



TESIS - EE185401

**ANALISIS PENGARUH KETEBALAN DAN
MATERIAL PEMEGANG STATOR TERHADAP
PERFORMA MOTOR LISTRIK DENGAN TOPOLOGI
MOTOR *YASA BLDC***

AYUNING FITRI DESANTI
07111750012005

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
SURABAYA
2020



TESIS - EE185401

**ANALISIS PENGARUH KETEBALAN DAN
MATERIAL PEMEGANG STATOR TERHADAP
PERFORMA MOTOR LISTRIK DENGAN TOPOLOGI
MOTOR *YASA BLDC***

**AYUNING FITRI DESANTI
07111750012005**

**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:

AYUNING FITRI DESANTI

NRP: 07111750012005

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. Dr. I Made Yulistya Negara ST., M.Sc.
NIP: 197007121998021001
3. Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, MT
NIP: 196509011991032002

Kepala Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas

Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D
NIP: 197311192000031001

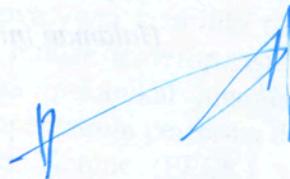
Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tesis saya dengan judul **“ANALISIS PENGARUH KETEBALAN DAN MATERIAL PEMEGANG STATOR TERHADAP PERFORMA MOTOR LISTRIK DENGAN TOPOLOGI YASA BLDC”** 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, 1 Januari 2020



Ayuning Fitri Desanti

NRP. 07111750012005

Halaman ini sengaja dikosongkan

ANALISIS PENGARUH KETEBALAN DAN MATERIAL PEMEGANG STATOR TERHADAP PERFORMA MOTOR LISTRIK DENGAN TOPOLOGI YASA BLDC

Nama mahasiswa : Ayuning Fitri Desanti
NRP : 07111750012005
Pembimbing : 1. Dr. Dimas Anton Asfani, ST.,MT
2. Dedet Candra Riawan, ST.,M.Eng.,Ph.D
3. Dr. Muhammad Nur Yuniarto

ABSTRAK

Motor listrik axial dengan topologi *Yokeless Axial and Segmented Armature (YASA) BrushLess Direct Current (BLDC)* dengan bentuk susunan satu stator dan dua rotor atau *sendwich* memiliki banyak keunggulan. Kerapatan daya, torsi yang tinggi dengan bentuk yang sederhana sangat dapat diaplikasikan untuk penggerak kendaraan listrik yang belum populer namun sangat potensial di era mendatang. Secara mekanikal, struktur inti besi yang menggunakan *Soft Magnetic Composite (SMC)* sebagai bahan pembuat untuk stator tersebut tidak dapat berdiri sendiri. Struktur stator dengan belitan di dalamnya yang memiliki rongga perlu menggunakan pemegang yang tetap yang tidak mudah terdeformasi. Pemegang stator yang digunakan selain harus kuat secara mekanikal juga harus dapat berfungsi baik dari sisi elektrik dengan tidak mempengaruhi performa dari motor.

Penggunaan material Poly Ether Ether Ketone (PEEK) yang biasa digunakan dalam motor topologi YASA BLDC ini memiliki harga yang tinggi dan bahan yang susah didapatkan serta fabrikasi yang sulit menjadi salah satu permasalahan yang harus dicarikan solusi. Pada penelitian ini akan dilakukan Analisis pengaruh performa motor BLDC YASA dari material pemegang stator untuk mengetahui pilihan pemegang stator selain adhesif. Pilihan material yang diuji akan menghasilkan data hysteresis yang dapat digunakan sebagai masukan dari analisis material menggunakan *Finite Element Magnetic Method (FEMM)* untuk mengetahui persebaran fluks magnetisasi dan menggunakan Ansys Maxwell untuk mengetahui performa motor.

Hasil akhir dari penelitian ini diperoleh data yang menyatakan bahwa serat karbon adalah komponen pembentuk pemegang stator yang kuat secara material dan tahan terhadap suhu kerja motor listrik dengan topologi YASA dan memiliki efek elektromagnetik yang baik, Sehingga memiliki efek performa yang baik dengan efisiensi 97%.

Kata kunci: YASA(*Yokeless axial segmented armature*), Pemegang stator, FEMM, SMC(*soft magnetic composite*), Serat karbon

Halaman ini sengaja dikosongkan

THICKNESS AND MATERIAL ANALYSIS OF STATOR HOLDER TO PERFORMA OF ELECTRIC MOTOR WITH YASA BLDC TOPOLOGY

By : Ayuning Fitri Desanti
Student Identity Number : 07111750012005
Supervisor(s) : 1. Dr. Dimas Anton Asfani, ST.,MT
2. Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D
3. Dr. Muhammad Nur Yuniarto

ABSTRACT

Electric motor with Yokeless Axial and Segmented Armature (YASA) BrushLess Direct Current (BLDC) topology consist of two rotors and inner stator comprised of many independent segment hava many adventages. Power density, high torque with simple shape could apply in any electric vehicle and popular in future. Core for stator uses Soft Magnetic Composite (SMC) to conduct the three-dimensional magnetic flux. All stator segments and concentrated winding are fixed with the aid of two annular plates. There are cavities on both plates which have the same shape as the shoe of the stator segment. Moreover, the deformation of the plates must be kept as low as possible and have very high yield strength because of stress from the bearing.

A complex structure, high durability, and high electrical resistance are the challenges. Polyetheretherketone (PEEK) is usually used as the plates, however high price and manufacturing cost remain an issue. Some other materials have a possibility and approach to PEEK capability. In this paper, candidate materials will be developed as a specimen and tested on the BH - Curve meter to look up the hysteresis graph. The BH-Curve data provide simulation on Finite Element Magnetic Method (FEMM). The advantages and disadvantages are discussed in this paper.

The analysis result demonstrates that other materials carbon fibre possess a similar capability as PEEK related to YASA stator plate holder to find out the best material for electrical impact and had more than 97% efficiency in performa.

Key words: yokeles and segmented armature machine, stator plate holder, soft magnetic composite, finite element method analysis

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, pada akhirnya buku tesis dengan judul “Analisis pengaruh ketebalan dan material pemegang stator terhadap performa motor listrik dengan topologi YASA BLDC” telah selesai dibuat. Semoga buku ini bermanfaat dan dapat digunakan oleh mahasiswa yang ingin melakukan penelitian terhadap performa motor listrik. Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik (MT) pada bidang studi teknik sistem tenaga, di Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Penulis mengucapkan terimakasih kepada berbagai pihak yang telah memberi bantuan dan dukungan dalam penyelesaian tesis, terutama kepada :

- a. Bapak Dr. Dimas Anton Asfani, Bapak Dr. Dedet Riawan selaku dosen pembimbing I dan 2 yang telah memberikan pelajaran, motivasi, arahan, dan saran dalam pengerjaan tesis ini.
- b. Bapak Dr. M. Nur Yuniarto. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, saran, dan koreksi kepada penulis selama penulisan tesis ini serta dukungan sepenuhnya dalam hal penelitian ini.
- c. Bapak Yoga Uta Nugraha selaku suami dari 2 anaknya yang mendukung dari segala aspek.
- d. Seluruh staff dan karyawan Jurusan Teknik Elektro ITS yang telah memberikan bantuan administrasi.
- e. Semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan tesis yang tidak dapat penulis sebutkan.

Penulis berharap semoga apa yang ada di dalam tesis ini dapat memberikan manfaat kepada pembaca terutama mahasiswa Teknik Elektro ITS.

Surabaya, 1 Januari 2020

Ayuning Fitri Desanti

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	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Kontribusi.....	4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA	5
2.1 Kajian Penelitian Terkait.....	7
2.1.1 Perkembangan Motor Listrik YASA.....	7
2.1.2 Material SMC pada Motor Listrik Traksi.....	8
2.1.3 Analisis Motor YASA	10
2.2 Teori Dasar.....	10
2.2.1 Motor Listrik BLDC.....	11
2.2.2 Konstruksi Motor Listrik BLDC YASA	12
2.2.3 Konstruksi Motor Listrik BLDC YASA	15
BAB 3 METODE PENELITIAN	23
3.1 Studi Topologi YASA Motor.....	24
3.2 Pengambilan Data Material.....	24

3.3	Simulasi Model.....	25
3.4	Pembuatan Prototipe.....	26
3.5	Pengujian Prototipe	26
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....		27
4.1	Simulasi Mekanik.....	27
4.2	Simulasi Elektrik	31
4.3	Perakitan dan Uji Performa	34
BAB 5 KESIMPULAN.....		39
DAFTAR PUSTAKA		41
INDEX		43

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Motor Listrik YASA BLDC	1
Gambar 1.2	Struktur BLDC Motor Dengan Topologi YASA.....	2
Gambar 2.1	Arah Flux Pada Motor Axial Dan Radial	5
Gambar 2.2	Struktur YASA BLDC Motor.....	6
Gambar 2.3	Struktur Stator YASA BLDC Motor (a) Konstruksi Stator Dari Sisi Depan (b) Konstruksi Stator dari Sisi Samping.....	7
Gambar 2.4	Struktur Stator YASA BLDC Motor Dipotong Secara Axial.....	8
Gambar 2.5	Diagram Effisiensi Motor Listrik.....	9
Gambar 2.6	Persebaran Flux Pada Simulasi FEA	10
Gambar 2.7	Konstruksi Motor (a) Silindris Rotor Dalam (b)Silindris Rotor Luar (c)Stator Tunggal Bertumpuk (d) Stator Ganda Bertumpuk	13
Gambar 2.8	Konstruksi Motor YASA BLDC Motor Dengan Stator di Tengah dan 2 Magnet di Setiap Sisi [1].....	15
Gambar 2.9	Model Elektrik 3 Fasa Pada Sisi Stator Motor Listrik BLDC	15
Gambar 2.10	Struktur Stator Motor Listrik BLDC YASA.....	17
Gambar 2.11	Proses Pembuatan Material Inti Stator Dengan Material SMC	17
Gambar 2.12	Material Pemegang Stator.....	18
Gambar 2.13	Nilai Permeabiliti Dengan Suhu Kerjanya.....	19
Gambar 2.14	Konstruksi Rotor Dari YASA BLDC Motor	20
Gambar 2.15	Skewing Magnet Permanen (a) Model 1 (b) Model 2	21
Gambar 3.1	Flowchart Metodologi Penelitian.....	23
Gambar 3.2	Bentuk Material yang Bisa di Uji Pada Alat Uji Histerisis	24
Gambar 3.3	Metode Pengujian Pada Grafik Histerisis Meter	25
Gambar 3.4	Hasil Pengujian Histerisis Pada Material Contoh.....	25
Gambar 3.5	Permodelan Pada Software FEMM	26
Gambar 4.3	Material Dalam Simulasi Perubahan Bentuk Dengan Input Tenaga (a) Plastik (b) Besi (c) Alumunium (d) PEEK (e) Serat karbon ...	29

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Material yang digunakan	27
Tabel 4.2 Hasil uji ketangguhan motor listrik	37

Halaman ini sengaja dikosongkan

NOMENKLATUR

- YASA : Yokeless Axial Segmented Armature atau motor listrik yang memiliki susunan seperti sandwich dan dapat digabungkan.
- FEMM : Finite Element Magnetic Method merupakan aplikasi yang dapat memodelkan wilayah persebaran magnet yang ada pada suatu bidang ukur yang sudah diidentifikasi
- Stator : Bagian inti motor yang dililiti kawat tembaga dan dialiri arus
- Rotor : Bagian dari motor yang memiliki bagian magnet permanen dalam kasus ini
- AFPM : Axial Flux Permanent Magnet adalah arah gaya magnetik yang timbul akibat fluks pada motor listrik yang arahnya axial atau keluar
- SMC : Soft Magnetic Composite adalah material pembentuk inti stator yang berupa serbuk besi dengan komposisi adhesive tertentu sehingga dapat diolah.
- Pemegang Stator : Adalah pegangan dari inti besi stator dalam motor listrik axial dan sebagai sarana penopang utama sebuah stator
- Kurva Hysterisis : Kurva yang menunjukkan nilai magnetisasi suatu material
- Magnet permanen : Adalah magnet yang tidak diinduksi yang merupakan magnet asli dari pembentukan alam sehingga tidak mudah terdispersi dan terdefiasi gaya lain.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

