



THESIS

PENGEMBANGAN *PROTOTYPE IN-WHEEL BRUSHLESS DC MOTOR 2 KW* SEBAGAI SISTEM *POWERTRAIN* PADA SKUTER ELEKTRIK.

Rifki Dwi Putranto
6007201012

Dosen Pembimbing
Prof.Dr.Eng Harus Laksana Guntur, M.Eng. S.T

Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2022

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)

di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Rifki Dwi Putranto

NRP: 6007201012

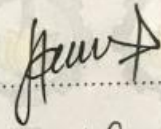
Tanggal Ujian: 08 Juli 2022

Periode Wisuda:.....

Disetujui oleh:

Pembimbing:

1. Prof Dr Eng Harus Laksana Guntur, M.Eng S.T
NIP: 197505111999031001

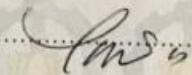
.....


Penguji:

1. Dr Wiwiek Hendrowati, S.T, M.T
NIP: 197004121997032003
2. Dr Eng Unggul Wasiwitono, S.T, M.Eng.Sc
NIP: 197805102001121001
3. Achmad Syaifudin, S.T, M.Eng PhD
NIP: 197909262005011001

.....

.....


.....


Kepala Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

.....


Atok Setiawan, Ir. MEng.Sc. Dr
NIP: 196604021989031002

PENGEMBANGAN *PROTOTYPE IN-WHEEL BRUSHLESS DC MOTOR* 2 KW SEBAGAI SISTEM *POWERTRAIN* PADA SKUTER ELEKTRIK

Nama Mahasiswa : Rifki Dwi Putranto
NRP : 6007 201 012
Pembimbing : Prof. Dr. Eng Harus Laksana Guntur, M.Eng. ST.

ABSTRAK

Dalam kendaraan listrik terdapat komponen- komponen penting didalamnya salah satunya adalah *In-Wheel Hub Motor* (WHM). *In-Wheel Hub Motor* (WHM) adalah salah satu tipe penggerak elektrik yang mulai populer digunakan pada berbagai tipe kendaraan listrik. Keunggulan utama dari tipe penggerak ini adalah terintegrasi langsung pada roda sehingga sistem transmisi konvensional berupa belt atau rantai tidak diperlukan lagi. Keunggulan lain dari tipe motor ini adalah torsi instan pada saat berakselerasi dan juga dalam menanjak sehingga cocok untuk aplikasi kendaraan berkecepatan rendah.

Dalam Penelitian ini akan melakukan pengembangan *In-Wheel Hub Motor* (WHM) dengan menggunakan desain parameter referensi pole magnet 40 dan slot stator 42 pada penelitian sebelumnya. Referensi tersebut dilakukan fabrikasi dan di uji eksperimen untuk melakukan hasil simulasi motorcad dengan eksperimen. Dalam desain awal *inwheelhub* motor pertama menggunakan airgap 0,7 namun dalam pengujian eksperimen airgap tersebut terlalu rendah sehingga terjadi *misalignment* yang memicu gaya gesekan antar stator dengan magnet. Sehingga dilakukan pengembangan perubahan *airgap*. Sebelum diterapkan pada prototype dilakukan simulasi motorcad untuk dilakukan analisa kemudian dilanjutkan dengan penerapan pada prototype dan dilakukan pengujian eksperimen untuk validasi. Pengembangan *In-Wheel Hub Motor* (WHM) selanjutnya parameter yang dioptimasi pada *winding turn* untuk peningkatan torsi dengan menyesuaikan kebutuhan traksi yaitu 48 Nm. Dari perubahan *winding turn* dapat meningkatkan dari torsi puncak 43,8 Nm menjadi 50,87 Nm dan parameter selanjutnya diameter kawat, dengan perubahan menyesuaikan referensi yaitu SWG 22 yang dapat meningkatkan performa *In-Wheel Hub Motor* (WHM) dan bisa diterapkan pada E-skuter.

Kata kunci : WHM, E-Skuter, Airgap, Winding Turn

THE DEVELOPMENT OF IN-WHEEL HUB BRUSHLESS DC MOTOR 2 KW AS A PROPULSION SYSTEM FOR ELECTRIC SCOOTER

Nama Mahasiswa : Rifki Dwi Putranto

NRP : 6007 201 012

Pembimbing : Prof. Dr. Eng Harus Laksana Guntur, M.Eng. ST.

ABSTRACT

In electric vehicles there are important components in it, one of which is the In-Wheel Hub Motor (WHM). In-Wheel Hub Motor (WHM) is one type of electric drive that is gaining popularity in various types of electric vehicles. The main advantage of this type of drive is that it is integrated directly on the wheels so that a conventional transmission system in the form of a belt or chain is no longer needed. Another advantage of this type of motor is instant torque when accelerating and also in climbing so it is suitable for low vehicle applications.

In this study, we will develop an In-Wheel Hub Motor (WHM) by using a reference parameter design of 40 magnetic poles and 42 stator slots in previous studies. The reference was fabricated and experimentally tested to carry out motorcad simulation results with experiments. In the initial design of the first inwheelhub motor using an air gap of 0.7 but in the experiment the air gap was low so that there was a misalignment that triggered too much force between the stator and the magnet. So that the development of airgap changes is carried out. Before being applied to the prototype, a motorcad simulation was carried out for analysis, then continued with application to the prototype and experimental testing was carried out for validation. The development of the In-Wheel Hub Motor (WHM) then optimized the parameters on the winding turn to increase the torque to match the traction needs of 48 Nm. From the change winding turn, it can increase the peak torque from 43.8 Nm to 50.87 Nm and the next parameter is the wire diameter, with a reference change, namely SWG 22 which can improve the performance of In-Wheel Hub Motor (WHM) and can be applied to E-scooters.

Kata kunci : WHM, E-Skuter, Airgap, Winding Turn

KATA PENGANTAR

Laporan master tesis ini merupakan langkah awal dari proyek besar pembangunan prototip kendaraan listrik roda dua yang dikerjakan di Laboratorium Rekayasa dan Sistem Otomotive, Departemen Teknik Mesin, ITS. Dalam proses penyusunannya banyak hal yang telah ditempuh untuk memperoleh pemahaman yang fundamental tentang kendaraan listrik beserta komponen-komponen pendukungnya. Meskipun begitu, penulis menyadari tulisan ini masih sangat jauh dari kesempurnaan dalam hal sumbangsuhnya terhadap progress ilmu pengetahuan dan teknologi.

Penulis-pun juga menyadari bahwa tulisan ini tidak dapat terselesaikan tanpa adanya bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu penulis ingin mengucapkan rasa terima kasih kepada :

1. Keluarga dari penulis, Bapak Prof Dr Ir Edi Purwanto, M.sc dan Ibu Drs Rosidah yang telah mendukung dan memberikan doa.
2. Bapak Prof. Dr.Eng Harus Laksana Guntur, M.Eng. S.T selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan dan banyak kesempatan di dunia akademik dan riset.
3. Ibu Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T.,M.T ,Bapak Dr Eng Unggul Wasiwitono, S.T, M.Eng.Sc, dan Bapak Achmad Syaifudin, ST, M.Eng, Ph.D sebagai dosen penguji yang telah memberikan banyak masukan untuk menyempurnakan tesis ini.
4. Mas Ida Bagus Putu Putra Mahartana yang selalu menjadi teman diskusi dalam proses pengembangan protoype
5. Tim CV Manufaktur Energi Nusantara yang telah membantu dalam proses pembuatan prototype *InWheel-Hub Motor*
6. Mastuty Ayu yang selalu mendukung dalam proses pengerjaan Laporan Thesis
7. Rekan-rekan Tim Hore terima kasih atas semua cerita masa-masa kehidupan akademik pasca sarjana.
8. Rekan-rekan Tim Ghoib ITS.
9. Rekan Tim Genjur.

