjutnya diolah dalam modul elektronik menjadi data performa dari motor.



Gambar 3.4 Dinamometer dengan tipe eddy current brake

Pengujian ini menggunakan teknik pemberian beban saat motor berputar (*rolling load*), yang artinya adalah motor dijalankan terlebih dahulu hingga kecepatan maksimal selanjutnya diberi beban secara bertahap hingga kecepatan motor mendekati berhenti atau bahkan sampai berhenti. Seiring dengan bertambahnya beban pada dinamometer maka torsi yang dihasilkan oleh motor semakin naik.



Gambar 3.5 merupakan hasil pengujian dari dinamometer, pada sisi kiri merupakan nilai torsi (*torque*) dan pada sisi kanan merupakan nilai daya (*power*). Kedua nilai tersebut direkam berdasarkan kecepatan (*RPM*) dari motor saat pengujian. Secara umum, dalam pengujian ini harus diperhatikan kemampuan pengamanan pada benda uji dan sistem pengujian. Benda uji dalam hal ini motor dan sistem elektroniknya harus dilengkapi dengan pengaman berupa pemutus arus apabila terjadi arus yang berlebihan sehingga mencegah resiko yang lebih besar.

Selain itu, sambungan antara poros motor dengan dinamometer harus dipastikan dalam kondisi baik dan tertutup oleh suatu pelindung sehingga saat dijalankan dalam kecepatan tinggi tidak terjadi slip dan benda melayang yang membahayakan. Pengujian dalam dinamometer adalah salah satu pengujian untuk memperoleh hasil paling maksimal dan optimal dari suatu motor, sehingga juga perlu diperhatikan suhu dari motor maupun dynamometer agar tetap bekerja pada suhu dalam batas aman. Secara umum pengujian dilakukan minimal tiga kali pengambilan data sehingga diperoleh hasil yang valid dan dapat dikomparasikan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada kendaraan listrik, batasan ruang untuk drivetrain harus dipertimbangkan sehingga desain motor dapat sesuai kebutuhan dan diterapkan. Struktur motor listrik secara mekanik dibagi menjadi dua, yaitu radial dan axial. Konstruksi axial SRM umumnya sama dengan motor listrik lainnya. Stator dengan belitan dan rotor. Ciri khas rotor SRM adalah bahwa tidak ada magnet seperti BLDC / PMSM atau sangkar tupai seperti motor induksi. Secara umum, output daya pada SRM dirumuskan sebagai berikut:

$$Pd = k_c k_d k_1 k_2 B A_s D^2 L N_r \quad (1)$$

Berdasarkan rumus daya diatas, k_d adalah *duty cycle*, k_c adalah *gain controller*, B adalah *stator flux density* saat kondisi sejajar antara stator dan rotor, A_s kemampuan hantar arus pada kawat tembaga. D adalah diameter luar stator, L merupakan tebal axial dari stator and N adalah kecepatan rotor dalam putaran per menit (RPM). k_1 dan k_2 adalah:

$$k_1 = \frac{\pi^2}{120} \quad (2)$$

$$k_2 = 1 - \frac{1}{\sigma_s \sigma_u} \quad (3)$$

Kemudian untuk mendapatkan nilai k_1 dan k_2 menggunakan rumus diatas dengan σ_s adalah perbandingan induktansi saat saturasi pada posisi sejajar dan tidak sejajar, σ_u adalah perbandingan induktansi saat non-saturasi pada posisi sejajar dan tidak sejajar. Selanjutnya, torsi diformulasikan sebagai berikut:

$$T = k_e k_d k_3 k_2 (B A_s) D^2 L \quad (4)$$

$$k_3 = \frac{\pi}{4} \quad (5)$$

Perlu diperhatikan bahwa torsi dan daya yang dihasilkan juga dipengaruhi oleh material dan kemampuan magnetiknya. Selanjutnya, setelah memperoleh

diameter dan ketebalan stator dan rotor, ketinggian kutub ditentukan menggunakan rumus berikut:

$$h_s = \frac{D_o}{2} - \frac{D}{2} - b_{sy} \quad (6)$$

$$h_r = \frac{D}{2} - b_{ry} - \iota_g \quad (7)$$

$$b_{sy} = \frac{D\beta_s}{2} \quad (8)$$

$$b_{ry} = \left(\frac{D}{2}\right)\beta_r \quad (9)$$

Ketinggian kutub pada stator ditentukan melalui rumus tersebut dengan h_s adalah tinggi stator dalam mm, D_o adalah diameter luar stator, h_r adalah tinggi rotor, ι_g adalah celah udara (*airgap*), b_{sy} adalah tebal bibir stator, b_{ry} adalah tinggi kutub rotor and β_r nilai asumsi sudut rotor. Untuk memperoleh lebar dari stator slot (w_{ss}), lebar rotor slot (w_{ts}) dan kutub stator (w_{sp}) menggunakan rumus sebagai berikut:

$$w_{sp} = D \sin \frac{\beta_s}{2} \quad (10)$$

$$w_{ss} = \frac{(\pi D - 6w_{sp})}{6} \quad (11)$$

$$w_{ts} = \frac{(\pi D - 4w_{tp})}{4} \quad (12)$$

Komposisi jumlah kutub (*poles*) pada stator dan rotor akan mempengaruhi arah kumparan (*winding*). Pada tabel 4.1 ditampilkan perbandingan secara umum jumlah kutub (*poles*) stator dan rotor. Perbandingan tersebut juga mempengaruhi perhitungan secara teori pada performa motor.