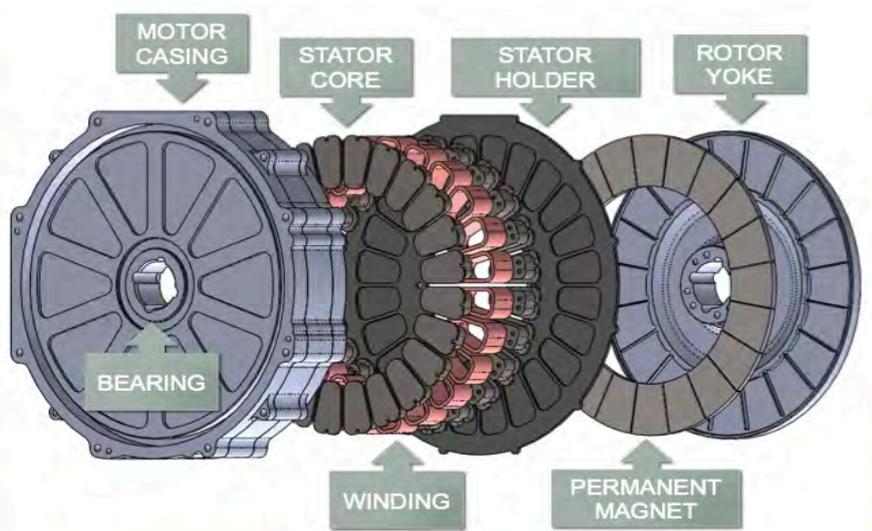
Kendaraan listrik terus berkembang seiring dengan perkembangan teknologi yang semakin baik. Motor listrik yang digunakan dalam berbagai kendaraan listrik juga mengalami banyak modifikasi atau improvement untuk menemukan kombinasi yang terbaik. Motor listrik BLDC merupakan salah satu penggerak kendaraan listrik yang favorit. Motor listrik merupakan penggerak utama yang dimiliki oleh suatu kendaraan listrik. Untuk memperoleh power yang baik dengan dimensi yang tidak memakan banyak tempat, axial BLDC motor dipilih dalam banyak implementasi penggerak kendaraan listrik yang efektif dan terus berkembang. Dalam perkembangannya axial motor dengan topologi berteknologi baru *Yokeless Axial Segmented Armature* (YASA) yang telah diteliti oleh Universitas Oxford dan digunakan dalam kendaraan listrik yang dimiliki oleh ITS.



Gambar 1.1 Motor Listrik YASA BLDC

Dalam Struktur YASA motor sangat menarik untuk diteliti lebih lanjut. Sebagian besar penelitian adalah terakait dengan stator dan rotor. Namun pada struktur YASA ada komponen lain yang memiliki pengaruh terhadap performa dan kekuatan motor tersebut. Secara umum komponen itu disebut dengan

pemegang stator. Dalam permodelannya topologi YASA tidak memperhitungkan adanya pengaruh yang ada dari pemegang stator (*core shielding*) yang mana di Indonesia material pembentuknya tersebut tidak ada. Sehingga peneliti mencoba menganalisis komponen pemegang stator yang memiliki pengaruh minimal agar dapat membuat suatu prototyping BLDC motor dengan performa yang baik sehingga dapat memproduksi motor listrik YASA sendiri.



Gambar 1.2 Struktur BLDC Motor Dengan Topologi YASA

Dalam Struktur YASA seperti da Gambar 1.2 yang mana struktur dari YASA terdiri dari pemegang rotor, Magnet permanen, Pemegang stator, inti besi dari stator itu sendiri dan lilitan kawat serta casing motor. Dari keseluruhan rangkaian pembentuk motor menentukan kekuatan dari masing-masing komponen pembentuknya terutama pada pemegang stator sebagai komponen penting di sisi stator. Pada stator, komponen penguat pemegang stator memiliki fungsi yang cukup penting untuk dapat menyebarkan magnetisasi dengan baik saat terjadi induksi. Oleh sebab itu material pembentuk dari pemegang stator itu sendiri harus memiliki nilai magnetisasi yang baik atau 0. Nilai magnetisasi yang baik dapat diperoleh dari hambatan electric material yang baik sehingga tidak menjadi penghalang persebaran magnetisasi itu sendiri saat terjadi induksi pada kumparan stator. Selain harus memiliki nilai elektrisasi yang baik, pemegang stator juga

harus memiliki struktural antar partikel yang kuat dan ringan serta rigid karena dapat mempengaruhi performa motor itu sendiri.

Motor listrik dengan topologi yasa memiliki beberapa kelebihan dengan struktur yang dapat di stack secara paralel. Karena itu dalam penelitian ini hanya mempelajari satu jenis motor listrik dengan daya tertentu. Selain itu motor listrik dengan topologi YASA memiliki pendinginan yang lebih efektif karena pendingin langsung di sisi stornya.

1.2 Rumusan Masalah

Penelitian ini dilakukan untuk dapat mengatasi permasalahan pada pengembangan *YASA Axial* BLDC motor. Permasalahan yang menjadi dasar dari penelitian ini adalah struktur dari YASA motor adalah:

- a. Penggunaan epoxy resin sebagai pemegang stator. Epoxy resin tersebut hanya dapat dioperasikan pada temperature maksimal 90° celcius dan kekuatannya yang terbatas.
- b. Parameter yang dapat digunakan sebagai material pemegang stator.
- c. Pengaruh pemegang stator terhadap performa dari YASA BLDC motor.
- d. Material yang paling cocok digunakan untuk pemegang stator.
- e. Nilai magnetisasi pemegang stator dalam permodelannya di FEMM.

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian yang dilakukan diharap dapat mendapat hasil yang sesuai tujuan seperti berikut:

- a. Melakukan perbandingan alternatif material untuk pemegang stator pengganti dari epoxy resin yang tahan terhadap suhu tinggi.
- b. Menentukan parametar yang tepat untuk menentukan material pemegang stator.
- c. Menganalisis pengaruh yang ditimbulkan oleh masing-masing pemegang stator yang digunakan dalam uji performa YASA BLDC motor.
- d. Menentukan material yang kuat secara struktur dan suhu untuk dijadikan pemegang stator.

- e. Menganalisis nilai magnetisasi sehingga mengetahui histerisis dari suatu material pemegang stator.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang dilakukan dalam penelitian ini bertujuan untuk memberikan koridor masalah yang akan dikerjakan sebagai berikut:

- a. Simulasi dilakukan menggunakan Finite Elemen Magnetic Method (FEMM) untuk melihat persebaran flux akibat dari pemegang stator.
- b. Material yang digunakan untuk simulasi adalah epoxy resin, aluminium, besi, akrilik (plastik) dan carbon fiber.

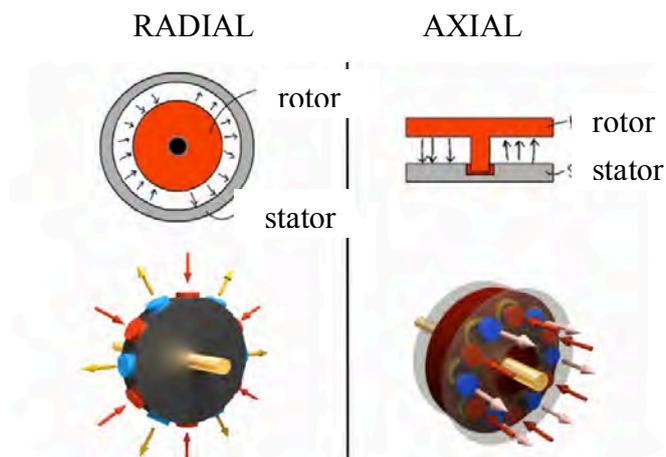
1.5 Kontribusi

Penelitian ini dilakukan agar mendapatkan material pengganti PEEK yang susah dalam fabrikasi dengan efisiensi performa lebih dari 90%.

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

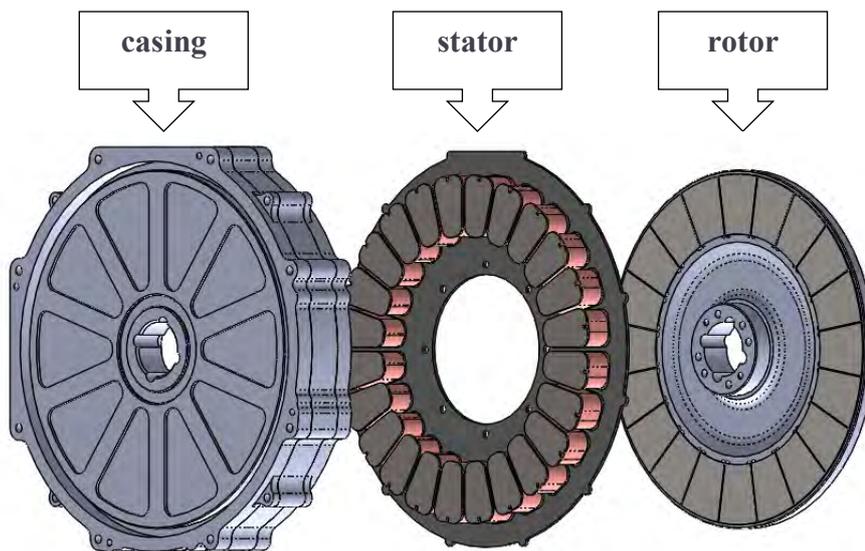
Dalam kemajuan teknologi yang semakin menuju kearah yang baik ini, pengembangan motor listrik dibedakan menjadi axial flux motor dan radial flux motor seperti pada Gambar 2.1. arah magnetisasi utama pada axial flux motor mengikuti bidang axialnya atau menjauhi as utama sedangkan pada radial flux motor arah fluxnya mengikuti putaran radialnya.



Gambar 2.1 Arah Flux Pada Motor Axial Dan Radial

Pada penelitian ini peneliti menggunakan motor BLDC dengan model axial flux karena walaupun radial sudah banyak digunakan pada era teknologi sekarang ini namun axial flux juga memberikan kontribusi yang nyata dan merupakan pesaing yang cukup kompetitif terutama karena ukuran yang ringkas dan torsi besar serta power yang dihasilkannya. Hal terbaik dari axial motor yang menarik untuk diteliti adalah struktur dari stator yang mana merupakan komponen utama selain rotor yang tersusun dari magnet permanen. *Permanent Magnet Axial Flux Motor* (PMAFM) secara struktur dibedakan menjadi 3 yakni satu sisi atau sesisi yang mana hanya ada 1 rotor dan 1 stator yang merupakan konstruksi yang paling sederhana dari axial flux motor karena hanya melibatkan 1 stator dan 1 rotor. Yang kedua ialah sisi ganda yang tersusun dari posisi yang terhimpit antara stator-rotor-stator atau rotor-stator-rotor, dalam pengembangannya sisi double juga

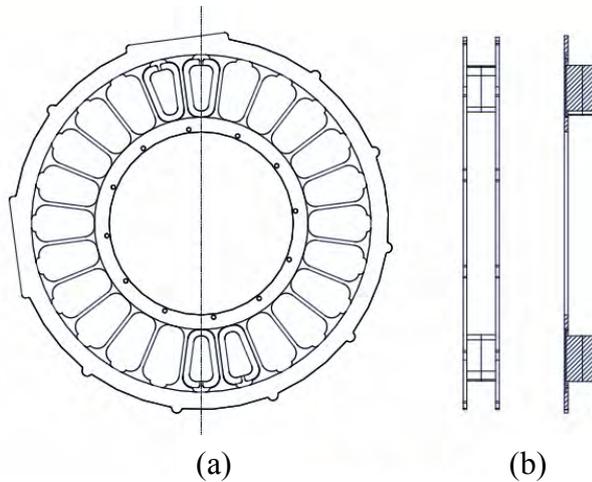
memiliki detail konfigurasi yang berbeda dalam peletakan magnet permanennya. Sisi ganda atau dobel ini juga sering disebut dengan *sandwich structure* (komponen terhimpit). Di berbagai literatur, sisi ganda dengan stator yang terletak ditengah atau terhimpit disebut juga dengan *Yokeless Axial and Segmented Armatur* (YASA). Sedangkan struktur yang ke 3 yaitu *multi stage* (banyak susunan rotor dan stator yang disusun berlapis).



Gambar 2.2 Struktur YASA BLDC Motor

Dalam penelitiannya banyak material yang digunakan untuk membentuk inti stator itu sendiri, dan selama ini material yang dibuat oleh tim Universitas Oxford memiliki nilai histerisis yang cukup baik [1] sehingga banyak diimplementasikan pada motor listrik YASA BLDC Motor. Penelitian yang akan dibahas pada sub bab selanjutnya masih belum ditemukan permodelan yang mendiskusikan mengenai pengaruh dari pemegang stator yang memiliki peran cukup penting dalam struktural mekaniknya sehingga memiliki pengaruh elektromagnetik jika tidak menggunakan material yang sesuai. Sesuai yang dimaksudkan adalah material yang memiliki nilai histeris yang baik dan struktur yang kuat karena partikelnya dan tahan terhadap suhu (*temperature*) yang tinggi. Karena dalam pengaplikasiannya material yang dipakai akan diletakkan bersinggungan langsung dengan inti stator yang dililit kumparan, yang mana pasti

akan ada efek panas yang cukup tinggi. Pada bagian lain material dengan spesifikasi tersebut dapat dipastikan merupakan material yang susah didapatkan dan mahal. Oleh karena itu peneliti mencoba menentukan material yang cocok di segala aspek untuk material pemegang stator tersebut.