10. Teman-teman Pascasarjana DTM ITS 2020.
11. Serta orang-orang yang terkait dalam skema ruang dan waktu saat penulis menempuh studi S2, sehingga tidak mungkin disebutkan satu per satu.

Penulis berharap semoga tulisan ini dapat membantu para pembaca yang terkait dalam bidangnya terlepas dari kesederhanaan konten didalamnya. Maka dari itu penulis berharap pembaca dapat memberikan masukan yang berkelanjutan kedepannya untuk membantu menyempurnakan tesis ini.

Surabaya, 02 Juni 2022

Rifki Dwi Putranto

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Tujuan Masalah.....	4
1.5 Kontribusi dan Manfaat Penelitian	5
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA & DASAR TEORI.....	7
2.1 Kajian Pustaka	7
2.2 Kriteria Motor Listrik Sebagai Sistem Propulsi Kendaraan Listrik.....	9
2.3 Perhitungan Kebutuhan Traksi Kendaraan.	11
2.4 Permanent-Magnet Brushless Machines	13
2.4.1 Topologi BLDC Motors	14
2.4.2 Densitas Torsi dan Kemampuan <i>Overload</i>	15
2.4.3 Kemampuan Flux-Weakening	16
2.5 Generalisasi Desain Motor listrik BLDC.....	17
2.5.1 Dimensi Parametrik Motor	17
2.5.2 Kombinasi Pole dan Slot.	19

2.5.3	Perhitungan Kerugian-Kerugian.....	23
2.6	Optimasi Desain WHM 2KW.....	27
2.6.1	Pendefinisian Solver MotorCad dan Parameter.....	28
2.6.2	Inisiasi Variasi Data Sampel.....	29
2.6.3	Karakteristik Desain Hub Motor	32
BAB 3	METODELOGI.....	35
3.1	Diagram Alir Penelitian	35
3.2	Desain yang digunakan.....	37
3.3	Proses Pembuatan Prototype.....	39
3.4	Pengujian	39
BAB 4	KEBUTUHAN TRAKSI PADA E-SCOOTER.....	43
4.1	Perencanaan Kegiatan.....	43
4.2	Kemampuan Desain Motor.....	46
4.3	Desain dan Manufaktur.....	46
BAB 5	ANALISA WHM OPTIMUM	51
5.1	Airgap	51
5.1.1	Kinerja Operasi Maksimum	54
5.2	Konfigurasi <i>Winding</i>	57
5.3	Kerugian pada operasi maksimum.....	61
5.4	Kerugian pada operasi kontinu.....	64
5.4.1	Kinerja Operasi Maksimum Distribusi Medan Magnet pada Operasi Kontinu (<i>Rate torque @800 RPM</i>)	64
BAB 6	PENGUJIAN INWHEELHUB MOTOR.....	71
6.1	Pengujian <i>Eksperiment Inwheelhub Motor</i>	71
6.2	Dynotest.....	73
BAB 7	KESIMPULAN	75

DAFTAR PUSTAKA 79

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Struktur Dasar Electrical Vehicle Kumar and Revankar, 2017).	9
Gambar 2.2 Kurva Torsi/Tenaga (a) dibutuhkan pada Motor listrik yang digunakan sebagai sistem penggerak /traksi, (b) Ideal (Zhu and Howe, 2007)	10
Gambar 2.3 Gaya – Gaya yang bekerja pada skuter saat menanjak pada slope θ	11
Gambar 2.4 Struktur Ideal Back EMF, (a) BLDC,(b) BLAC, (Zhu, Shen and Howe, 2006)	13
Gambar 2.5 Inner rotor topologi dan Outer Rotor Topologi (Colton, 2010)	14
Gambar 2.6 Konfigurasi Stator Winding, (a) Nonoverlapping winding, (b) Overlapping Winding (El-Refaie and Jahn, 2004)	15
Gambar 2.7 Karakteristik PM Brushless DC Motor (Meier, 2022)	15
Gambar 2.8 Variasi Torsi Dan Power dengan peningkatan rasio inductance (Meier, 2022)	16
Gambar 2.9 Parameter Geometri pada Stator dan Rotor (Uygun et al.,2015)	17
Gambar 2.10 konfigurasi jumlah slot dan pole dengan nilai $q < 0.25$ (Shi-Uk Chung, 2011)	22
Gambar 2.11 Konfigurasi jumlah slot dan pole dengan $q > 0.5$ atau $q=1$ (Shi-Uk Chung, 2011)	22
Gambar 2.12 Konfigurasi jumlah Slot dan Pole unbalance dan balance rotor (Shi-Uk Chung, 2011)	23
Gambar 2.13 Alur Kerja Optimasi Desain WHM 2KW (Idabagus, 2021) ..	27
Gambar 2.14 Pendefinisian Input Parameter (Idabagus, 2021)	28
Gambar 2.15 Pendefinisian Paramater Respon (Idabagus, 2021)	29
Gambar 2.16 Pendefinisian Variasi pada Input (Idabagus, 2021)	30
Gambar 2.17 Setting Pengambilan Sampel (Idabagus, 2021)	31
Gambar 2.18 Kurva torsi vs speed (Idabagus, 2021)	32
Gambar 2.19 Efisiensi desain awal WHM optimum (Idabagus, 2020)	32

Gambar 3.1 Alur Kerja Penelitian Eksperimen dan Validasi desain Wheelhub Motor	35
Gambar 3.2 Desain Inwheelhub Motor	38
Gambar 3.3 Skema Proses Pembuatan Prototype Wheelhub Motor	39
Gambar 3.4 (a) Diagram pengujian eksperimen, (b) Pengujian eksperimen, (c) Pengujian Dynotest	40
Gambar 3.5 Controller	41
Gambar 4.1 Kebutuhan Traksi Torsi vs rpm	44
Gambar 4.2 Torsi terhadap kecepatan putar pada controller 50 amper	46
Gambar 4.3 Design for Assembly secara keseluruhan	49
Gambar 5. 1 Airgap 0.71	51
Gambar 5.2 Hasil simulasi pengaruh airgap terhadap torsi.....	52
Gambar 5.3 Hasil Simulasi Pengaruh airgap terhadap power output.....	53
Gambar 5.4 Mapping Matlab Effisiensi	53
Gambar 5.5 <i>Airgap flux density</i> pada <i>airgap</i> (a) 0,8 (b) 0,9 (c) 1	54
Gambar 5.6 Distribusi medan magnet pada operasi torsi maksimum pada <i>airgap</i> (a) 0,8 mm (b) 0.9 mm (c) 1mm	55
Gambar 5.7 Torsi- Kecepatan putar terhadap perubahan winding turn.....	58
Gambar 5.8 Power Output - Kecepatan putar terhadap perubahan Winding Turn.....	59
Gambar 5.9 Power output – Kecepatan Putar terhadap perubahan Diameter kawat.....	60
Gambar 5.10 Distribusi kerugian total loss	62
Gambar 5.11 Distribusi kerugian histeris loss.....	62
Gambar 5.12 Distribusi kerugian stator eddy current.....	63
Gambar 5.13 Distribusi kerugian rotor eddy current.....	63
Gambar 5.14 Distribusi medan magnet WHM pada operasi on load.....	64
Gambar 5.15 Kerugian elektromagnetik WHM pada operasi kontinyus	65
Gambar 5.16 Kerugian elektromagnetik WHM pada operasi kontinyus hysteresis Loss.....	66
Gambar 5.17 Kerugian elektromagnetik WHM pada operasi kontinyus lamination eddy current loss.....	66