Tabel 4.1 Perbandingan jumlah stator dan rotor

	<i>poles</i>			
stator	6	12	8	12
rotor	4	8	6	10

Desain motor axial SRM menggunakan satu stator dan satu rotor. Ada beberapa pilihan perbandingan jumlah stator dan rotor yang ditunjukkan pada tabel 4.1. Perbandingan ini adalah yang paling sering digunakan di dunia industri. Jumlah kutub 12/8 adalah motor 3 fasa dengan empat kutub per fasa. Sebagai catatan, semakin banyak kutub rotor juga meningkatkan frekuensi stator. Juga, biaya sepeda motor semakin besar karena biaya tambahan untuk kumparan, isolasi dan terminal.



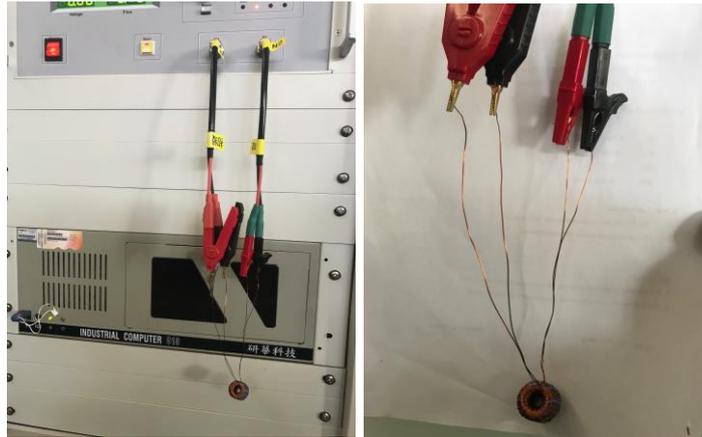
Gambar 4.1 Komponen axial SRM

Untuk desain makalah ini, 12 kutub stator dan 8 kutub rotor dipilih. Stator yang digunakan adalah tipe 35W300. Penelitian ini menggunakan magnet dengan tipe *Alnico*. Magnet tersebut memiliki karakteristik gaya tarik yang rendah sehingga mudah dalam proses perakitan. Selain itu, *Alnico* juga memiliki suhu kerja maksimum 500 derajat Celcius sehingga dapat diterapkan pada motor listrik. Biaya produksi *Alnico* jauh lebih murah daripada *Neodymium*, sehingga sangat lengkap ketika diterapkan pada motor SRM, salah satunya terkenal dengan biaya komponen motor yang terjangkau.

Motor axial SRM dioperasikan pada 72 V dan 70 A. Motor SRM memiliki metode pengendalian yang berbeda dari motor BLDC. Perangkat keras pada modul PCB untuk komponen elektronik berbeda karena perbedaan pola gulungan. SRM axial dan PM-SRM axial memiliki ukuran yang sama. Diameter luar dari motor tersebut adalah 200 mm dan 12 mm untuk ketebalan.

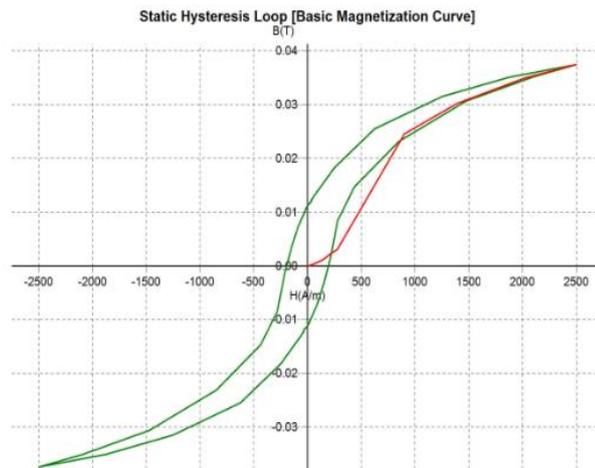
4.1 SIMULASI

Simulasi menggunakan software *Ansys Maxwell* dengan gambar tiga dimensi hasil dari desain. Output dari simulasi ini adalah daya output dari motor listrik. Dengan menggunakan gambar tiga dimensi lebih mudah untuk membandingkan hasil dengan penggantian material atau bahan yang digunakan.