Gambar 2.3 Struktur Stator YASA BLDC Motor (a) Konstruksi Stator Dari Sisi Depan (b) Konstruksi Stator dari Sisi Samping

Pengaruh pemegang stator juga diteliti pada motor listrik radial seperti disebutkan dalam laporannya bahwa dapat meningkatkan performa dari motor listrik tersebut [3] [4].

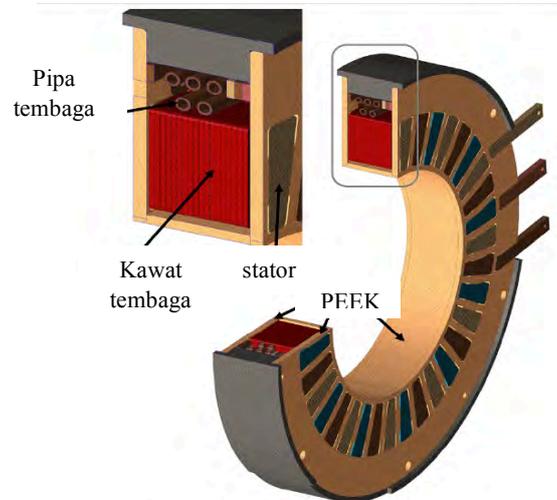
2.1 Kajian Penelitian Terkait

Penelitian mengenai YASA BLDC motor sudah banyak dilakukan. Akan tetapi pembahasan mengenai pemegang stator itu sendiri belum ada yang melakukan untuk tipe motor listrik YASA BLDC. Sehingga berikut pengumpulan data yang mendukung dari penelitian sebelumnya yang dapat mendasari penelitian ini.

2.1.1 Perkembangan Motor Listrik YASA

Dalam penelitian ini disebutkan bahwa desain mekanik dan Analisis YASA yang terdiri dari perpaduan 1 stator dengan 2 rotor dibagian luar. Disebutkan bahwa motor listrik ini memiliki kerapatan torsi yang tinggi dan

efisiensi yang tinggi dengan konstruksi mekanik yang cukup menantang karena untuk perakitannya dibutuhkan komponen yang baik yang mana dapat mendisipasi suhu dengan baik juga.



Gambar 2.4 Struktur Stator YASA BLDC Motor Dipotong Secara Axial

Dari penelitian tersebut diketahui bahwa material pemegang stator harus memiliki struktur yang kuat dan tidak mudah terdeformasi saat suhu operasi. PEEK atau istilah pemegang stator yang digunakan dalam paper tersebut harus tidak memiliki pengaruh elektik yang kuat namun dalam prosesnya memiliki proses manufaktur yang sulit dan mahal.

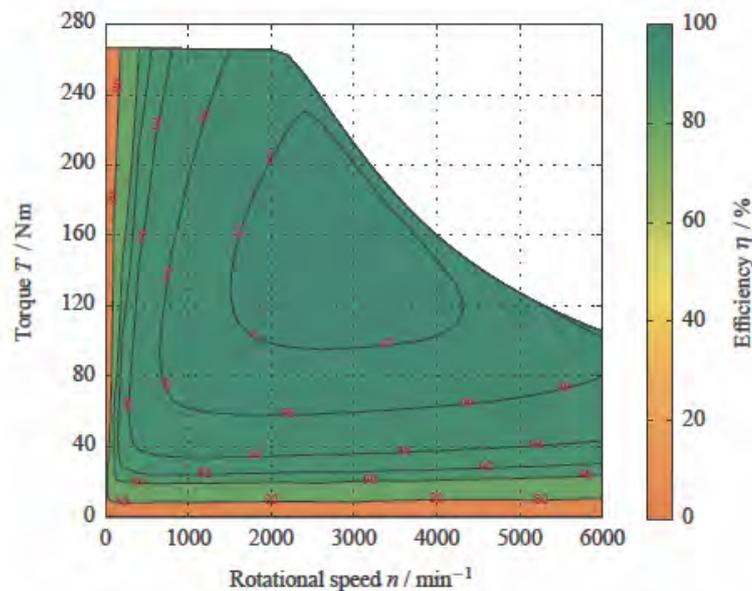
Oleh sebab itu diperlukan penelitian yang lebih lanjut mengenai pemegang stator dengan material mekanik yang kuat serta efek elektrimagnetik yang kecil sehingga dalam suhu operasi tidak mudah terdeformasi.

2.1.2 Material SMC pada Motor Listrik Traksi

Dalam penelitian ini disebutkan bahwa material pembentuk stator dengan aplikasi dari soft magnetic composite atau SMC pada motor listrik telah diteliti dengan fundamental properti yang terukur dan dibandingkan dengan banyak specimen untuk mengetahui material yang terbaik yang dapat digunakan. Dalam penelitian ini motor listrik terbagi menjadi 2 jenis yakni *Permanent Magnet Excited Axial Flux Machine With Internal Segmented Armature* (PMAFSM-ISA) dan *Permanent Magnet Excited Transverse Flux Machine With Claw Poles*

(PMTFM-CP) yang telah di desain sesuai dengan material yang mana digunakan dan ada di industri manufaktur.

Dalam perbandingannya permeabilitas dari SMC lebih rendah dibandingkan dengan besi laminasi sehingga memiliki kurva hysteresis yang lebih tinggi dan eddy current loses yang rendah. Dari hal itu dapat diketahui bahwa penggunaan SMC dalam material ststor dapat menaikkan performa dari motor listrik itu sendiri baik dalam permodelan simulasi hingga prototipe. Bentuk dari ISA yang telah diteliti juga diyakini memberikan efek yang bak terhadap industri dalam pembuatannya. Karena fungsi geometris dari ISA atau dalam penelitian selanjutnya disebut dengan YASA sangat kompetitif dan menjadi sangat menarik untuk penelitian selanjutnya dalam desain material dan konstruksi mekaniknya.



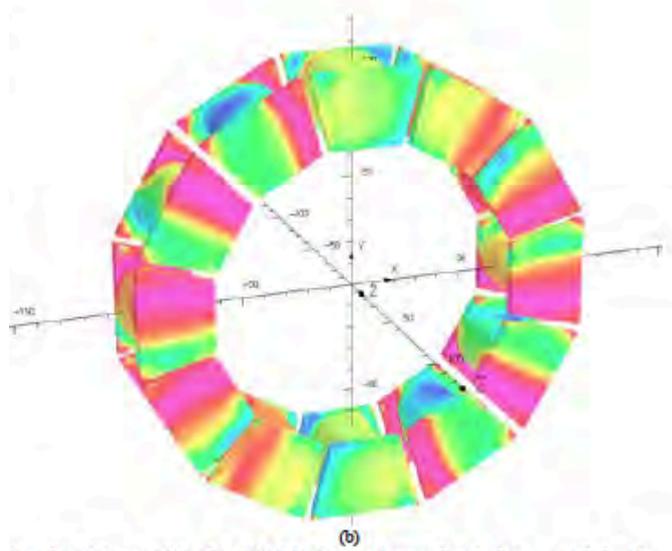
Gambar 2.5 Diagram Effisiensi Motor Listrik

Dalam Gambar 2.5 menunjukkan nilai kekuatan putaran pada motor yang disebut dengan torsi (*torque*) dan kecepatan putaran setiap menit (*Rotational speed*) sehingga permodelan hingga pembuatan yang dilakukan dalam penelitian ini diketahui memiliki banyak celah dalam bidang penelitian selanjutnya seperti Material pemegang rotor dan konstruksi stator yang kuat dan memiliki nilai histerisis yang kuat. Sehingga dalam penelitian saya melakukan konfigurasi material yang tepat untuk konstruksi mekanik pada stator. [3]

2.1.3 Analisis Motor YASA

Penelitian ini mempresentasikan tipe baru dari motor yaitu YASA. YASA tidak memiliki pemegang stator, faktor yang tinggi dan kumparan yang pendek untuk meningkatkan torsi dan efisiensi mesin itu sendiri. Hal tersebut sangat diperlukan dalam kendaraan khususnya sport car. Ada yang mengklaim bahwa penggunaan motor listrik YASA telah diproduksi untuk kendaraan balap.

Stator yang bercelah yang telah dibuat menggunakan serbuk besi atau SMC dapat digunakan hingga frekuensi 300Hz yang mana hal itu meringankan hingga 20% torsi density dibandingkan dengan motor listrik axial lainnya. Namun dalam permodelannya dengan FEA, struktur dari YASA digunakan komponen inti saja tanpa pengaruh mekanik dan elektromagnetik komponen lainnya seperti pemegang stator seperti pada gambar berikut ini.



Gambar 2.6 Persebaran Flux Pada Simulasi FEA

2.2 Teori Dasar

Motor listrik sudah menjadi kebutuhan kita sehari-hari untuk menggerakkan peralatan dan mesin yang membantu pekerjaan. Untuk memutar baling-baling pada kipas angin, digunakan motor listrik. Demikian juga, motor listrik digunakan pada peralatan rumah tangga lainnya seperti: pengering rambut, pompa air, mesin cuci, mesin jahit, bor listrik, penggerak mobil, konveyor dan alat berat lainnya.

2.2.1 Motor Listrik BLDC

Mesin-mesin pertanian terutama mesin pengolahan hasil pertanian dan mesin-mesin di industri pun banyak yang menggunakan tenaga putarnya dari motor listrik. Pada motor bakar, motor listrik digunakan sebagai motor penyalan. Pada traktor pertanian, motor listrik digunakan pada motor penyalan dan pembersih kaca mobil. Penggunaan motor listrik ini semakin berkembang karena memiliki keunggulan dibandingkan motor bakar, misalnya:

- a. kebisingan dan getaran lebih rendah.
- b. kecepatan putaran motor bisa diatur.
- c. lebih bersih.
- d. lebih kompak.
- e. hemat dalam pemeliharaan.

Motor arus searah adalah sebuah motor yang membutuhkan tegangan DC untuk menjalankannya. Pada umumnya motor jenis ini menggunakan sikat dan mengoperasikannya sangat mudah tinggal dihubungkan dengan baterai sehingga motor langsung berputar. Jenis motor ini memerlukan perawatan pada sikatnya serta banyak terjadi rugi tegangan pada sikat. Sehingga pada era sekarang ini motor DC dikembangkan tanpa menggunakan sikat yang dikenal dengan Motor *Brushless Direct Current Motor* (BLDC). Motor ini dipilih karena efisiensi yang tinggi, suaranya halus, ukuran kompak, keandalan yang tinggi dan perawatan yang rendah. Karakteristik dan keistimewaan dari desain arah magnet axial BLDC antara lain:

- a. Dengan power yang sama arah magnet axial BLDC memiliki berat yang lebih ringan dibandingkan dengan yang radial BLDC.
- b. Fluks magnet yang dihasilkan memiliki arah aksial terhadap sumbu mesin sehingga gaya yang diterima bantalan motor lebih minim sehingga waktu operasi bantalan lebih panjang.
- c. Dengan sistem join paralel seharusnya sanggup menghasilkan daya yang besar dengan dimensi motor yang lebih kecil.

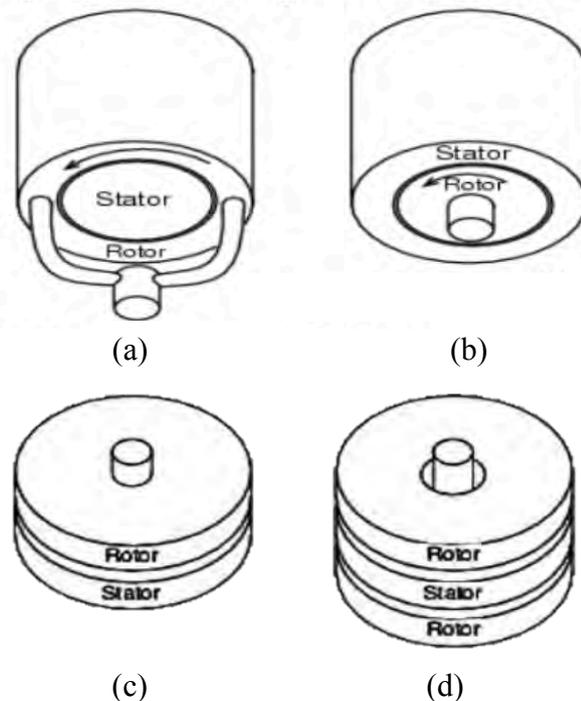
- d. Field medan magnet lebih besar sehingga torsi yang dihasilkan lebih besar dibanding motor dc yang lain dengan daya yang sama.