Gambar 5.18 Kerugian elektromagnetik WHM pada operasi kontinyus eddy current.....	67
Gambar 6.1 Torsi terhadap kecepatan putar.....	71
Gambar 6.2 Power Output terhadap kecepatan putar.....	72
Gambar 6.3 Mapping Matlab Efisiensi.....	73
Gambar 6.4 Proses Pengujian Dynotest.....	73
Gambar 6.5 Pengujian dynotest (a) mode eco, (b) mode normal, (c) mode speed.....	74

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Parameter WHM.....	38
Tabel 3.2 Spesifikasi Kontroller	41
Tabel 4.1 Rancangan spesifikasi awal power train WHM optimum	43
Tabel 4.2 Parameter perhitungan gaya traksi	45
Tabel 4.3 Desain untuk manufaktur (DFM)	47
Tabel 4.4 Desain untuk Assembly (DFA)	48
Tabel 5.1 Kepadatan flux pada Operasi torsi maksimum.....	56
Tabel 5.2 Variasi Winding Turn Wheelhub Motor	58
Tabel 5.3 Konfigurasi Gulungan pada Wheelhub Motor	60
Tabel 5.4 Kerugian-kerugian pada operasi torsi maksimum	61
Tabel 5.5 Nilai kepadatan flux WHM referensi pada operasi kontinyus	65
Tabel 5.6 Kerugian yang terjadi	67
Tabel 6.1 Perbandingan Simulasi dan Eksperimen	72

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Krisis energi dan isu lingkungan merupakan isu sentral yang menjadi perhatian negara maju maupaun berkembang. Salah satu sektor penyumbang krisis energi terbesar adalah bidang transportasi. Kesadaran lingkungan dan dampak krisis energi menjadikan trend penelitian bidang transportasi mengarah pada penggunaan energi listrik sebagai pengganti sumber energi fosil yang semakin menipis ketersediaannya. Kendaraan listrik merupakan salah satu solusi dalam menanggulangi penggunaan sumber energi fosil. Pemerintah terus mendorong penggunaan kendaraan listrik di masyarakat, termasuk melalui Program Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai (KBLBB). Berdasarkan data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), potensi mobil listrik di Indonesia pada 2021 ini mencapai sebanyak 125 ribu unit dan motor listrik mencapai 1,34 juta unit. Dengan potensi kendaraan listrik pada tahun ini, maka diperkirakan bakal mengurangi konsumsi bahan bakar minyak (BBM) sebesar 0,44 juta kilo liter (kl) per tahun.

Kendaraan listrik adalah salah satu jalan keluar atas masalah polusi tersebut. Karena kendaraan listrik sumber tenaganya dari baterai atau sering disebut aki, sehingga kendaraan ini sangat ramah lingkungan atau bisa dibilang “zero emission”. Hal ini dapat mengurangi kadar CO₂ dan sejenisnya di udara sebagai bahan kimia yang menyebabkan global warming. PBB dan Negara maju sedang melakukan pengembangan kendaraan ini, dengan harapan di masa depan sudah tidak ada.

Perkembangan kendaraan listrik menjadi salah satu prioritas penting yang sedang digalakkan pemerintah indonesia melalui program kendaraan nasional. Institut Teknologi Sepuluh Nopember melalui PUI SKO telah berhasil melahirkan berbagai produk kendaraan berbasis listrik salah satunya adalah sepeda motor listrik Gesit yang telah berhasil menjajal pasar otomotif indonesia (Harus, 2020). Sepeda Motor Gesit menjadi salah satu titik awal bangkitnya

industri otomotif mandiri Indonesia, sehingga telah memberikan motivasi kepada banyak pihak untuk ikut berpartisipasi menciptakan kendaraan listrik. Meskipun demikian pasar kendaraan otomotif Indonesia masih dimonopoli oleh perusahaan raksasa asing yang menganeksasi industri otomotif nasional melalui kendaraan *ICE* dengan fitur-fitur unggulan yang masih belum terkejar oleh teknologi listrik sehingga mengerdilkan industri kendaraan listrik tanah air jika harus berkompetisi langsung (*direct-competition*) di pasar tersebut. Dari realita tersebut, industri-industri kendaraan listrik roda dua bermanuver ke domain pasar yang lebih kecil dan mengkhusus. Dengan menspesifikkan target pasar baru maka industri-industri kendaraan listrik roda dua mampu menciptakan ekosistem pasarnya sendiri dimana rivalisasi antar industri terjadi secara sehat dan merata. Di bidang industri dan manufaktur kendaraan roda dua, fokus utama diberikan pada kualitas, harga dan sifat produk. Berbagai varian, fitur, jarak tempuh, kapasitas baterai, dan efisiensi menjadi komoditi utama dalam kompetisi yang sekaligus berkontribusi secara global dalam mengurangi emisi kendaraan *ICE* (Bianchi, Bolognani and Zigliotto, 2001).

Sistem penggerak elektrik kendaraan roda dua umumnya terbagi menjadi dua konfigurasi, yakni *mid-drive motor* dan *in-wheel direct drive motor* atau lebih dikenal dengan nama *in-wheel motor*. Namun secara global terdapat banyak topologi motor yang memang didesain untuk aplikasi tertentu seperti yang dideskripsikan oleh (Xue, Cheng and Cheung, 2008). Konfigurasi MDM umumnya menggunakan motor induksi (*IM*) atau *interior permanent magnet synchronous motor (IPMSMs)*, motor dengan tipe tersebut memerlukan sebuah sistem transmisi untuk mengurangi putaran motor yang tinggi sekaligus menyediakan torsi yang cukup pada putaran rendah, ketergantungan pada sistem transmisi konvensional menurunkan efisiensi kendaraan secara menyeluruh, hal ini dipicu oleh karakteristik bawaan dari transmisi mekanikal seperti perawatan regular, pelumasan, *noise* dan vibrasi, sehingga sebagian besar industri dan dunia penelitian beralih menggunakan dan menyempurnakan konfigurasi *in-wheel motor* (Shenoy and Kumar, 2016). Konfigurasi *in-wheel motor* umumnya menggunakan motor BLDC dengan topologi *outer-rotor* yang menawarkan kelebihan seperti torsi yang instan, efisiensi yang tinggi pada kecepatan rendah,

handal, konstruksi yang lebih sederhana dan kompak terintegrasi pada roda, sehingga menyisakan banyak ruang yang dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan kapasitas baterai, dan berujung pada peningkatan jarak tempuh (Chung *et al.*, 2015). Meskipun demikian *in-wheel motor* juga tidak terlepas dari kekurangan, seperti rentang kecepatan yang terbatas serta efek penambahan inersia pada roda (*unsprung mass*) pada kestabilan dan kenyamanan dari kendaraan, sehingga perlu dilakukan modifikasi khusus pada sistem suspensi atau optimasi pada bobot motor (Van Schalkwyk and Kamper, 2006; Cuadrado *et al.*, 2015), karakteristik lain dari *in-wheel motor* tipe BLDC adalah *rippler torque* yang tinggi, sebuah metode analitik dikembangkan dan diterapkan pada tahun 2003, telah berhasil mengurangi 60 % *cogging torque* yang merupakan sumber dari *ripple torque* pada BLDC motor (Motors, Koh and Seol, 2003). Selain itu operasi motor juga dibatasi oleh kenaikan temperatur pada *stator core*, akibat topologi stator yang dikelilingi rotor dan berpotensi menghilangkan sifat magnet (*demagnetization*) dari *permanen magnet* di rotor. Beberapa studi kasus dan perancangan telah dilakukan oleh para peneliti salah satunya analisa termal yang dilakukan oleh (Shu *et al.*, 2017).