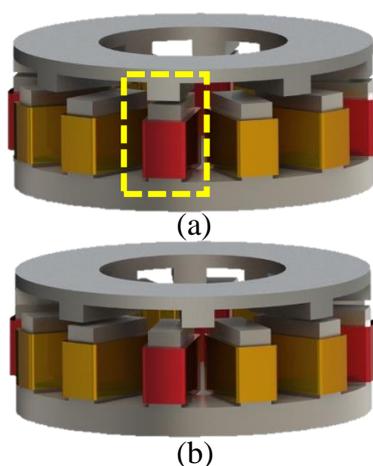
Gambar 4.2 Pengujian karakteristik material stator

Untuk memperoleh keakuratan hasil simulasi, dilakukan uji karakteristik material stator dan selanjutnya hasilnya digunakan sebagai bahan input data dalam simulasi. Proses pengujian ini menggunakan contoh material stator dengan bentuk toroidal yang diberi gulungan primer dan sekunder. Ditampilkan pada gambar 4.2 proses pengujian pada alat uji yang besar adalah gulungan primer dan alat uji yang kecil merupakan gulungan sekunder. Hasil pengujian bahan stator ditampilkan dalam grafik histeresis ditunjukkan pada Gambar 4.3 dan data dalam tabel yang digunakan untuk data input pada *Ansys Maxwell*.



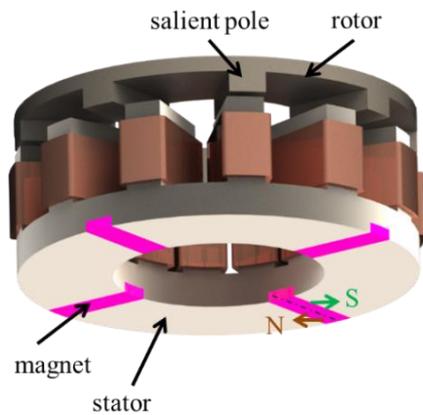
Gambar 4.3 *BH-Curve* dari material core stator

Dengan menggunakan *Ansys Maxwell*, simulasi 3D dilakukan. pada motor SRM, posisi sudut rotor ke stator memiliki karakteristik torsi yang berbeda. Secara umum, analisis dilakukan dari posisi tidak sejajar hingga posisi sejajar. Pada Gambar 4.4, gambar rotor dan stator ditampilkan dalam kondisi sejajar dan tidak sejajar. Kondisi yang tidak sejajar sampai rata diwakili dengan sudut antara 0 hingga 45 derajat. Sudut 0 derajat adalah saat arus mulai dialirkan ke belitan. Ada empat kutub stator aktif. Seperti pada Gambar 4.4, belitan aktif adalah yang merah. Rotor akan berputar sesuai dengan sumbu Z.



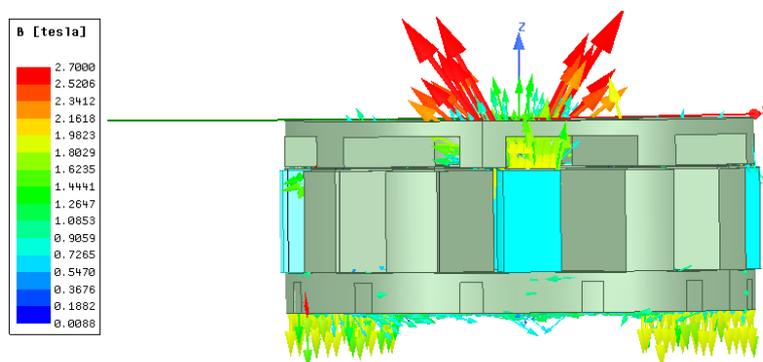
Gambar 4.4 Posisi rotor terhadap stator saat (a) kondisi sejajar dan (b) tidak sejajar

Untuk meningkatkan torsi, magnet permanen dengan tipe *Alnico* ditambahkan. Terletak di sisi stator ada empat magnet. Tampil pada gambar 4.5, magnet *Alnico* diwakili pada warna merah muda. Magnet ditempatkan di antara kutub stator. Kutub rotor menggunakan kutub yang menonjol (*salient pole*) dengan ukuran yang sama dengan lebar kutub stator. Magnet *Alnico* dipilih karena harganya dua kali lebih murah daripada magnet tanah jarang. Selain itu, magnet tanah jarang menggunakan bahan langka yang membuat kenaikan harga dan ketersediaan terbatas di masa depan. Arah magnet sesuai dengan sumbu Z. Pada setiap magnet menggunakan arah magnet yang sama.