2.2.2 Konstruksi Motor Listrik BLDC YASA

Motor listrik pertama kali dibuat dengan model arah magnet axial yang ditemukan oleh Faraday pada tahun 1821 dan motor dengan permanen magnet pada tahun 1984. sedangkan untuk motor radial fluks diciptakan yang kemudian dipatenkan pertamakali oleh Davenport pada tahun 1837 dan langsung mendominasi pasar motor listrik karena industri lebih mudah dalam produksi pada saat itu dan untuk arah magnet axial digunakan untuk kendaraan listrik dengan aplikasi torsi tinggi yang terintegrasi. Beberapa konfigurasi motor arah magnet axial dan radial fluks yang paling umum seperti ditunjukkan pada Gambar 2.6 yang memiliki 2 bagian utama yaitu stator dan rotor. Bentuk konstruksi motor DC *brushless* ada dua buah yaitu silindris atau bertumpuk seperti pada Gambar 2.6 Kebanyakan konstruksi motor BLDC adalah silindris, dan yang paling banyak dipakai adalah tipe rotor dalam. Jenis ini digunakan pada penggerak disket komputer. Jenis yang kedua adalah rotor diletakkan pada sisi luar sekeliling stator, tipe ini disebut rotor luar.

Konstruksi silindris akan terlihat pendek dan tebal. Oleh karena itu arah medan magnetik radial terhadap sumbu putarnya. Motor jenis bertumpuk dengan dua buah stator mempunyai torsi tinggi karena mempunyai belitan stator pada kedua sisi rotor (Gambar c dan d). Sedangkan torsi rendah dengan satu stator dan satu rotor (Gambar a dan b) digunakan pada motor penggerak alat rumah tangga. dalam hal ini Motor arah magnet axial BLDC dikenal juga dengan mesin *Disc* (cakram), dengan bentuknya yang padat dan kerapatan dayanya yang tinggi. Motor arah magnet axial BLDC banyak digunakan untuk aplikasi kendaraan listrik, pompa, kipas angin, kontrol katup, sentrifugal, peralatan mesin, robot dan peralatan industri. Selain itu, rotor berdiameter besar dengan momen inersia yang tinggi dapat dimanfaatkan sebagai roda terbang. Pada dasarnya arah magnet axial BLDC akan membangkitkan bentuk gelombang EMF berbentuk trapesoidal, dengan bentuk gelombang arus input kotak.

Karena mempunyai kinerja yang bagus dan torsi yang besar serta keandalan dan efisiensi yang tinggi [4],[5], motor BLDC sangat banyak digunakan dalam berbagai macam aplikasi, seperti pada kendaraan listrik. Berdasarkan dari sebuah studi, disebutkan bahwa motor BLDC merupakan jenis motor yang mempunyai efisiensi paling tinggi dibandingkan dengan jenis motor yang lain [6]. Pada prinsipnya, motor BLDC sama halnya dengan motor DC biasa, namun perbedaan utamanya adalah motor BLDC dioperasikan tanpa sikat, sehingga tidak ada gesekan yang ditimbulkan antara sikat dengan rotor. Oleh sebab itu motor BLDC mempunyai nilai efisiensi yang sangat tinggi. Selain itu, penggunaan sikat pada motor DC biasa akan menyebabkan gesekan dengan rotor, sehingga selain menyebabkan berkurang nilai efisiensi motor, lama kelamaan sikat akan mengalami aus, dan inilah yang menyebabkan biaya perawatan pada motor DC sangat mahal. Berbeda dengan motor BLDC yang biaya perawatannya murah karena tidak mempunyai sikat. Sehingga dikatakan dalam sebuah studi bahwa motor BLDC merupakan motor yang paling cocok digunakan untuk aplikasi kendaraan listrik [4],[5].



Gambar 2.7 Konstruksi Motor (a) Silindris Rotor Dalam (b) Silindris Rotor Luar (c)Stator Tunggal Bertumpuk (d) Stator Ganda Bertumpuk

Motor arah magnet axial BLDC dirancang untuk dapat mengalirkan flux secara axial. Dalam aplikasi mobil listrik penggunaan konstruksi secara axial diperlukan untuk memaksimalkan ruang pada kendaraan sehingga lebih terisi secara maksimal. Terdapat beberapa jenis konstruksi yang biasa digunakan dalam konstruksi motor arah magnet axial BLDC, satu sisi atau sisi yang mana hanya ada 1 rotor dan 1 stator (*single side*) merupakan konstruksi yang paling sederhana dari arah magnet axial motor karena hanya melibatkan 1 stator dan 1 rotor. Yang kedua ialah sisi ganda yang mana tersusun dari posisi yang terhimpit antara stator-rotor-stator atau rotor-stator-rotor, dalam pengembangannya sisi dobel juga memiliki detail konfigurasi yang berbeda dalam peletakan magnet permanennya. Sisi ganda ini juga sering disebut dengan struktur bertingkat. Di berbagai literatur, sisi ganda dengan stator yang terletak ditengah atau terhimpit atau struktur bertingkat disebut juga dengan YASA. Sedangkan struktur yang ke 3 yaitu struktur bertingkat banyak susunan rotor dan stator yang disusun berlapis. Terdapat rotor tunggal dan rotor ganda sebagai varian dari konstruksi yang dapat diciptakan. Dalam penelitian ini akan digunakan rotor ganda yang mana stator diletakkan diantara rotor dengan slot kumparan yang digulungkan di inti besi dari stator yang terbuat dari serbuk besi dengan kerugian adanya kerugian mekanik (*cogging*) yang cukup besar namun dapat terdisipasi oleh adanya gaya magnet yang ditimbulkan oleh inti besi yang terbuat dari serbuk yang dipadatkan dan terlaminasi walaupun dengan celah udara yang harus diatur sedemikian rupa menurut Hendrik vasompel.

Bentuk motor paling umum digunakan ditunjukkan pada Gambar 2.6 (c) karena mudah dalam pergerakannya dan dalam perawatan posisi ini membuat mudah dalam pembuatan dibandingkan konstruksi lainnya. jenis ini biasa disebut dengan "torus" yang dikenalkan pada tahun 2001 oleh grup huang. fase toroidal yang dikenalkan memiliki gulungan yang pendek dengan efisiensi yang lebih tinggi. Dalam perkembangannya konstruksi motor listrik terutama pada stator sangat berpengaruh pada material yang digunakan dan akan dibahas pada subbab selanjutnya.

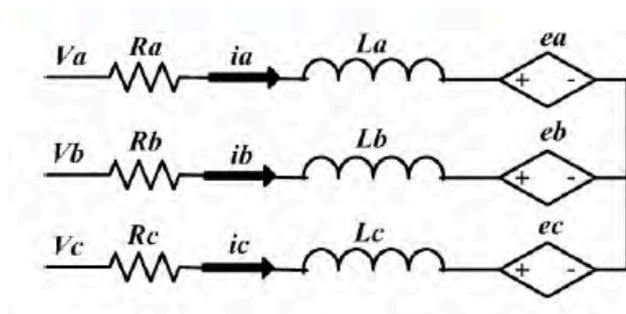
2.2.3 Konstruksi Motor Listrik BLDC YASA

Konstruksi dari motor listrik YASA BLDC ini Seperti pada Gambar 2.8 di bawah merupakan topologi yang cukup menarik karena memiliki torsi yang tinggi serta kumparan yang terpusat dan dengan penggunaan SMC pada bagian inti stator dapat mengurangi berat dan rugi elektrik besi yang ditimbulkan oleh material selain SMC. Konstruksi YASA memiliki 2 rotor bagian luar dengan penggunaan magnet permanen yang terdiri dari pemegang dan permanen magnet. Dalam penelitian kali ini menggunakan konfigurasi simetris perbandingan kumparan stator dan magnet permanen yang akan digunakan sesuai.



Gambar 2.8 Konstruksi Motor YASA BLDC Motor Dengan Stator di Tengah Dan 2 Magnet di Setiap Sisi [1]

Motor listrik YASA BLDC memiliki permodelan matematik yang sama dengan motor BLDC lainnya seperti berikut.



Gambar 2.9 Model Elektrik 3 Fasa Pada Sisi Stator Motor Listrik BLDC

Dari konstruksi dan rangkaian ekivalen tersebut diketahui bahwa motor listrik BLDC memiliki 2 komponen atau bagian inti yakni bagian stator dan rotor.

$$V_f = r_f i_f + \frac{d\lambda_f}{dt} \quad (1)$$

$$V_s = R_i + L \frac{di}{dt} + e \quad (2)$$

$$T_e = \beta \omega_m + J \frac{d\omega_m}{dt} + T_l \quad (3)$$

Dalam persamaan tersebut dapat diketahui bahwa :

$$V_f = V_s = \text{tegangan sumber}$$

$$r_f i_f = \text{resistansi yang dialiri arus pada kumparan dari sumber DC}$$

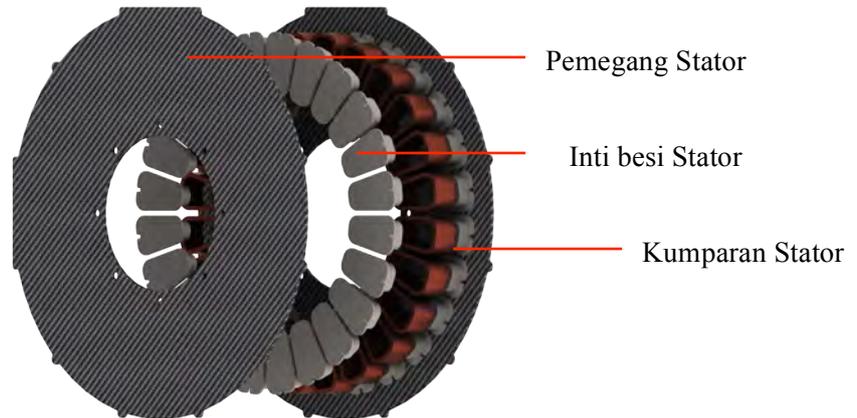
$$T_e = T_l = \text{torsi elektrik dan mekanik}$$

$$\beta, \omega_m, J = \text{konstanta gesekan, inersia dan kecepatan angular motor}$$

2.2.3.1 Konstruksi Stator pada Motor Listrik BLDC YASA

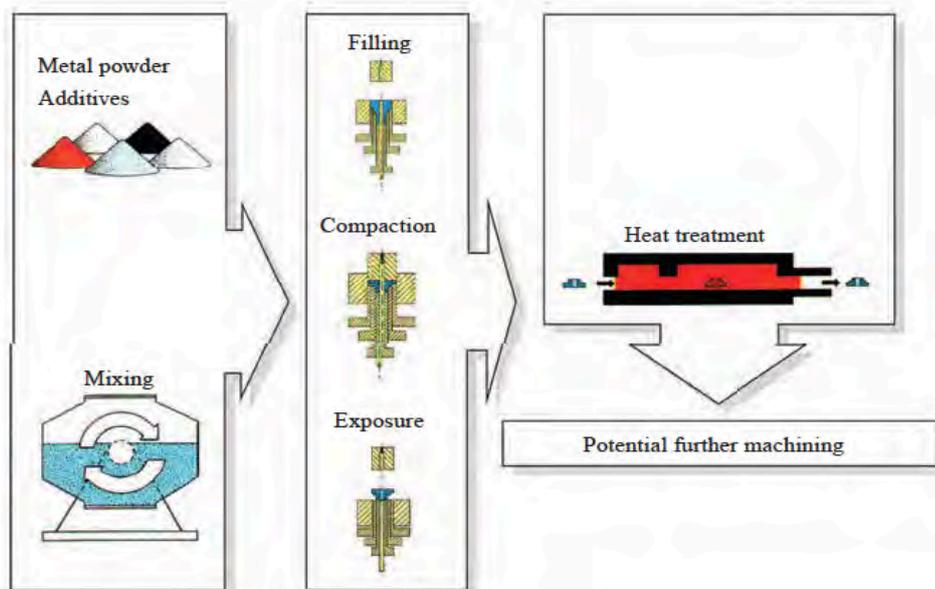
Stator merupakan komponen utama dalam sebuah motor listrik dalam sisi mekanik maupun elektromagnetik. Agar motor dapat berputar maka diperlukan kumparan yang membelit suatu inti besi yang mana harus memiliki nilai hysteresis yang baik agar tidak menghasilkan kerugian ggl. Dalam hal ini rugi-rugi yang sangat dihindari ialah panas, karena jika suatu motor listrik memiliki suhu diatas batasan normal suatu mesin penggerak maka energi yang dihasilkan akan memiliki banyak ruginya.