Dalam pembuatan hub motor sebagai powertrain tentu perlu menganalisis kebutuhan kendaraan roda dua dari torsi dan kecepatannya. Selain itu peraturan menteri perhubungan nomor PM 44 tahun 2020 pasal 3 kategori motor listrik dengan kapasitas 2 kilowatt kecepatan tidak melebihi 60 km/h. Pada penelitian Idabagus sudah melakukan pengembangan *inwheelhub motor* dengan pembuatan *prototype* menggunakan hasil simulasi parameter jumlah slot stator 42 dan pole magnet 40 dengan efisiensi 91%. Namun hasil penelitian yang dilakukan memiliki daya 6,5 Kw sehingga saat menggunakan controller untuk 2kw belum memenuhi kebutuhan kendaraan roda dua dari torsi dan kecepatannya. Sehingga pada penelitian ini melakukan pengembangan *Inwheelhub motor* 2 kilowatt sebagai powertrain skuter elektrik dengan menyesuaikan kebutuhan traksi pada skuter listrik.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar-belakang diatas, maka dapat dirumuskan beberapa pokok permasalahan yang akan dikaji pada penelitian ini :

1. Berapa kebutuhan performa untuk skuter listrik?
2. Berapa parameter desain *inwheelhub* yang dipilih?
3. Bagaimana perbaikan parameter *airgap* desain fabrikasi hasil dari simulasi sebelumnya?
4. Bagaimana kajian performa parameter *airgap* dengan simulasi?
5. Bagaimana cara melakukan penyempurnaan prototype?
6. Bagaimana performa hasil pengujian?

1.3 Batasan Masalah

Untuk mengerucutkan dan menjaga konsistensi dari domain pekerjaan pada penelitian ini maka beberapa batasan ditetapkan sebagai berikut:

1. Kajian pengujian pada eksperimen pada voltase baterai yang tersedia pada dipasaran, sebagai berikut: 72 v.
2. Parameter yang dikembangkan air gap, jumlah lilitan dan tebal kawat.
3. Material yang digunakan pada motor eksisting diketahui dengan proses studi literatur dan rekomendasi dari beberapa tipe motor yang memiliki daya yang sama.
4. Melakukan perbandingan hasil simulasi *wheelhub* motor dengan eksperimen.
5. Melakukan pemilihan diameter kawat melalui produk eksisting yang ada.

1.4 Tujuan Masalah

Tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini dapat dijabarkan sebagai berikut:

1. Mengetahui kebutuhan performa motor melalui kebutuhan traksi dari kendaraan listrik.
2. Mengetahui parameter *inwheelhub* motor yang digunakan.
3. Menganalisa perubahan parameter *airgap* di simulasi awal dengan simulasi yang terbaru dengan kondisi yang bisa diterapkan pada prototype.

4. Melakukan pengujian dengan simulasi motorcad dan divalidasi dengan eksperimen.
5. Melakukan pengembangan dengan variasi winding turn dan diameter kawat.
6. Melakukan pengujian prototype dengan pengujian eksperimen untuk validasi yaitu dynotest dan pengujian independen.

1.5 Kontribusi dan Manfaat Penelitian

Melalui penelitian ini dihasilkan prototipe wheelhub motor menggunakan desain yang sudah dilakukan optimasi pada geometris stator dan rotor untuk meningkatkan kinerja sehingga dibandingkan dengan hasil eksperimen yang akan diterapkan pada kendaraan listrik. Selain itu juga melakukan simulasi perbedaan parameter dengan fabrikasi prototype dan bisa diimplementasikan pada kendaraan.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA & DASAR TEORI

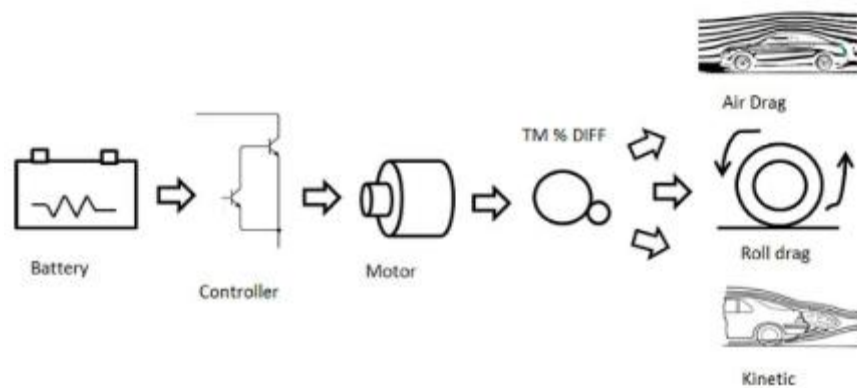
2.1 Kajian Pustaka

Didalam proses desain optimasi mesin-mesin elektrik terdapat dua buah tahapan penting yakni desain dan optimasi. Dalam tahap desain, tujuan yang ingin dicapai adalah untuk menemukan sebuah konsep atau beberapa konsep topologi motor yang layak untuk aplikasi tertentu dengan menginvestigasi material dan dimensi, tipe motor dan topologi, analisa multi-disiplin meliputi analisa elektromagnetik dan atau desain eksperimen. Dari tahap analisa tersebut akan memberikan informasi meliputi perhitungan parameter motor dan evaluasi performa untuk membangun model optimasi yang akan digunakan pada tahap berikutnya. Tahap optimasi bertujuan untuk memperbaiki performa motor yang diusulkan pada tahap desain melalui beberapa algoritma dan metode optimasi (Lei *et al.*, 2017). Penelitian tentang optimasi motor listrik telah banyak dilakukan beberapa tahun terakhir dengan metode optimasi dan topologi motor yang beragam. (Gruber, Bäck and Amrhein, 2011) melakukan penelitian pada *wheel in-wheel motor* dengan mendesain ulang motor eksisting skuter komersial *E-max* dengan tujuan untuk meningkatkan *power density*, *speed range* dan *torque-to-weight* rasio. Konfigurasi motor dengan 36 *slot* dan 40 *magnetic pole* dipilih dan dioptimasi dengan mempertahankan dimensi motor eksisting. Penggabungan antara studi 2D *finite element* dan *algoritma parete evolutionary* (SPEA) menghasilkan prototip motor baru dengan nominal *upgrade* sebesar 30% dari kapasitas motor eksisting. Prototip baru memiliki *rated power* 13 kW dengan prediksi *top speed* mencapai 120 km/jam. (Lee *et al.*, 2017) membangun sebuah sistem propulsi elektrik berbasis *wheel in-wheel motor* yang diaplikasikan pada skuter elektrik komersial GMT. Sebuah proses optimasi dilakukan dengan mengadopsi metode *respon surface* (RSM) dan 2D *finite element* untuk memperoleh parameter dimensi yang cocok dengan kriteria mesin produksi masal. Hasil prototip dari penelitian memiliki *output power* sebesar 2196 Watt dengan torsi konstan sebesar 30 Nm, perbedaan antara hasil perhitungan *FEM* dan pengukuran sebesar 1.5%. (Wu *et al.*, 2014) melakukan