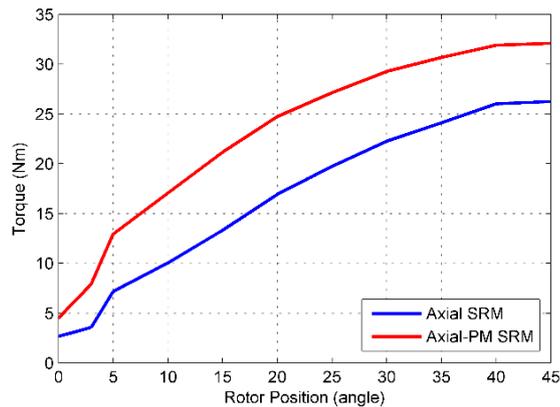
Gambar 4.5 Pemasangan magnet pada bagian stator

Selanjutnya, analisis torsi pada rotor dan nilai maksimum medan magnet pada stator. Ditampilkan pada gambar efek menambahkan magnet ke sisi stator. Peningkatan nilai fluks magnet pada stator. Peningkatan terbesar terjadi ketika kondisi tidak selaras. Kondisi ini merupakan awal ketika belitan dialirkan oleh arus sehingga terjadi torsi maksimum.



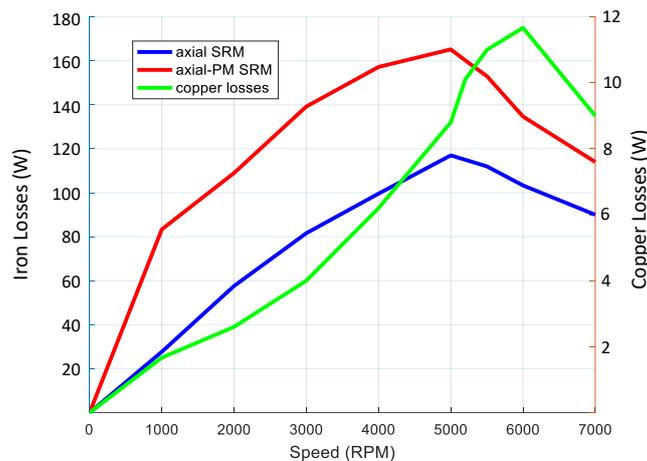
Gambar 4.6 Fluks magnetisasi saat kondisi tidak sejajar

Untuk mengetahui efek peningkatan fluks magnet pada axial SRM, perbandingan dilakukan dengan menggunakan arus input yang sama. Pada Gambar 4.7 menunjukkan perbandingan torsi (*torque*) antara axial SRM dan axial PM SRM. Terdapat peningkatan torsi dihasilkan oleh axial PM SRM. Simulasi menggunakan variasi posisi rotor (*rotor position*) antara 0 hingga 45 derajat mekanikal. Posisi 45 derajat merupakan posisi paling jauh antara kutub rotor dan stator saat kutub stator tersebut aktif.

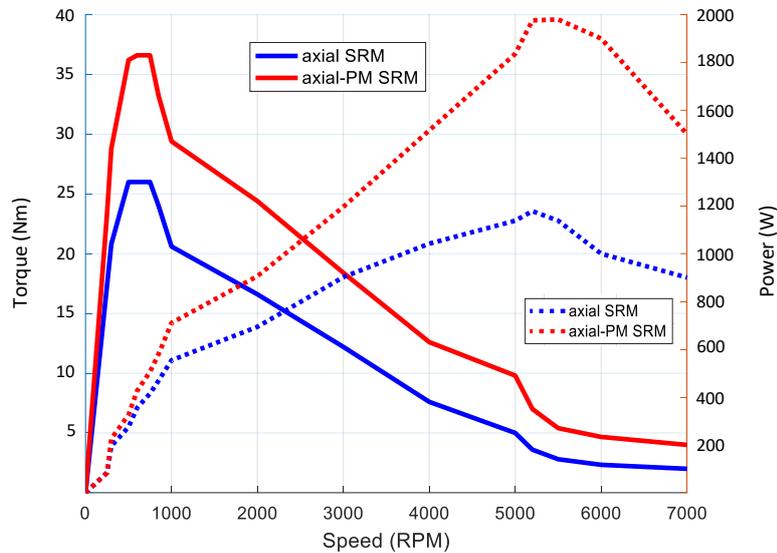


Gambar 4.7 Grafik nilai torsi terhadap sudut rotor

Selain itu, analisis kerugian pada tembaga (*copper losses*) dan besi stator (*iron losses*) juga dilakukan. Ditunjukkan pada Gambar 4.8, kerugian dalam besi stator inti meningkat sesuai dengan nilai kekuatan magnet. Untuk kerugian pada tembaga memiliki nilai yang sama karena nilai arus yang sama dari sisi input pengatur kecepatan.