Dalam penelitian ini menggunakan bahan atau material inti stator dari serbuk besi yang dibentuk dari proses sintering dingin dan biasa disebut dengan *Soft Magnetic Composite* (SMC). SMC banyak digunakan dalam pembuatan motor listrik YASA karena nilai hysteresis yang baik dan dapat mendisipasi panas dengan lebih baik dari pada besi berlaminasi karena partikel yang dimiliki dari setiap serbuk besinya akan memiliki lapisan atau laminasi masing-masing sehingga menyebabkan lompatan elektron yang semakin banyak dan membuat arus eddy lebih efektif.



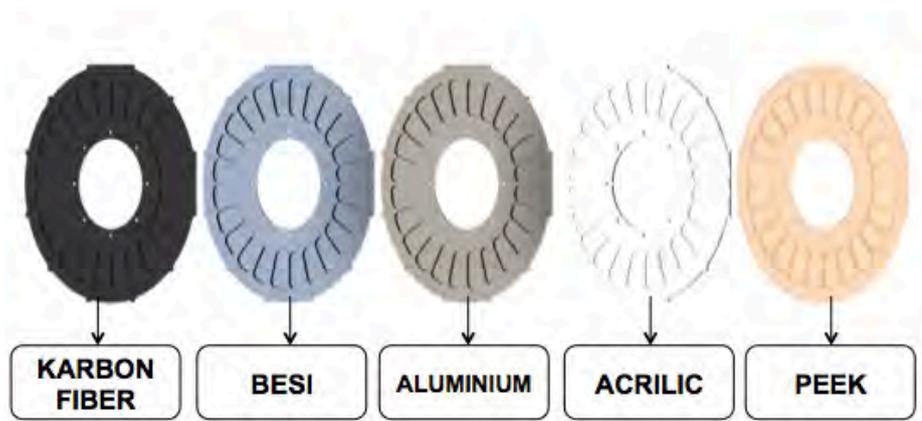
Gambar 2.10 Struktur Stator Motor Listrik BLDC YASA.

Pemilihan material inti stator yang baik sudah dilakukan peneliti lain dan telah membahas bahwa penggunaan SMC dinilai paling efektif karena material itu sendiri sudah merupakan material unggul dan dapat berlaminasi di setiap partikelnya yang terdiri dari berbagai material besi aditif yang digabungkan sehingga lapisan yang terbentuk akan sangat tipis namun kuat.



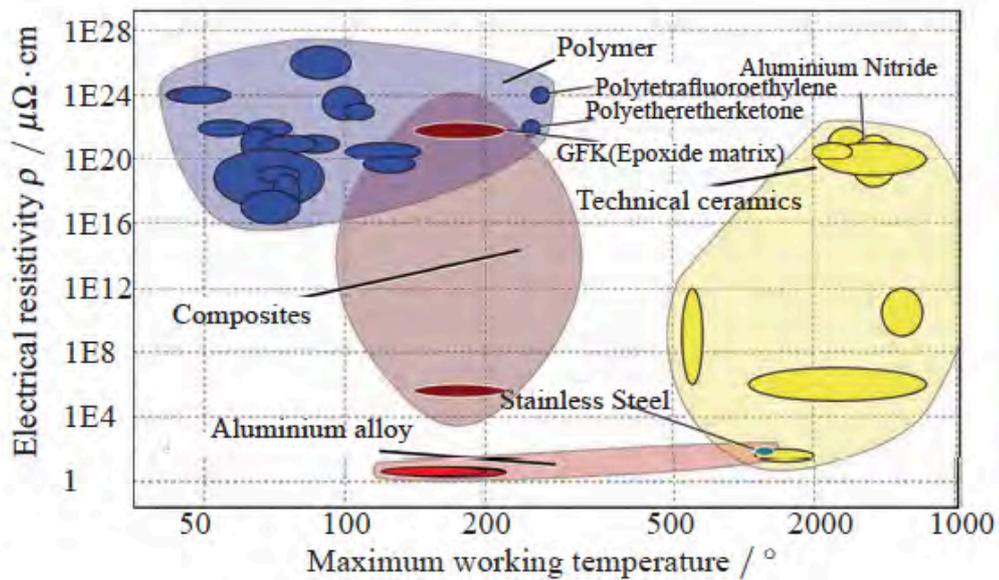
Gambar 2.11 Proses Pembuatan Material Inti Stator Dengan Material SMC

Serbuk besi aditif yang memiliki banyak jenis atau (*metal powder aditives*) dicampur menjadi satu yang kemudian dilakukan proses pengisian (*filling*), pemadatan (*compaction*) dan pembentukan (*exposure*) untuk memadatkan inti besi stator dan di panaskan untuk memnyempurnakan campuran. Selain inti stator yang baik, suatu stator juga dililiti oleh suatu kawat tembaga dengan konfigurasi 3 fasa dan memiliki nilai resistansi tertentu untuk memperoleh power sesuai dengan yang diinginkan pada dasain awal. Dalam penelitian ini penulis menggunakan kawat tembaga dengan bentuk kotak untuk menjaga ritme dan kerapian produk yang dihasilkan nantinya. Selain dari 2 komponen utama tersebut, ada sebuah komponen pembentuk stator yang tidak kalah pentik dalam penyusunan stator itu sendiri di sisi mekanik namun akan mempengaruhi sisi elektriknya dan performa suatu motor listrik jika penggunaannya tidak diperhatikan yakni pemegang stator. Pemegang stator dikatakan merupakan komponen inti karena berhubungan langsung dengan permukaan inti stator yang mana menghasilkan panas yang sangat luar biasa. Pemegang stator harus memiliki nilai risitansi yang baik dan dapat medisipasi panas dengan cepat agar tidak mempengaruhi performa dari motor listrik itu sendiri. Pemilihan material pembentuk pemegang stator dapat bermacam-macam sesuai dengan keberadaan material itu sendiri di dunia. Dasar material pembentuk stator dapat dibedakan atau diklasifikasikan sesuai dengan kekuatan yang tinggi, kelembaman yang baik serta nilai hysteresis yang cukup agar sesuai dan tidak mempengaruhi performa motor listrik.



Gambar 2.12 Material Pemegang Stator

Material yang digunakan dalam penelitian ini ialah epoxy resin, besi, aluminium, acrylic, dan carbon fiber. Penggunaan material tersebut berdasarkan kurva material yang disebutkan di penelitian sebelumnya [3] dan merupakan nilai resistivitasnya dengan suhu kerja yang direkomendasikan dalam penentuan material pemegang stator.



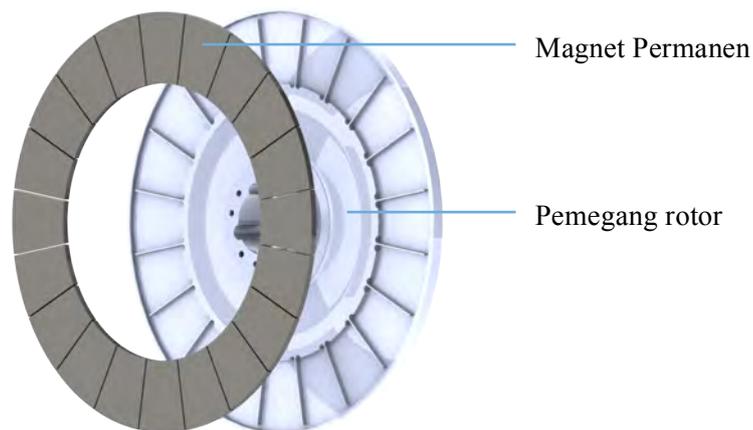
Gambar 2.13 Nilai Permeabiliti Dengan Suhu Kerjanya

Dalam Gambar 2.13 dapat diketahui bahwa material yang bekerja pada suhu tertentu (*maximum working temperature*) dan dengan kekuatan material yang baik secara elektrik (*electrical resistivity*) merupakan material yang dipilih dalam penelitian ini. Penelitian ini berfokus pada penggunaan material pemegang stator yang dapat menggantikan material yang sudah ada yakni PEEK yang memiliki harga yang mahal dibandingkan dan sulit dalam proses fabrikasi. Aluminium lunak (*Aluminium alloy*), besi stenles (*stainless stell*), dan alumunium cair (*Alumunium nitride*) yang berada dalam kelas keras dengan warna kuning pada tabel. Sedangankan pada kelas komposit (*composites*), baha keramik pendingin seperti yang biasa di gunakan untuk pembuatan komponen elektrik reistor (*Technical ceramics*), Sehingga yang berada dalam kelas polimer (*polymer*) yang memiliki suhu sesuai dengan kekuatan yang cukup (*Epoxyde*

matrix) (*Polytetrafluoroethylene*), serta PEEK. Sehingga yang masuk dalam wilayah kerja memiliki resistifitas elektrik yang baik yakni komposit dan aluminium. Dalam bidang kerja yang dipilih bukan hanya mengenai struktur dari material itu sendiri namun juga ketahanan terhadap suhu (*temperature*) saat motor listrik dijalankan.

2.2.3.2 Konstruksi Rotor Motor Listrik BLDC YASA

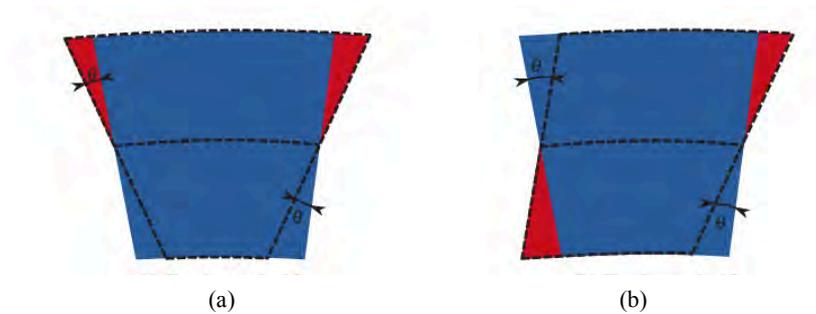
Rotor merupakan bagian yang bergerak dari suatu motor listrik. Rotor dibedakan menjadi 2 jenis yakni dengan kumparan dan tanpa kumparan. Penggunaan rotor tanpa kumparan digantikan dengan penggunaan magnet. Magnet yang digunakan bermacam-macam sesuai dengan spesifikasi motor listrik yang akan digunakan atau diteliti. Dalam penelitian ini penulis menggunakan magnet permanen. Magnet permanen dinilai efektif karena dengan penggunaan magnet permanen dalam YASA motor ini dapat meningkatkan performa motor listrik.



Gambar 2.14 Konstruksi Rotor Dari YASA BLDC Motor

Konstruksi rotor pada motor listrik YASA ini digunakan pada sisi luar dari stator sehingga membentuk konstruksi bertumpuk. Konstruksi rotor ini sangat efektif karena luasannya yang ramping sehingga jika nantinya akan ditambahkan stack motor untuk menambah performa akan sangat mudah dilakukan. Selain itu

magnet permanen juga memiliki pemegang atau pemegang rotor yang sebaiknya memiliki nilai histerisis yang kuat saat charge dan lemah saat discharge agar dapat menahan pengaruh magnet permanen ke arah luar. Penyusunan magnet juga sangat berpengaruh terhadap cogging nantinya. Pengaruh cogging dapat dikurangi dengan metode pembelokkan arah medan magnet (*skewing*) seperti pada gambar berikut.



Gambar 2.15 Skewing Magnet Permanen (a) Model 1 (b) Model 2

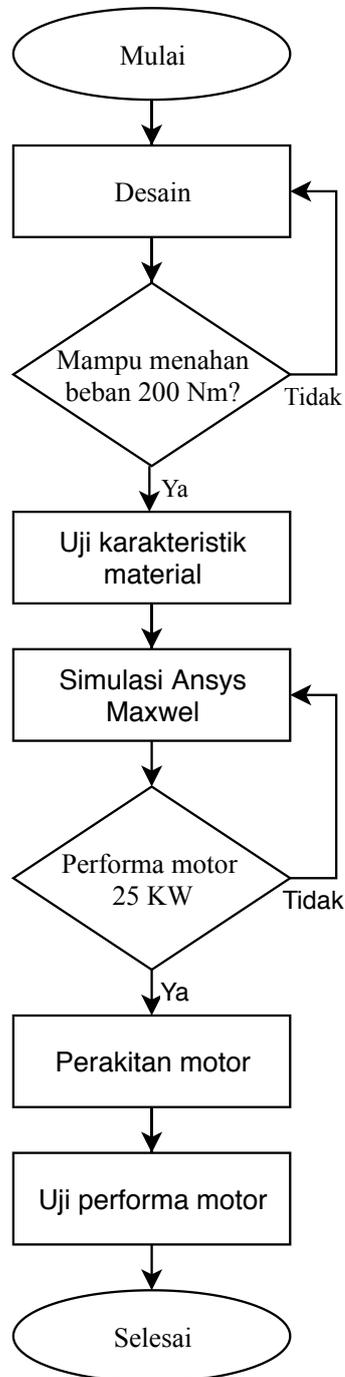
Skewing yang dilakukan antara model 1 dan model 2 memiliki sudut kemiringan yang sebenarnya sama. Namun dalam penggunaannya di rotor yang berbidang lingkaran model 1 lebih mudah diaplikasikan karena sudut magnet permanen sisa antar magnetnya sangat kecil dan dapat mengurangi pergerakan motor yang tidak stabil (*cogging*) [9].