optimasi pada *wheel-hub* PMSM menggunakan *particle swarm optimization* (PSO), dimana terdapat 8 variasi jumlah *pole magnet* dan 4 parameter dimensi stator yang dioptimasi dengan hasil yang ingin dicapai adalah *output power* dan efisiensi. Hasil yang diperoleh dari penelitian tersebut menyebutkan bahwa konfigurasi 48 stator *slot* dan 44 rotor *pole* menunjukkan performa yang superior. Penelitian serupa juga dilakukan oleh (Fodorean, Idoumghar and Szabó, 2013) dimana terdapat 3 variasi topologi dari konfigurasi jumlah *slot* dan *pole* yang disimulasikan melalui *FEM* untuk mengetahui karakteristik elektromagnetik dan performanya. Konfigurasi terbaik selanjutnya dioptimasi dengan algoritma *particle swarm* yang dikombinasikan dengan algoritma *simulated annealing* untuk mencegah hasil optimum pada daerah lokal. Target yang ingin dicapai pada penelitian tersebut adalah pengurangan masa motor, memaksimalkan *power density* rasio. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini meliputi pengurangan massa motor dan peningkatan *power density* sebesar 36.21%. Algoritma PSO juga digunakan oleh (Dal, Yildirim and Kurum, 2019) untuk mengoptimasi PMSM *inner-rotor* dengan konfigurasi 12 *poles* dan 18 *slot* agar mengurangi *copper losses*. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini adalah pengurangan *copper loss* dari 0.719 W menjadi 0.4684 W. Penggunaan algoritma hybrid penggabungan *artificial neural network* dan *genetic algorithm* untuk optimasi mesin elektrik sangat jarang dilakukan meski ANN lebih superior dalam membangun ekspresi matematis yang menghubungkan antara parameter *input* dan *ouput*-nya dibandingkan dengan metode statistik seperti *RSM*, *DOE* atau *Taguchi*. (Sadrossadat and Rahmani, 2020) mencoba melakukan optimasi parametric dengan mengadopsi teknik modeling ANN yang dikopling dengan algoritma *genetic* untuk mengoptimasi efisiensi, *power output* dan *material cost* dan membangun ekspresi matematis pada konstrain-konstrain seperti *stator yoke flux density*, *rotor yoke flux density* dan *tooth flux density* pada motor BLDC. Hasil optimasi dari kopling ANN-GA menunjukkan hasil optimasi magnet thickness, *magnet embrace*, *magnet length* masing-masing sebesar 2 mm, 0.8 mm dan 34.5 mm.

2.2 Kriteria Motor Listrik Sebagai Sistem Propulsi Kendaraan Listrik.

Karakteristik motor listrik yang digunakan sebagai sumber penggerak pada kendaraan listrik ditentukan berdasarkan perhitungan kebutuhan traksi yang dihitung melalui beberapa parameter dasar untuk mengatasi beban-beban seperti beban aerodinamis, beban hambatan rolling, beban gesek jalan, dan beban tanjakan dilihat pada Gambar 2.1.



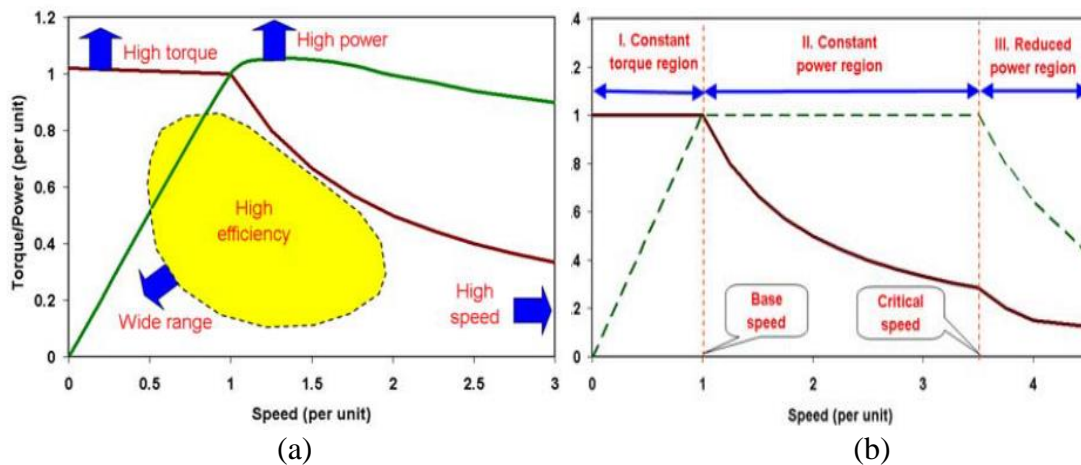
Gambar 2.1 Struktur Dasar Electrical Vehicle Kumar and Revankar, 2017)

Beberapa kriteria motor listrik yang digunakan sebagai sistem penggerak kendaraan listrik, telah diformulasikan oleh (Kumar and Revankar, 2017) melalui jurnal kajiannya yang diformulasikan dalam poin-poin berikut.

1. Motor listrik harus memiliki efisiensi yang tinggi pada rentang kecepatan-torsi yang lebar.
2. Motor listrik harus memiliki torsi/tenaga densitas yang tinggi dimana torsi tinggi diperlukan pada saat awal bergerak dan juga menanjak, sedangkan tenaga yang tinggi dibutuhkan pada saat kendaraan melaju pada kecepatan tinggi.
3. Memiliki rentang kecepatan kerja yang lebar khususnya pada area torsi konstan dan tenaga konstan.
4. Operasi *field-weakening* yang mudah pada kecepatan tinggi.
5. Memiliki volume yang kecil, dan ringan
6. Memiliki regulasi voltase yang baik pada rentang kecepatan lebar.

7. Memiliki karakteristik *overload* yang stabil, umumnya mampu memproduksi torsi 2 kali lebih besar dari torsi rating.
8. Memiliki kehandalan yang tinggi, ketahanan pada lingkungan kerja yang keras.
9. Memiliki toleransi kesalahan operasi yang tinggi terutama pada kehandalan kontrolernya.
10. Hemat biaya dan kokoh dengan perawatan yang mudah
11. Torsi *ripple*, torsi *cogging*, dan noise akustik yang rendah.
12. Minimum akan kebutuhan pendinginan.