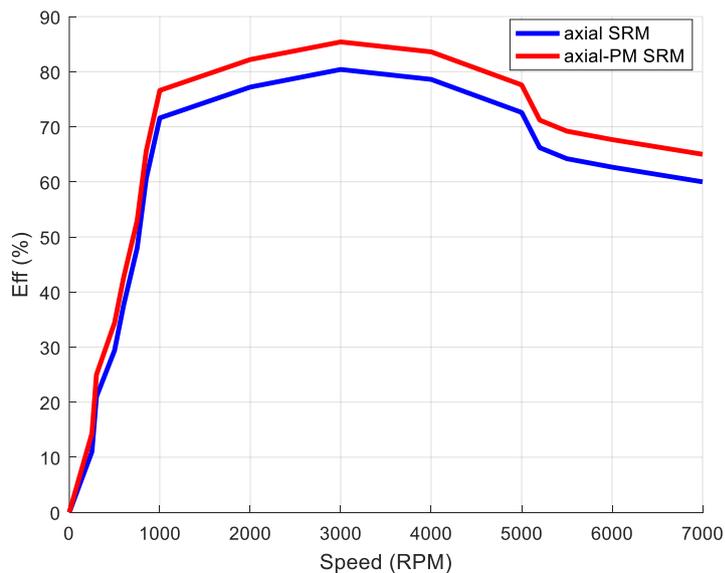


Gambar 4.8 Kerugian tembaga dan besi terhadap kecepatan



Gambar 4.9 Grafik torsi dan daya output motor terhadap kecepatan (RPM)

Gambar 4.9 menunjukkan hasil simulasi dengan perbandingan daya keluaran. Pada sisi kiri menunjukkan nilai torsi (*torque*) dan sisi merupakan nilai daya (*power*) dari motor axial SRM dan axial PM SRM. Data torsi dan daya dilakukan pencatatan terhadap putaran (*speed*) hingga 7000 RPM. Peningkatan daya pada axial SRM PM dimulai pada 2000 RPM dan terus meningkat. Daya maksimum yang diperoleh adalah 2100 W untuk PM SRM axial.



Gambar 4.10 Grafik efisiensi (Eff) terhadap kecepatan (RPM)

Ditampilkan pada gambar 4.10 efisiensi (*Eff*) berbanding lurus dengan peningkatan performa daya pada axial PM SRM. Data efisiensi dibandingkan dengan kecepatan (*speed*) hingga 7000 RPM. Nilai maksimal yang diperoleh adalah 85% pada saat putaran 2500 hingga 3000 RPM. Di area putaran tersebut, motor dalam kondisi menghasilkan torsi 22 Nm dan 1200 W. Artinya pada kondisi tersebut merupakan rating motor dengan kondisi terbaik dari sisi efisiensi. Apabila diterapkan dalam kendaraan listrik maka menjadi kondisi paling hemat.

4.2 Prototipe

Pembuatan prototipe dilakukan untuk melakukan validasi dari desain dan simulasi yang telah dilakukan. Pada penelitian ini, motor tipe axial dipilih salah satunya karena telah dilakukan penelitian sebelumnya tentang axial *Brushless DC Motor* (BLDC) yang juga menghasilkan prototipe dan memiliki performa yang baik. Berdasarkan hal tersebut maka akan lebih mudah dan hemat untuk melakukan konversi dengan mengubah sistem dari BLDC menjadi SRM. Yang perlu disesuaikan adalah pada sisi kumparan dan kutub rotor. Kumparan dilakukan gulung ulang sesuai dengan arah magnetisasi dan jumlah kutub antara stator dan rotor seperti pada tahap desain. Selanjutnya, pada sisi rotor dilakukan penggantian magnet dengan kutub besi. Desain dari kutub besi sesuai dengan rancangan pada desain. Pada penelitian ini adalah menambahkan magnet pada sisi stator sejumlah empat titik sesuai dengan desain. Sehingga dilakukan proses pembuatan lubang untuk tempat dari magnet tersebut. Pada gambar dibawah merupakan hasil jadi dari stator SRM dengan magnet pada sisi bawah.