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

METODE PENELITIAN

Metodologi penelitian yang akan dilakukan sesuai dengan flowcahat di bawah ini dan akan dijelaskan pada sub bab selanjutnya.



Gambar 3.1 Flowchart Metodologi Penelitian

3.1 Studi Topologi YASA Motor

Penelitian ini dilakukan dengan awalan pengumpulan data literatur yang mana sangat menentukan dalam mencari celah penelitian di dunia ini. Penentuan topologi YASA ini juga ditentukan dari berbagai literatur yang masih minim sehingga berpotensi untuk dilakukan suatu penelitian di bidang ini. Pemilihan topologi YASA juga didasarkan pada penelitian yang sedang berlangsung di Pusat Unggulan Iptek (PUI) sistem dan kontrol otomotif di ITS sehingga dengan selarasnya pengambilan tema dengan topologi YASA ini dapat mendukung perkembangan teknologi yang sedang dikembangkan. YASA motor yang telah diteliti juga ternyata mempunyai banyak permasalahan yang belum banyak diselesaikan bahkan dalam sisi penelitian yang dapat diaplikasikan ke produk. Selain itu penggunaan topologi YASA juga dilakukan karena dalam perkembangannya nanti akan banyak digunakan dalam aplikasi kendaraan listrik mulai dari kendaraan listrik kecil dengan kecepatan rendah hingga kecepatan tinggi.

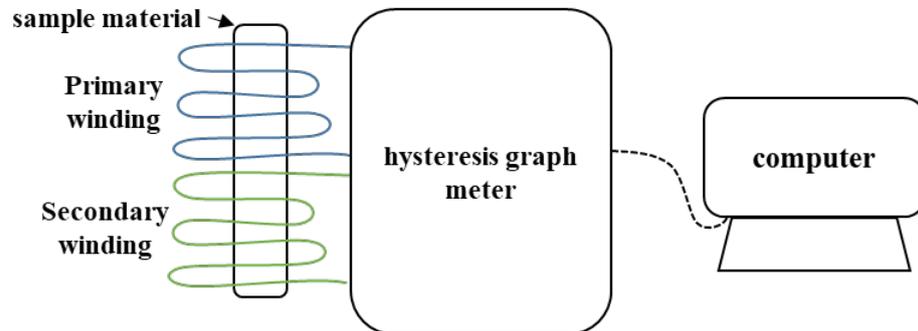
3.2 Pengambilan Data Material

Pengambilan data material dilakukan untuk mengetahui material yang baik untuk penutup stator karena dalam penelitian ini berfokus pada material dengan nilai histerisis yang baik. Pengambilan data dilakukan dengan cara membuat permodelan masing-masing material dengan bentuk torus sesuai spesifikasi alat pengukur magnetisasi medan magnet (*hysteresis graph meter*) yang dimiliki seperti gambar berikut.



Gambar 3.2 Bentuk material yang bisa di uji pada alat uji histerisis

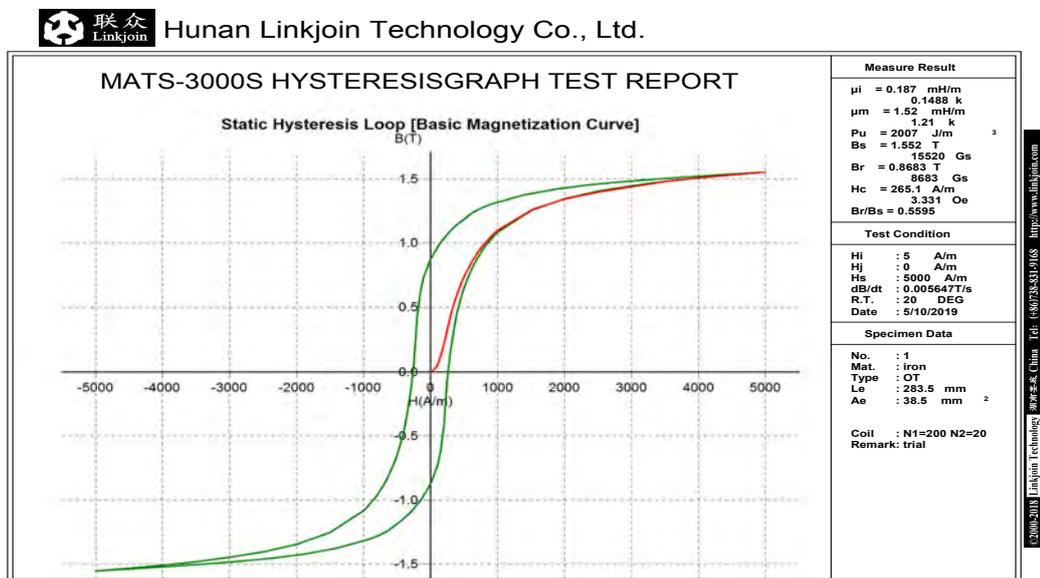
Pengambilan data yang dilakukan untuk mengetahui nilai medan magnet dalam material dan nilai arus berbanding dengan luasan yang diuji.



Gambar 3.3 Metode Pengujian Pada Grafik Histerisis Meter

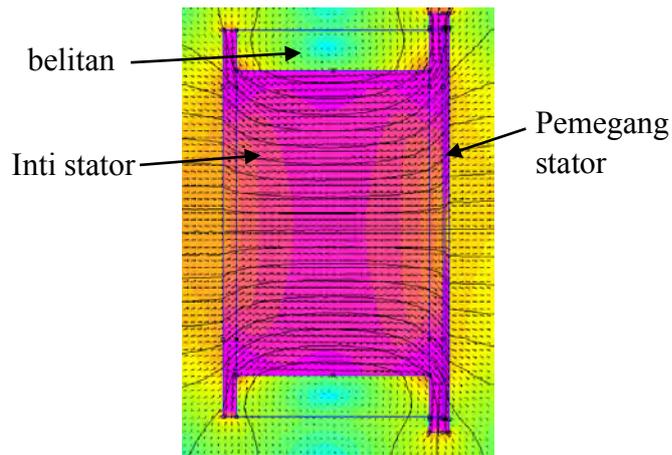
3.3 Simulasi Model

Dari pengujian yang dilakukan dapat diketahui data histerisis seperti Gambar 3.4 kurva magnetisasi berikut.



Gambar 3.4 Hasil Pengujian Histerisis Pada Material Contoh

Dari data tersebut kemudian dimasukkan ke parameter dalam simulasi FEMM dengan hasil keluaran persebaran fluks dengan analisis sebagai berikut.



Gambar 3.5 Permodelan Pada Software FEMM

Permodelan tersebut yang kemudian akan disimulasikan di ansis maxwel guna memperoleh hasil performa motor listrik YASA BLDC sebelum dilakukan fabrikasi.

3.4 Pembuatan Prototipe

Pembuatan prototipe dilakukan jika sudah menemukan hasil dari permodelan dengan pemilihan material yang sesuai. Pembuatan prototipe dilakukan dengan menggunakan material dari contoh yang diteliti untuk membandingkan hasil dari permodelan dengan hasil fabrikasi.

3.5 Pengujian Prototipe

Pengujian dilakukan di gedung riset mobil listrik ITS dengan alat uji dinamometer untuk mengetahui performa dari motor listrik YASA BLDC yang dibuat berdasarkan hasil permodelan sebelumnya. Dalam hasil akhir ini diharapkan hasil uji performa memiliki nilai yang sama atau tidak berbeda jauh dari perhitungan dan permodelan yang dilakukan sebelumnya.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dilakukan pembahasan mengenai bagaimana proses pengujian dari simulasi hingga pengujian performa. pengujian terhadap motor dilakukan dengan melakukan 2 tahapan pengujian. Yang pertama merupakan pengujian komponen dari motor listrik BLDC seperti besarnya medan elektromagnetik yang ditimbulkan dari magnet permanen maupun gaya yang timbul pada kumparan stator. sedangkan pengujian yang ke dua meliputi pengujian keseluruhan dari motor yang telah tersusun dan diketahui performanya dengan melakukan beberapa tes yang akan dijelaskan pada sub bab berikut

4.1 Simulasi Mekanik

Penelitian dilakukan dengan menggunakan dua metode simulasi dan perakitan model hasil simulasi. Dalam penelitian ini peneliti fokus terhadap pengaruh yang ditimbulkan pada pemegang stator. Pemegang stator disimulasikan menggunakan hysteresis graph untuk mengetahui nilai elektrifikasinya. Dalam pembuatan atau pemilihan material yang digunakan ada lima yakni alumunium, besi, plastik, serat karbon dan epoxy resin. Simulasi dilakukan dengan menggunakan ketebalan yang divariasi untuk mencapai titik terkuat untuk digunakan sebagai pemegang stator. Faktor kekuatan tidak hanya menjadi fokus dalam penelitian ini. Selain harus kuat, pemegang stator juga harus memiliki dimensi yang sesuai dengan desain motor listrik dengan topologi YASA tersebut. Berikut adalah material yang digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 4.1 Material yang digunakan

Number	Materials
1	Besi 1020
2	Aluminium 7075
3	Serat karbon
4	Plastik
5	Poly Ether Ether Ketone (PEEK)

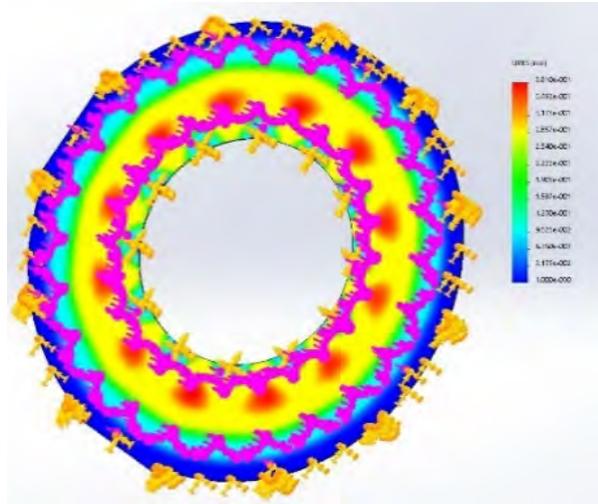
Topologi motor listrik YASA terdiri dari dua rotor dan satu stator dalam. Stator dalam yang digunakan terbuat dari SMC(*soft magnetic componen*) yang mana dalam struktur pembuatannya tidak dapat berdiri sendiri dikarenakan bentuknya yang segmented dan terpecah masing-masing gulungannya yang menyampaikan fluks tiga dimensi. Semua bagian dari stator dan bagiannya dilekatkan oleh dua plat anular yang berbentuk sesuai yang disebut dengan pemegang stator. Simulasi dari ke lima material yang digunakan dapat diaplikasikan pada konstruksi motor listrik. Rincian bahan disajikan pada Tabel 1. Semua bahan disimulasikan pada mekanik dan listrik. Pengekangan ketebalan pelat stator adalah 1,75 mm. Nilai-nilai tersebut direpresentasikan sebagai celah udara antara stator dan rotor. Gaya aksial terdaftar dari 50 N hingga 450 N untuk maksimum. Kertas [8] memperoleh gaya aksial maksimum untuk 400 N, sehingga nilai maksimum untuk 450 N adalah pilihan yang mahir. Lokasi dan posisi stabil terletak pada diameter dalam dan diameter luar. Mesin YASA ini kami rancang sebagai portabel dan dapat digunakan kembali semua suku cadang motor listrik. Gambar 4.1 menunjukkan konstruksi motor listrik YASA BLDC.