Berdasarkan karakteristik umum torsi/tenaga yang dibutuhkan untuk sistem penggerak telah dilustrasikan oleh (Zhu and Howe, 2007) melalui Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Kurva Torsi/Tenaga (a) dibutuhkan pada Motor listrik yang digunakan sebagai sistem penggerak /traksi, (b) Ideal (Zhu and Howe, 2007)

Gambar 2.2 menjelaskan ada area I atau torsi konstan, kemampuan maksimum torsi yang dapat dihasilkan oleh motor ditentukan oleh rating arus yang diberikan inverter, dimana pada area II atau tenaga konstan ditentukan oleh kemampuan motor pada operasi *flux-weakening* atau pengendalian fase komutasi lanjut agar dapat mengatasi limitasi dari voltase dan arus yang mampu diberikan oleh inverter. Pada area III dimana terjadi penurunan torsi dan tenaga yang dipengaruhi oleh munculnya voltase balik atau (*Back-Electromotive*) yang menghambat besar arus yang dapat dialirkan ke motor.

2.3 Perhitungan Kebutuhan Traksi Kendaraan.

Kebutuhan gaya traksi pada kendaraan dapat ditentukan dengan menganalisa gaya-gaya dinamis yang bekerja pada kendaraan seperti yang Gambar 2.2 Kurva Torsi/Tenaga (a) dibutuhkan pada motor listrik yang digunakan sebagai sistem penggerak /traksi, (b) Ideal. (Zhu and Howe,2007) dilakukan oleh (Song, Chang and Choi, 2010), pada sub-bab berikut akan dijabarkan secara singkat tentang gaya-gaya hambatan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Gaya – Gaya yang bekerja pada skuter saat menanjak pada slope θ

A. Gaya Hambat Gelinding F_r

Gaya hambat rolling/ gelinding secara utama disebabkan oleh gesekan antara ban dengan jalan, gaya hambat tersebut dirumuskan sebagai berikut.

$$F_r = \mu_r m g \quad (2.1)$$

dengan :

μ_r = koefisien rolling

m = masa kendaraan + penumpang (kg)

g = percepatan gravitasi bumi ($9.8m/s^2$)

B. Gaya Hambat Aerodinamis F_{ad}

Gaya hambat aerodinamis disebabkan oleh kendaraan yang bergerak menembus aliran udara, gaya ini dapat dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut.

$$F_{ad} = 0.5\rho AC_d V^2 \quad (2.2)$$

dengan :

ρ = densitas udara kg/m^3

A = luas penampang depan kendaraan,

C_d = koefisien drag dan V adalah kecepatan kendaraan

C. Gaya Tanjak F_h

Gaya tanjak dikorelasikan dengan kendaraan yang melaju pada sudut tanjak tertentu, dan dirumuskan sebagai berikut.

$$F_h = mg \sin\theta \quad (2.3)$$

dengan :

m = masa kendaraan + penumpang (kg)

g = percepatan gravitasi bumi ($9.8m/s^2$)

θ = adalah gradien tanjakan.

D. Gaya akselerasi F_{ac}

Gaya akselerasi kendaraan dirumuskan oleh hukum Newton sebagai berikut:

dengan:

$$F_{ac} = ma \quad (2.4)$$

a = adalah akselerasi kendaraan m/s^2

m = masa kendaraan + penumpang (kg)

E. Total Kebutuhan Gaya Dorong .

Total Kebutuhan gaya dorong/traksi merupakan penjumlahan seluruh gayagaya berikut :

$$F_T = F_r + F_{ad} + F_h + F_{ac} \quad (2.5)$$

dengan :

F_T = total kebutuhan gaya traksi (Newton)

F_r = total gaya hambat gelinding (Newton)

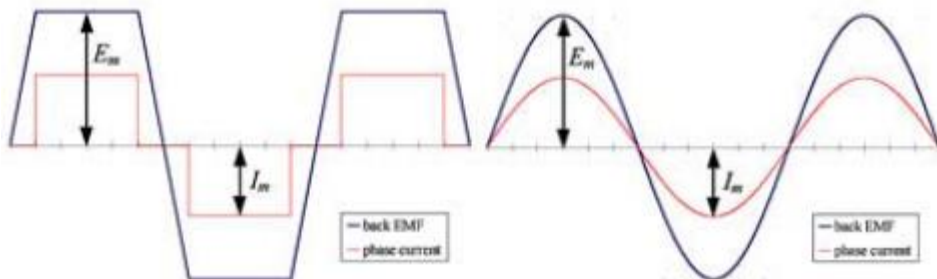
F_{ad} = total gaya hambat aerodinamis (Newton)

F_h = total gaya hambat tanjakan (Newton)

F_{ac} = total gaya kebutuhan akselerasi (Newton)

2.4 Permanent-Magnet Brushless Machines

Dengan adanya permanen magnet yang menyediakan sumber eksitasi kontinyus menjadikan tipe motor ini sangat efisien. Motor ini dapat dikategorikan menjadi dua tipe berdasarkan karakteristik *Back-EMF* yang dihasilkan yakni sinusoidal/ BLAC atau trapezoidal/BLDC yang bisa dilihat pada Gambar 2.4.

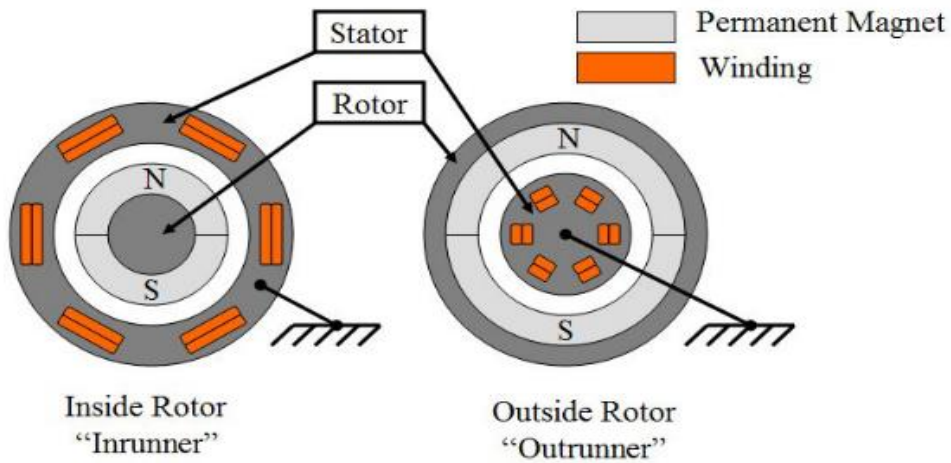


Gambar 2.4 Struktur Ideal Back EMF, (a) BLDC,(b) BLAC, (Zhu, Shen and Howe, 2006)

Mengoperasikan motor BLDC hanya diperlukan untuk mengirimkan arus listrik pada fase kumparan tertentu sehingga membangkitkan elektromagnetik dengan kutub-kutub berlawanan pada gigi stator sehingga terjadi interaksi baik saling tarik menarik atau tolak menolak antara medan magnet stator dan rotor yang menciptakan torsi, proses komutasi ini dibantu dengan komponen kontrol yang relatif lebih murah seperti pemanfaatan *hall sensor* untuk mengetahui posisi rotor.