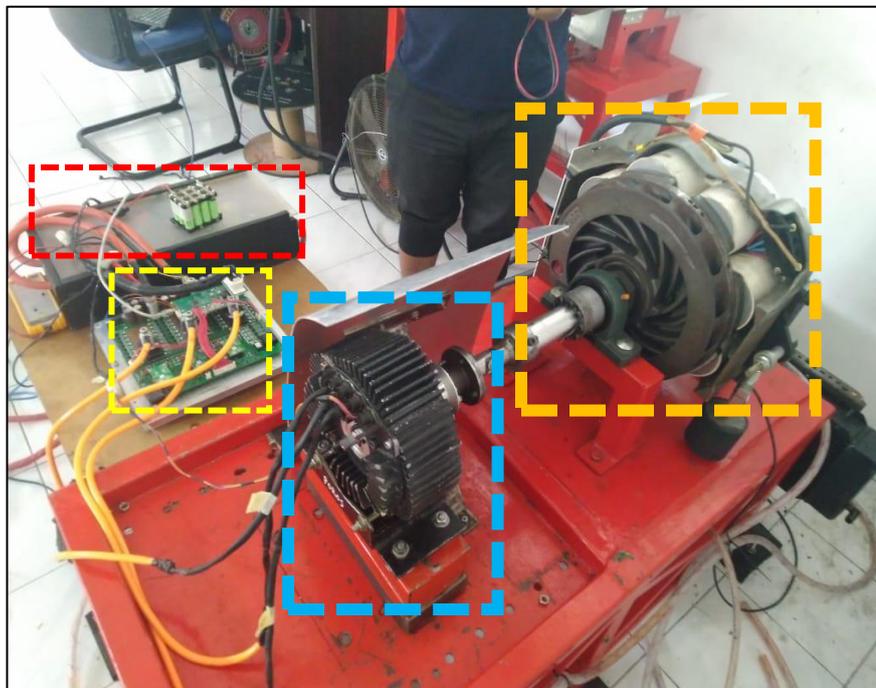


Gambar 4.11 Hasil jadi prototipe motor SRM bagian stator

Karakteristik kumparan pada SRM motor adalah terdapat tiga fasa dengan dua kelompok kumparan yang berbeda. Sehingga pada sisi output dari kabel terdapat enam kabel. Selain itu, karena tidak ada magnet pada sisi rotor sehingga pemasangan pada sistem SRM motor lebih sederhana dan mudah. Hal ini disebabkan oleh tidak ada tarikan magnet terhadap stator.

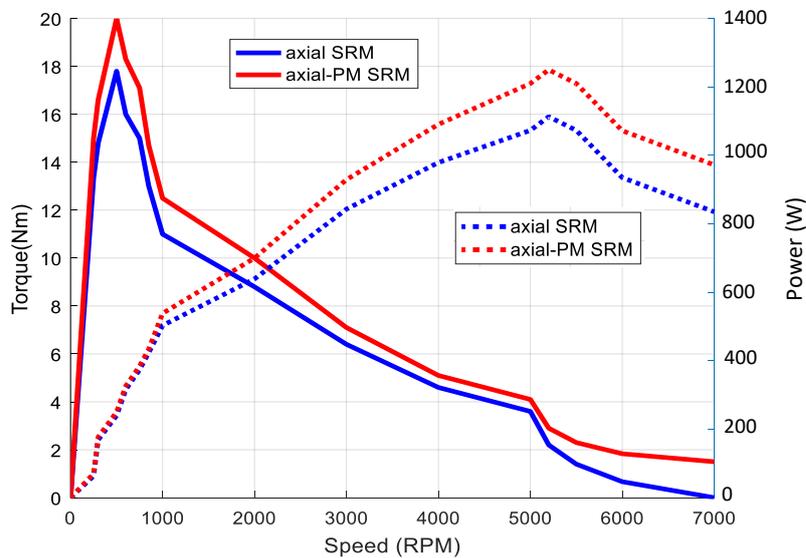
4.3 Pengujian

Dijelaskan pada bab tiga bahwa pengujian menggunakan dinamometer dengan tipe eddy current brake. Metode pengujian yang dilakukan adalah rolling brake, dengan cara menjalankan motor hingga putaran maksimal dan selanjutnya beban diaktifkan dan naik secara perlahan. Gambar 4.11 merupakan rangkaian untuk pengujian dinamometer. Kotak dengan garis merah menunjukkan baterai. Sistem yang digunakan adalah tegangan 72 V. Selanjutnya arus dialirkan ke pengatur kecepatan. Kemudian arus dialirkan ke kumparan motor hingga berputar. Secara mekanikal motor disambungkan dalam satu poros dengan dinamometer.