Gambar 4.1 Motor listrik YASA

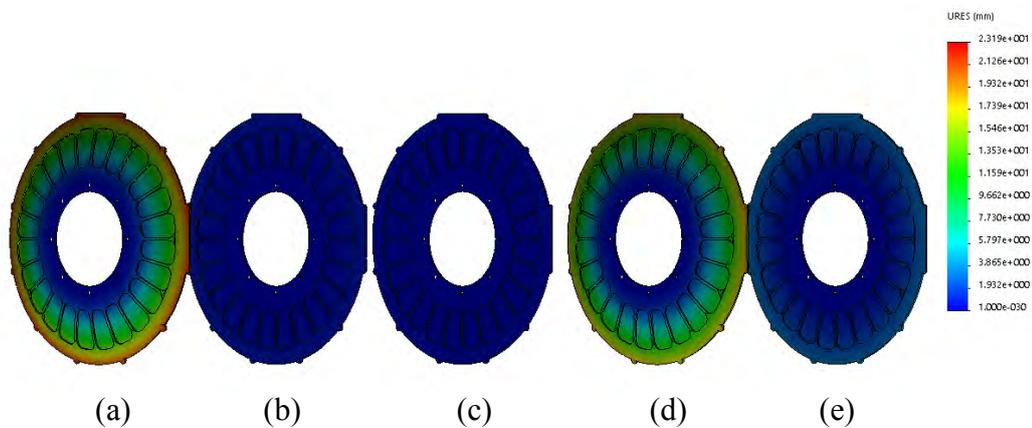
Ada bagian annular di setiap sisi yang digunakan sebagai braket untuk sebagai cangkang dari stator. Struktur ini lebih dapat diandalkan dan fleksibel untuk penelitian karena plat stator dapat diletakkan dan pasang kembali. Di sisi dalam, ada dudukan bantalan yang terdiri dari dua bantalan dan kekuatan maksimum terletak di daerah itu yakni pemegang stator. Pada simulasi kekuatan

material tersebut setelah dilakukan pengulangan dari contoh material yang digunakan dapat diketahui bahwa keefektifan dari ketebalan pemegang stator dapat mengubah konstruksi.



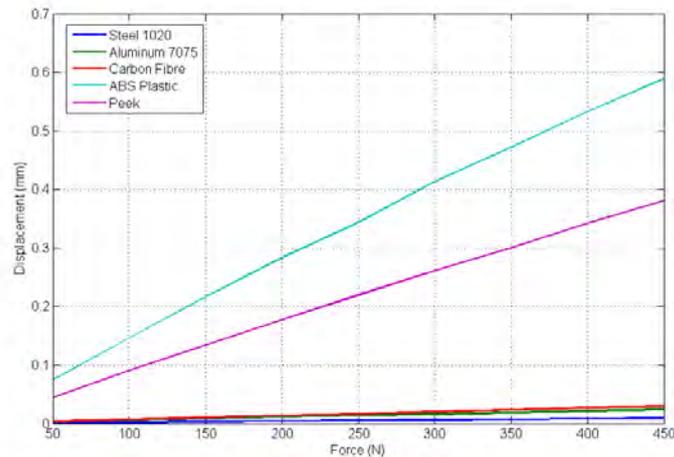
Gambar 4.2 Perubahan struktur pada simulasi mekanik pada material serat karbon

Gambar 4.2 tersebut merepresentasikan dari gaya tekanan yang diberikan pada saat simulasi yang membuat lempeng pemegang stator berubah bentuk di saat tekanan dari bagian dalam mencapai nilai tertentu dan merupakan hasil terbaik dari ke empat material lain yang harus dengan ketebalan yang lebih tebal. Material yang paling baik digunakan adalah serat karbon dengan ketebalan yang sesuai.



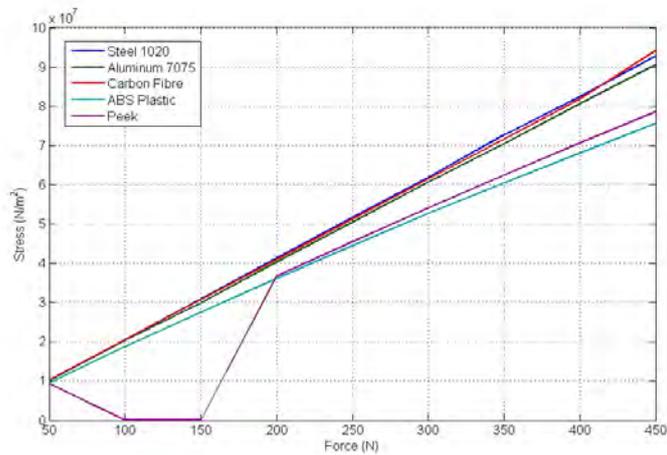
Gambar 4.3 material dalam simulasi perubahan bentuk dengan input tenaga (a) Plastik (b) Besi (c) Alumunium (d) PEEK (e) Serat karbon

Penggambaran efek kekuatan maksimum sebagai pelat stator. Grafik tegangan, deformasi dan regangan tercantum di sepanjang Gambar 4.3 deformasi yang terjadi di bawah sekitar 0,4 mm dan plastik ABS pada 0,6 mm. Di sisi lain, baja, aluminium, dan serat karbon di bawah 0,1 mm untuk deformasi.



Gambar 4.4 grafik perubahan material

Nilai-nilai deformasi tersebut digunakan untuk menentukan bahan pelat stator berdasarkan sisi mekanik. Dalam gambar 4.4 dapat diketahui bahwa material plastik memiliki nilai kelembaman yang tinggi sehingga mudah terdeformasi, peringkat ke 2 yaitu material PEEK. Selain itu, nilai deformasi juga mempengaruhi nilai celah udara dan distribusi torsi. Secara umum, semua kinerja motor listrik YASA juga ditentukan pada kemampuan plat stator. PEEK dalam grafik timbul proses fixasi pada material yang menjadikan bahan ini lembam sementara dan akan mengeras saat mencapai kenaikan suhu tertentu sesuai pada grafik 4.5. Dalam Gambar 4.5 tersebut diketahui bahwa nilai tekanan yang terjadi pada material PEEK berada di nilai yang tidak baik untuk selanjutnya menuju nilai yang baik. Hal ini dikarenakan material PEEK yang lunak sehingga dalam pembebanan awal material tersebut tidak langsung berada pada kapasitas maksimum.



Gambar 4.5 grafik dari tekanan pemegang stator

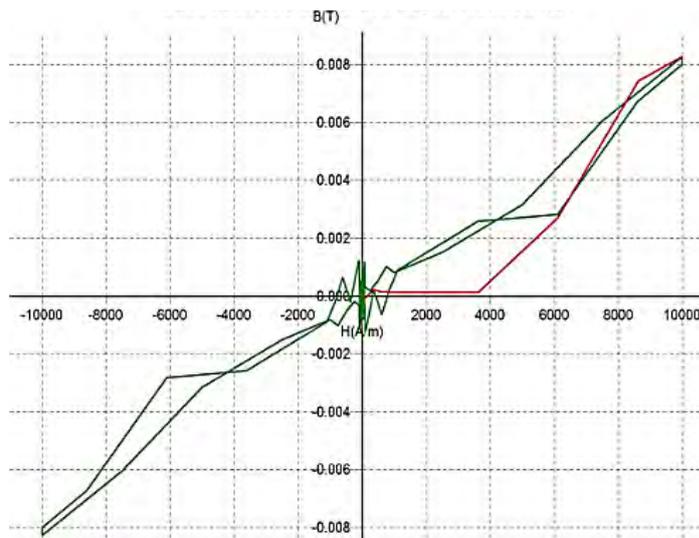
4.2 Simulasi Elektrik

Untuk mendeteksi efek dari menggunakan bahan dudukan plat stator, simulasi motor YASA digunakan dengan mengganti material. Daftar bahan disajikan pada Tabel 1. Efek bahan di sepanjang dudukan plat stator dapat dilihat pada kehilangan inti dan torsi yang dihasilkan. Simulasi yang digunakan adalah Ansys Maxwell. Dalam perangkat lunak, semua spesifikasi material, BH-Cuvre dan kurva permeabilitas, diperlukan secara elektrik. Spesimen masing-masing bahan digunakan untuk pengujian.

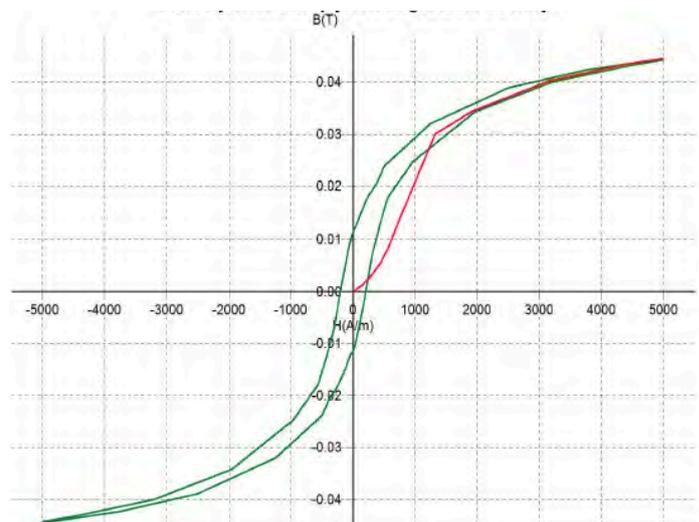


Gambar 4.6 Mesin uji *hysteresis graph meter*

Gambar 4.6 menunjukkan proses pengujian menggunakan mesin grafik histeresis. Bahan spesimen diberi belitan primer dan sekunder sesuai dengan rasio jumlah belitan yang telah ditentukan. Setelah itu, proses magnetisasi dan demagnetisasi akan dimulai. Salah satu hasil pengujian serat karbon ditunjukkan pada Gambar 4.7. Meskipun spesimen material yang digunakan tidak umum digunakan untuk motor listrik, seperti baja silikon dan inti SMC, pengujian harus dilakukan karena data tersebut digunakan sebagai input kelengkapan spesifikasi material dalam simulasi. Oleh karena itu, kurva yang terbentuk tidak dalam kondisi ideal Kurva BH seperti pada gambar 4.7 berikut.

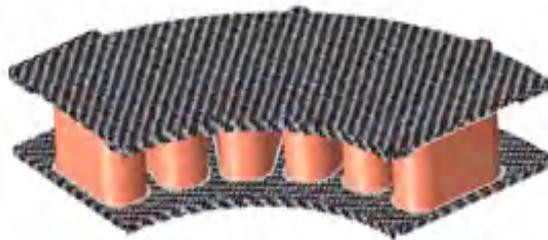


Gambar 4.7 kurva BH dari karbon dengan inti besi biasa



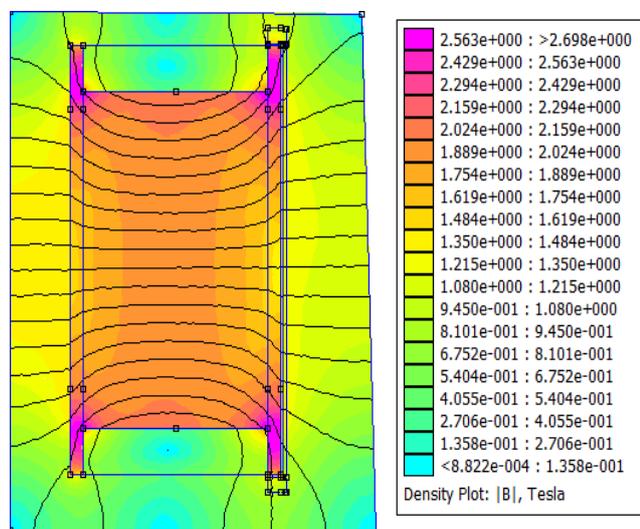
Gambar 4.8 Kurva BH karbon fiber dengan inti SMC

Berdasarkan informasi yang telah diperoleh dari pengujian spesimen, data tersebut digunakan untuk simulasi pada Ansys Maxwell. Pemodelan digunakan untuk mengetahui pengaruh bahan pelat stator pada magnetisasi dan sirkulasi fluks. Stator menggunakan pemodelan stator dan belitan magnet permanen. Antara stator dan magnet permanen, ada plat stator. Plat stator diganti berdasarkan bahan yang telah diperiksa. Gambar 4.9 menunjukkan bagian stator, pelat stator, dan magnet permanen.



Gambar 4.9 stator dan pemegang stator

Selain itu, pelat stator juga mempengaruhi kerugian stator. Gambar 4.9 diatas menunjukkan kerugian pada stator karena pelat stator. Ini menunjukkan bahwa menggunakan bahan besi menghasilkan kerugian terbesar. Padahal, menggunakan PEEK dan serat karbon menghasilkan kerugian dengan nilai yang hampir sama. [9] melakukan penelitian tentang penggunaan serat karbon pada motor PMSM dengan efek meningkatkan kinerja.



Gambar 4.10 persebaran magnetisasi pada inti stator dengan karbon fiber sebagai pemegang

4.3 Perakitan dan Uji Performa

Prototipe ini dibuat dengan desain yang sederhana dan dapat mendukung proses pembuatan dan pemasangan sehingga biaya yang dikeluarkan untuk penelitian tidak terlalu besar. Setiap dinding inti SMC menggunakan kawat berenamel dan insulasi berlapis untuk menjaga keandalan nilai insulasi seperti pada gambar 4.11 berikut.