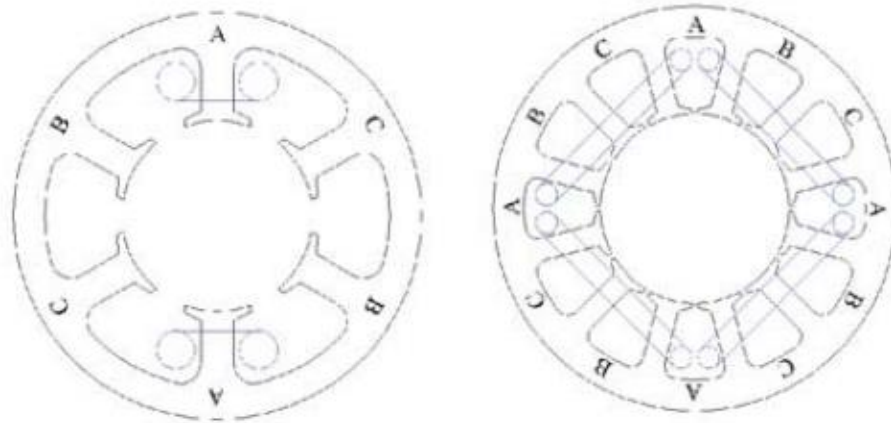
2.4.1 Topologi BLDC Motors

BLDC motor memiliki banyak tipe topologi namun secara garis besar dapat dibagi menjadi dua yang dilihat dari letak rotor seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5 berikut



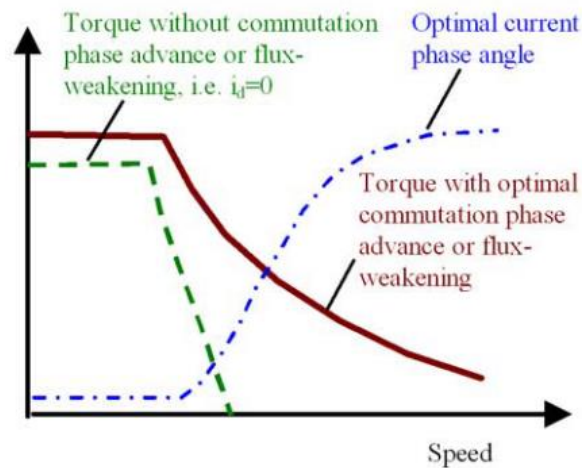
Gambar 2.5 Inner rotor topologi dan Outer Rotor Topologi (Colton, 2010)

Apabila dilihat dari tata letak permanen magnet, umumnya BLDC motor memiliki tipe topologi *surface-mounted* dengan konfigurasi lilitan seperti *concentrated nonoverlapping* dan *fractional-slot*, seperti yang ditunjukkan Gambar 2.5. Dengan konfigurasi tersebut akan diperoleh sisa lilitan yang lebih pendek sehingga berimplikasi pada rendahnya kerugian *copper* dan potensi power densitas yang lebih tinggi.



Gambar 2.6 Konfigurasi Stator Winding, (a) Nonoverlapping winding, (b) Overlapping Winding (El-Refaie and Jahn, 2004)

Pada Gambar 2.6 dapat dilihat konfigurasi ini dapat dioperasikan dengan menggunakan six-step inverter dengan teknik pengendalian PWM *current chopping*. Umumnya proses komutasi pada motor ini menggunakan teknik induksi 2 fasa dengan sudut induksi sebesar 120° , sehingga karakteristik seperti torsi maksimum dan rentang kecepatan yang lebar dapat di kendalikan melalui teknik *flux weakening* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Karakteristik PM Brushless DC Motor (Meier, 2022)

2.4.2 Densitas Torsi dan Kemampuan *Overload*

Secara umum produksi torsi baik dari eksitasi atau *reluctance* pada mesin BLDC dapat diekspresikan melalui persamaan berikut.

$$T = \frac{3}{2}p[\psi_m I_q - (L_q - L_d)I_d I_q] \quad [2.6]$$

dimana :

p = Jumlah pasangan pole

ψ_m = Stator *winding flux-linkage* karena pengaruh magnet

L_q, L_d = Nilai *inductance* pada sumbu d dan q

I_q, I_d = Nilai arus pada sumbu d dan q .

Untuk memaksimalkan densitas torsi maka nilai ψ_m sebaiknya ditingkatkan dengan mengurangi kebocoran medan magnet dengan menciptakan gap udara diantara pole.

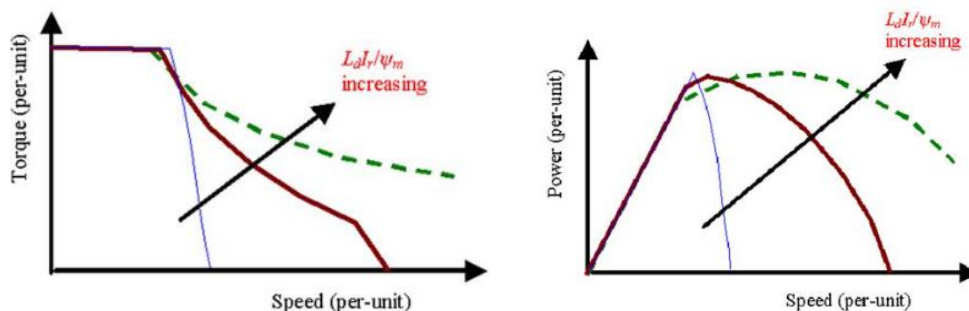
2.4.3 Kemampuan Flux-Weakening

Kemampuan *flux weakening* dapat diketahui melalui rasio antara kecepatan maksimum dengan kecepatan dasar motor dibawah batas voltase dan arus yang bisa diberikan oleh inverter, hal ini dapat dicapai oleh mesin PM BLDC motor ketika motor memiliki nilai *inductance* 1 per unit d axis, atau dapat diekspresikan sebagai berikut,

$$L_d = \frac{\psi_m}{I_r} \text{ atau } \frac{L_d I_r}{\psi_m} = 1 \quad [2.7]$$

dimana : I_r = *rated current*

Sehingga dari persamaan 2 dapat diketahui dengan meningkatkan rasio $\frac{\psi_m}{I_r}$ maka kemampuan *flux-weakening* yang digunakan untuk meningkat rentang kecepatan juga meningkat yang dapat dilihat pada Gambar 2.8.



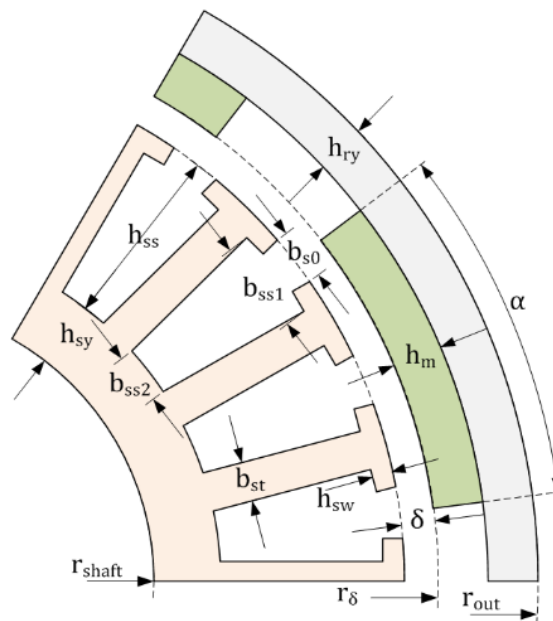
Gambar 2.8 Variasi Torsi Dan Power dengan peningkatan rasio inductance (Meier, 2022)

2.5 Generalisasi Desain Motor listrik BLDC

Dalam proses mendesain motor, terdapat beberapa variabel independen/*input* biasanya berupa dimensi menyeluruh, *winding turn* dan properti dari permanen magnet, sedangkan variabel luaran/*output* umumnya adalah karakteristik performa seperti torsi, perilaku arus listrik, efisiensi dan peningkatan temperatur. Namun pada kenyataan terdapat banyak variabel independen yang terlibat didalam proses desain dan sebagian besar nilai mereka diperoleh dari hasil iterasi dari desain (Carunaiselvane.C, 2012). Pada sub-bab berikut akan dijabarkan beberapa parameter dasar mendesain motor BLDC.