Gambar 4.12 Rangkaian untuk pengujian dinamometer

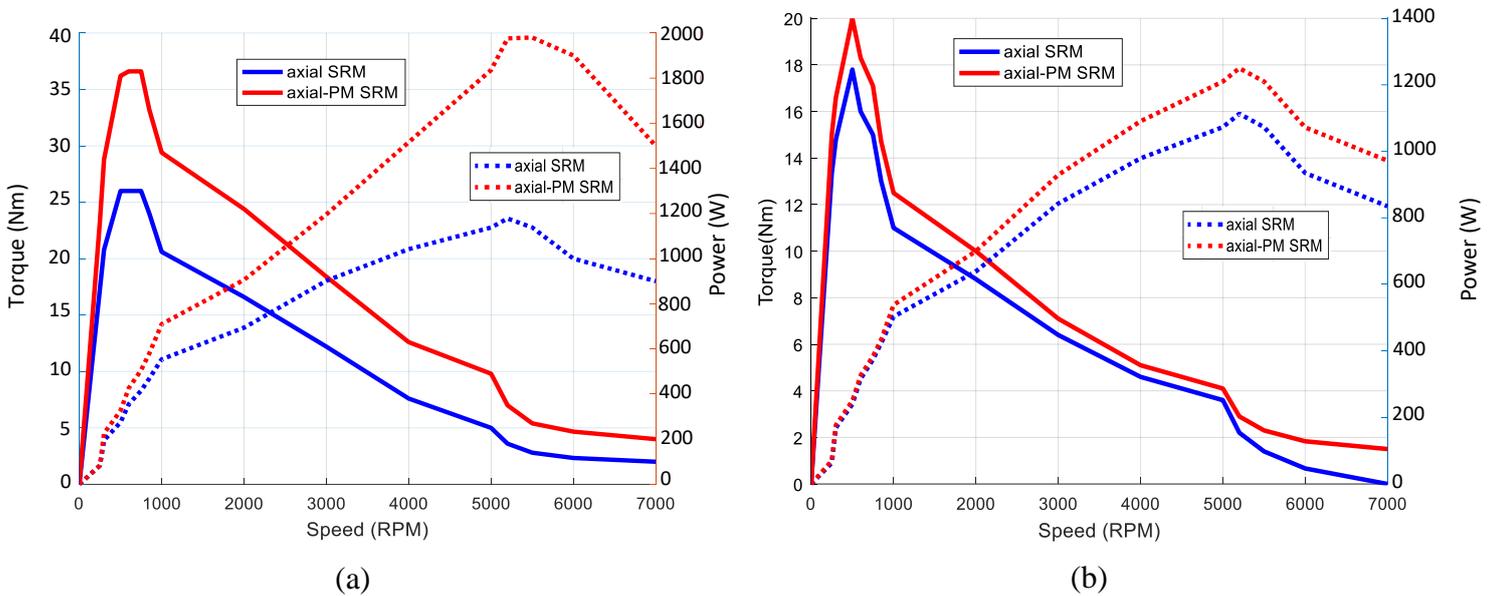
Pengujian dilakukan pada motor axial SRM dan axial SRM dengan magnet. Setiap tipe motor dilakukan pengujian dengan mengambil satu data beban penuh. Melalui pengujian ini, diperoleh data yang meliputi daya, torsi dan kecepatan motor. Hasil dari pengujian tersebut disajikan pada grafik Gambar 4.12. torsi (*torque*) maksimal pada axial PM SRM adalah 20 Nm di putaran 800 RPM, terdapat selisih 2 Nm dari axial SRM. Daya (*power*) yang mampu dihasilkan oleh axial PM SRM mencapai 1250 W. Karakteristik puncak torsi maksimal hanya terjadi hingga putaran (*speed*) 900 RPM yang selanjutnya mengalami penurunan yang cukup drastis.



Gambar 4.13 grafik hasil pengujian dinamometer

4.4 Perbandingan antara simulasi dan prototipe

Data yang didapat dari simulasi dan prototipe dibandingkan untuk dapat mengetahui akurasi dari simulasi yang telah dilakukan. Perbandingan tersebut disajikan dalam Gambar 4.13.



Gambar 4.14 (a) Hasil output dari simulasi dan (b) Output dari pengujian prototipe

Berdasarkan kedua grafik tersebut, terlihat bahwa pola karakteristik kecepatan dan torsi antara simulasi dan prototipe memiliki pola yang sama. Torsi (*torque*) yang tinggi saat percepatan hingga putaran (*speed*) 1000 RPM. Terdapat perbedaan pada nilai daya maksimal dan torsi maksimal. Selisih nilai tersebut ditampilkan pada tabel berikut.

Tabel 4.2 Perbandingan performa antara simulasi dan prototipe

	Axial SRM	Axial PM-SRM
Peak Power (W) simulation	1200	1900
Peak Power (W) prototipe	1100	1300
Error	8%	31%
Peak Torque (Nm) simulation	26	37
Peak Torque (Nm) prototipe	18	20
Error	30%	45%

Berdasarkan perbandingan pada Tabel 4.2, diketahui bahwa terdapat perbedaan yang signifikan antara simulasi dan prototipe. Selisih daya maksimal (*peak power*) antara simulasi dan prototipe adalah 8 hingga 31%. Sedangkan selisih

torsi maksimal (*peak torque*) antara simulasi berkisar antara 30 hingga 45%.