Gambar 4.11 Inti SMC dengan belitan kawat tembaga

Menggunakan kawat berenamel dengan diameter 1,8 milimeter dan total 42 putaran belitan. Kawat berenamel yang digunakan adalah jenis kawat berenamel Polyvinyl (PVF-0). Kasus ini dipilih karena sistem pendingin pada motor ini menggunakan pendinginan langsung, yang menggunakan fluida yang bersirkulasi di dalam area stator. Dengan demikian, cairan diperlukan, meskipun pendinginan juga memiliki resistansi isolasi yang tinggi. Cairan yang biasa digunakan adalah minyak transformator. Suhu maksimum yang diijinkan adalah 90 derajat Celcius sehingga kelas 0 dipilih.



Gambar 4.12 Proses perakitan ke dalam cangkang motor

Selain itu, casing utama dan casing penahan sisi kanan dan kiri dibuat menggunakan aluminium melalui proses CNC sehingga mereka tepat dan ringan. Di casing utama, ada dua tubing sebagai saluran pendingin. Sisi dudukan plat stator dijepit di antara casing utama dan mempertahankan sisi kanan dan kiri. Inti SMC yang disaring diletakkan di tempat yang salah, yaitu di satu sisi dudukan plat. Selanjutnya, koneksi dilakukan oleh jalur belitan sesuai dengan jumlah kutub stator dan rotor. Setiap sambungan dilapisi dengan insulator panas dan tahan oli sehingga ketika motor dioperasikan pada suhu tinggi dan oli transformator diterapkan, kerusakan insulasi tidak akan terjadi pada sambungan.



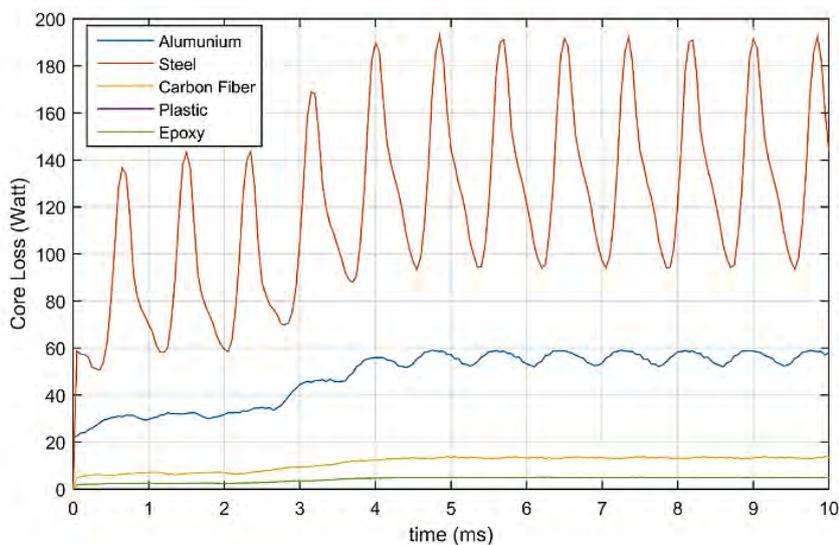
Gambar 4.13 Pemegang stator ki;ka (karbon fiber, alumunium, plastik, besi)

Setelah proses koneksi selesai, maka dudukan plat stator dipasang di satu sisi casing utama dan ditutup dengan satu sisi penahan. Antara selubung utama dengan dudukan plat stator dan antara dudukan plat stator dan dudukan, ada segel untuk menahan cairan sehingga tidak ada kebocoran di luar atau di dalam. Itu juga diberikan sealant tambahan untuk kinerja tahan air terbaik. Sistem ini memiliki keuntungan karena dapat dirakit; sehingga, ketika masalah terjadi pada inti berliku atau SMC, akan lebih mudah untuk melakukan perbaikan dan lebih ekonomis. Tentu saja, itu perlu dipertimbangkan dalam seal dan sealant. Setelah semua bagian stator dipasang, dua rotor berikutnya dipasang di sisi kanan dan kiri.

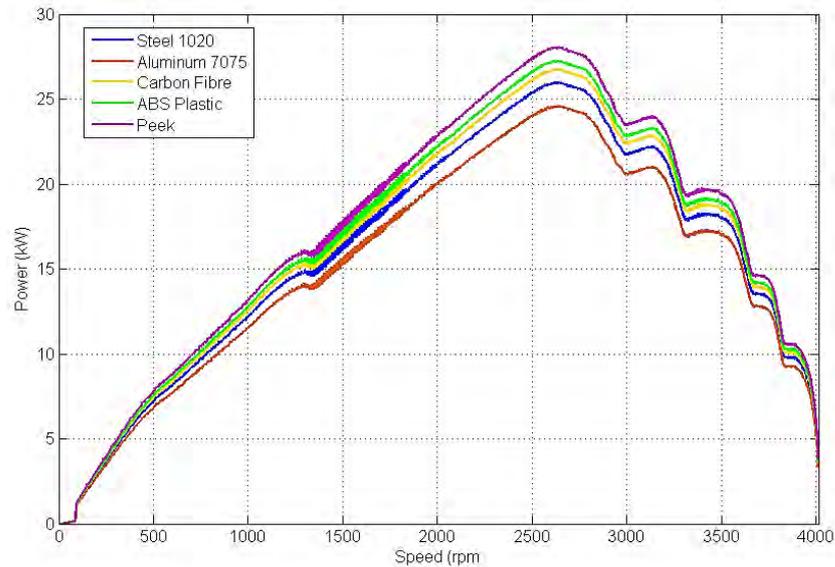
Pada fase pengujian, motor YASA digabungkan menggunakan sambungan universal dan dipasang dengan dinamometer arus eddy. Pengujian dilakukan pada setiap jenis dudukan plat stator. Hasil tes ditunjukkan pada Gambar 4.13 dan 4.14. Gambar 4.13 menunjukkan kerugian yang dihasilkan saat menggunakan berbagai bahan di dudukan plat stator. Kerugian tertinggi dihasilkan oleh bahan baja dengan pola nilai yang berfluktuasi. Oleh karena itu, bahan baja adalah bahan yang paling tidak direkomendasikan karena kerugian terbesarnya. Kekuatan tertinggi dihasilkan saat menggunakan bahan PEEK dan terendah ditemukan saat menggunakan bahan aluminium.



Gambar 4.14 Pengujian menggunakan dinamometer



Gambar 4.15 Kurva loses dari motor yang diuji



Gambar 4.16 Perbandingan power dari material pemegang stator

Selain menguji kinerja pada dynamometer, pengujian daya tahan juga dilakukan dengan beban selama 120 menit. Tes ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan setiap bahan saat diterapkan pada kondisi nyata. Hasil uji ketahanan ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 hasil uji ketangguhan motor listrik

MATERIAL	SUHU DALAM STATOR	WAKTU	KETEANGAN
Besi	120*c	30 menit	Suhu (<i>temperature</i>) meningkat
Alumunium	80*c	30 menit	normal
Serat karbon	70*c	30 menit	normal
Plastik	90*c	30 menit	leleh
PEEK	75*c	30 menit	normal

Dalam data yang ditampilkan tabel 4.2 diketahui bahwa pengujian ketahanan dari pemegang stator menggunakan material yang sudah disimulasikan sebelumnya memperoleh hasil yang cukup bervariasi. Material besi dapat menahan suhu hingga 120* namun hal tersebut tidak diharapkan dalam motor listrik yang digunakan karena dapat dengan mudah membakar bagian dalam stator. Sebaliknya, Material PEEk yang memiliki suhu dalam yang baik tidak mampu menopang kekuatan pemegang stator dalam waktu yang lama karena bersifat adesif. Sifat tersebut juga tidak diharapkan dalam motor listrik karena akan susah dalam perakitannya. Sehingga didapatkan material serat karbon yang memiliki kriteria yang cocok digunakan sebagai material yang telah ada.

BAB 5

KESIMPULAN

Motor dengan topologi YASA memiliki beberapa keunggulan seperti compact, torsi besar dan efisiensi tinggi. Namun, struktur dudukan plat stator terbuat dari bahan mahal yang sulit diproduksi. Oleh karena itu, dalam makalah ini, perbandingan material dapat digunakan sebagai alternatif.

Bahan alternatif harus memenuhi persyaratan yang lebih kuat dan tidak mempengaruhi daya secara signifikan. Berdasarkan simulasi kekuatan yang dilakukan, Serat karbon memiliki kekuatan yang mirip dengan baja dan aluminium dengan nilai 1932e001. Selanjutnya berdasarkan hasil pengujian performa yang dilakukan, Serat karbon memiliki nilai efisiensi 98% sehingga memiliki nilai performa lebih baik dari PEEK yang memiliki nilai efisiensi 93%. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa serat karbon dapat digunakan sebagai alternatif untuk PEEK sebagai bahan untuk pemegang plat stator pada sepeda motor dengan topologi YASA. Analisis pendinginan dan daya tahan motor harus dianalisis di masa depan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. J. Woolmer and M. D. McCulloch, "Analysis of the yokeless and segmented armature machine," *Proc. IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf. IEMDC 2007*, vol. 1, pp. 704–708, 2007.
- [2] "Axial Flux vs Radial Flux: 4 Reasons Why Axial Flux Machines have a Higher Power Density." [Online]. Available: <https://www.magnax.com/magnax-blog/axial-flux-vs-radial-flux.-4-reasons-why-does-axial-flux-machines-deliver-a-higher-power-density>. [Accessed: 10-May-2019].
- [3] B. Zhang, *Soft Magnetic Composites in Novel Designs of Electrical Traction Machines*. 2016.
- [4] B. Bai, Y. Wang, and X. Wang, "Suppression for Discharging Bearing Current in Variable-Frequency Motors Based on Electromagnetic Shielding Slot Wedge," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51, no. 11, 2015.
- [5] B. Zhang, T. Seidler, R. Dierken, and M. Doppelbauer, "Development of a Yokeless and Segmented Armature Axial Flux Machine," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 4, pp. 2062–2071, 2016.
- [6] D. Hanselman, *Brushless Permanent Magnet Motor Design Second Edition*, vol. 2. 2006.
- [7] B. Zhang, T. Seidler, R. Dierken, and M. Doppelbauer, "Development of a Yokeless and Segmented Armature Axial Flux Machine," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 4, pp. 2062–2071, 2016.
- [8] M. Aydin, M. Gulec, and S. Member, "Reduction of Cogging Torque in Double - Rotor Axial Flux Permanent Magnet Disc Motors : A Review of Cost Effective Magnet Skewing Techniques with Experimental Verification," no. c, pp. 1–9, 2013.
- [9] L. Xu, Y. Xu, and J. Gong, "Analysis and optimization of cogging torque in yokeless and segmented armature axial-flux permanent-magnet machine with soft magnetic composite core," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 54, no. 11, pp. 1–5, 2018.
- [10] K. Grace, S. Galioto, K. Bodla, and A. El-refaie, "Design and Testing of a Carbon-Fiber-Wrapped Synchronous Reluctance Traction Motor," vol. 9994, no. c, 2018.
- [11] H. Vansompel, A. Rasekh, A. Hemeida, J. Vierendeels, P. Sergeant, and A. E. Modeling, "Coupled Electromagnetic and Thermal Analysis of an Axial Flux PM Machine," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51, no. 11, pp. 1–4, 2015.
- [12] H. Vansompel, A. Hemeida, and P. Sergeant, "Stator Heat Extraction System for Axial Flux Yokeless and Segmented Armature Machines," 2017

Halaman ini sengaja dikosongkan

INDEX

<i>A</i>	
Ansys Maxwell	vii, 31, 32
<i>axial flux</i>	5, 11, 12, 13
<i>B</i>	
BLDC .i, iii, v, vii, ix, xi, xv, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 26, 27, 28	
<i>C</i>	
<i>cogging</i>	14, 20, 21, 41
<i>F</i>	
Finite Element Magnetic Method (FEMM)	vii, ix
<i>K</i>	
kurva hysteresis	9
<i>M</i>	
Magnet permanen	2, 20
<i>P</i>	
pemegang stator (<i>core shielding</i>)	2
Permanent magnet axial flux motor (PMAFM)	5
Permanent Magnet Exited Axial Flux Machine With Internal Segmented Armature (PMAFSM-ISA)	8
Permanent Magnet Exited Transverse Flux Machine With Claw Poles (PMTFM- CP)	8
Poly Ether Ether Ketone (PEEK)	vii
<i>S</i>	
<i>sandwich structure</i>	6, 14
Soft Magnetic Composite (SMC)	vii, ix, 16
Pemegang stator	2
<i>Y</i>	
YASA .i, iii, v, vii, ix, xi, xv, xix, 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 24, 26, 27, 28, 30, 35, 39	
Yokeless Axial and Segmented Armature	vii

Halaman ini sengaja dikosongkan