Beberapa analisis terkait nilai selisih tersebut adalah:

- a. Validasi pengukuran arus yang masuk ke pengatur kecepatan dan SRM motor tidak dilakukan. Sehingga tidak diketahui nilai arus dan tegangan saat pengujian pada prototipe dibanding dengan pengaturan arus pada kondisi simulasi.
- b. Material yang sudah dilakukan validasi adalah *silicon steel* pada stator. Untuk validasi pada *aluminium nickel cobalt* (Alnico) magnet yang digunakan tidak dilakukan pengujian karakteristik material. Pada prototipe, tidak diketahui secara detail jenis/tipe detail *Alnico* magnet yang digunakan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

KESIMPULAN

Penelitian yang telah dilakukan adalah mengenai peningkatan performa pada motor listrik tipe Switched Reluctance Motor (SRM). Desain axial SRM dipilih karena memiliki karakteristik torsi yang lebih besar daripada radial SRM. Dengan menambahkan magnet tipe Alnico di sisi stator, peningkatan torsi dan daya output dari PM SRM axial diperoleh lebih besar daripada SRM tanpa menggunakan magnet. Diperoleh peningkatan daya pada prototipe sebesar 200 W atau 15 % dari daya motor tanpa magnet. Kemudian terdapat peningkatan torsi sebesar 2 Nm atau 10 % dari torsi motor tanpa magnet.

Sehingga dapat disimpulkan bahwa dengan menambahkan magnet pada sisi stator dapat meningkatkan kinerja SRM dan dapat meningkatkan potensi SRM untuk menjadi penggerak utama dalam kendaraan listrik. Validasi pada prototipe dan analisis yang lebih rinci perlu dilakukan untuk memperoleh hasil yang maksimal.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Z. Yang, F. Shang, I. P. Brown, and M. Krishnamurthy, "Comparative study of interior permanent magnet, induction, and switched reluctance motor drives for EV and HEV applications," *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 1, no. 3, pp. 245–254, 2015.
- [2] "Technology - Phi-Power AG." [Online]. Available: <http://www.phipower.com/en/technology/>. [Accessed: 20-May-2019].
- [3] R. M. Pindoriya, B. S. Rajpurohit, R. Kumar, and K. N. Srivastava, "Comparative analysis of permanent magnet motors and switched reluctance motors capabilities for electric and hybrid electric vehicles," *2018 IEEMA Eng. Infin. Conf. eTechNxT 2018*, pp. 1–5, 2018.
- [4] H. Arihara and K. Akatsu, "Basic properties of an axial-type switched reluctance motor," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, no. 1, pp. 59–65, 2013.
- [5] J. Ma *et al.*, "Optimal Design of an Axial-Flux Switched Reluctance Motor with Grain-Oriented Electrical Steel," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no. 6, pp. 5327–5337, 2017.
- [6] K. Kiyota, S. Nakano, and A. Chiba, "A Fast Calculation Method of Optimal Ratio of Outer Diameter and Axial Length for Torque Improvement in Switched Reluctance Motor," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 6, pp. 5802–5811, 2018.
- [7] J. F. Zhang, X. F. Lu, J. Lu, Q. Kang, and X. Z. Dong, "Study of the new permanent magnet switched reluctance motor," *APAP 2011 - Proc. 2011 Int. Conf. Adv. Power Syst. Autom. Prot.*, vol. 3, pp. 1684–1687, 2011.
- [8] F. Kucuk and T. Nakamura, "Torque Density and Efficiency Improvement of a Switched Reluctance Motor via low-cost Permanent Magnets," *Proc. - 2018 23rd Int. Conf. Electr. Mach. ICEM 2018*, pp. 2318–2322, 2018.
- [9] Y. Hasegawa, K. Nakamura, and O. Ichinokura, "A novel switched reluctance motor with the auxiliary windings and permanent magnets," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 11, pp. 3855–3858, 2012.
- [10] "Comparison of magnetic characteristics." [Online]. Available: <https://www.magfine.co.jp/eng/magnet/comparison.html>. [Accessed: 07-May-2019].
- [11] P. Andrada, E. Martínez, M. Torrent, B. Blanqué, and J. I. Perat, "Novel in-wheel axial-flux segmented switched reluctance motor Acknowledgments Keywords Description of the novel axial-flux segmented SRM," pp. 1–8, 2014.

Halaman ini sengaja dikosongkan

INDEX

A

Aluminium Nickel Cobalt (Alnico)	vii
Ansys Maxwell.....	vii, ix, 23, 33, 34, 41, 42
axial PM-SRM	vii, viii
axial SRM.....	vii, ix, 22, 26, 27, 29, 33

B

Brushless DC Motor (BLDC)	vii, ix, 19, 25
---------------------------------	-----------------

F

Ferrite	30
<i>Finite Element Magnetic Method (FEMM)</i>	vii, ix

I

Induction Motor (IM).....	vii, ix, 19, 21
---------------------------	-----------------

N

<i>Neodymium magnet</i>	29
-------------------------------	----

P

Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM)	25
---	----

R

rotor	xv, xvii, 20, 21, 23, 26, 28, 33, 38, 39, 40, 42, 43, 44, 46
-------------	--

S

<i>silicon steel</i>	21, 49
Stator	20, 28, 38, 40
Switched Reluctance Motor (SRM).....	vii, ix, xiii, 19, 25, 28, 32, 50

Halaman ini sengaja dikosongkan