2.5.1 Dimensi Parametrik Motor

Berdasarkan referensi oleh (Uygun and Solmaz, 2015) mengilustrasikan prosedur dasar dalam menentukan dimensi dari motor BLDC tipe *outer rotor* yang bis dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Parameter Geometri pada Stator dan Rotor (Uygun et al.,2015)

Diameter terluar stator dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$D = D_{rc} - 2L_m - 2\delta \quad [2.8]$$

dimana :

D : Diameter terluar dari Stator [mm]

D_{rc} : Diameter terdalam dari rotor [mm]

L_m : Tebal dari Permanen Magnet [mm]

δ : Panjang gap udara/ *air-gap* antara rotor dan stator [mm]

Dari Gambar 2.9 b_{ss1} adalah ukuran bukaan slot teratas, dan b_{ss2} adalah ukuran bukaan slot terbawah yang masing-masing dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$b_{ss1} = \pi \frac{D - 2h_{sw}}{Q_s} - b_{ts} \quad [2.9]$$

$$b_{ss2} = \pi \frac{D - 2h_{ss}}{Q_s} - b_{ts} \quad [2.10]$$

dimana :

h_{sw} : Tebal gigi dari *stator core* .[mm] Q_s : Jumlah slot dari stator. [mm]

h_{ss} : Panjang slot [mm] b_{ts} : Lebar gigi dari *stator core*. [mm]

Tebal efektif dari *core* h_{sy} diekspresikan melalui persamaan berikut

$$h_{sy} = \frac{1}{2}(D - D_i - 2h_{ss}) \quad [2.11]$$

Pada persamaan ini parameter D_i mengindikasikan diameter dalam dari stator yang hanya bisa digunakan dalam mendesain motor BLDC tipe *out-runner* motor. Untuk memastikan kekuatan *magnetic flux linkage* pada rotor maka ketebalan dari rotor menjadi salah satu parameter penting dalam mendesain motor. Ketebalan rotor dieskpresikan melalui persamaan berikut.

$$h_{ry} = \frac{1}{2}(D_o - D_{rc}) \quad [2.12]$$

Total area slot dihitung dengan persamaan berikut:

$$A_{sl} = \frac{1}{2}(b_{ssl} + b_{ss2}) * (h_{ss} - h_{sw}) \quad [2.13]$$

Selain itu, rasio dari panjang bukaan *slot* dan lebar *slot* juga merupakan parameter penting yang patut dipertimbangkan dalam proses pengkosepan motor, rasio ini dapat dihitung melalui persamaan berikut.

$$k_{open} = \frac{b_{so}}{b_{ssi}} \quad [2.14]$$

Persamaan-persamaan diatas digunakan untuk menghitung nilai parameter mekanik dari motor BLDC untuk memperoleh kekuatan magnet yang seragam dari rotor dan stator pada posisi putar manapun. Selain itu, parameter elektrik dan magnetik juga harus dikaji seperti persamaan -persamaan berikut.

$$B_m = \frac{B_r k_{leak}}{1 + \frac{\mu_r \delta k_c}{l_m}} \quad [2.15]$$

dimana :

B_m : Nilai Maksimum dari *magnetic flux* [Tesla]

B_r : Permanet *flux density* [Tesla]

μ_r : Relative *magnet permeability*

k_c : *Carter factor*

Carter factor diformulasikan sebagai berikut (Viorel and Strete, 2014)

$$k_c = \frac{T_s}{T_s - \frac{(k_{open} b_{ssi})^2}{b_{ssi} k_{open} + 5\delta}} \quad [2.16]$$

dimana :

T_s : *Stator tooth opening* yang dihitung baik pada *outer* atau *inner* BLDC motor melalui persamaan [10].

$$T_s = \pi \frac{D}{Q_s} \quad [mm] \quad [2.17]$$

2.5.2 Kombinasi Pole dan Slot.

Kombinasi *slot* dan *pole* memegang peranan penting pada desain motor. Sebuah riset dilakukan oleh (Skaar, Krovel and Nilssen, 2006) pada motor dengan tipe *concentrated winding* yang disusun ulang dalam bentuk tabel oleh (Things-In-Motion, 2019). *Winding factor* berada pada rentang nilai 0-1 yang

mempresentasikan fraksi *amature current* yang digunakan untuk menghasilkan torsi. Tabel 5 menunjukkan beberapa list kombinasi *pole* dan *slot* yang telah ditetapkan berdasarkan perhitungan dari studi diatas, namun beberapa kriteria dalam pemilihan kombinasi *pole* dan *slot* juga wajib dipertimbangkan sesuai dengan jabaran berikut.

2.5.2.1 Perhitungan faktor winding

Jumlah *slot* per *pole* per fase umumnya di simboliskan sebagai ‘q’, ketika nilai q lebih besar atau sama dengan 1, maka winding motor disebut *distributed winding*. *Distributed winding* dapat dibagi menjadi *integer* (q= bilangan integer) dan *fractional* (q= bilangan *fractional*). Desain motor dengan *concentrated windings* dimana q < 1 akan selalu *fractional*, dan mereka mengikuti aturan yang sama sebagai *fractional slot winding* berikut.

$$q = \frac{N_s}{N_{ph} \cdot N_m} \quad [2.18]$$

dimana :

N_s : Jumlah Slot N_{ph} : Jumlah fasa

N_m : Jumlah plot

Persamaan [2.18] hanya digunakan untuk motor dimana gigi stator digulung dengan konfigurasi *concentrated winding*

Pada kasus *fractional* q dapat diekspresikan sebagai berikut:

$$q = \frac{z}{b} \quad [2.19]$$

dimana pembilang z adalah jumlah N_s/N_{ph} didalam N_m *pole* unit yang diekspresikan oleh b, dan z diperoleh dari :

$$z = \frac{N_s}{\text{gcd}(N_s, N_m \cdot N_{ph})} \quad [2.20]$$

GCD adalah faktor persekutuan terbesar antara jumlah slot dan hasil dari jumlah poles dan jumlah fase.

- **Faktor Distribusi.**

Faktor distribusi dapat diekspresikan sebagai berikut:

$$k_{mn} = \frac{\sin\left(\frac{1}{2}n\sigma\right)}{z\sin\left(\frac{n\sigma}{2z}\right)} \quad [2.21]$$

dimana n adalah *winding space harmonic order* dan σ adalah sebaran sudut fasa yang besarnya 60°

- **Faktor Coil Span.**

Untuk menemukan faktor *coil span*, maka perlu diketahui terlebih dahulu nilai sudut *pitch* dari slot atau γ_s .

$$\gamma_s = \frac{\pi \cdot N_m}{N_s} = \frac{\pi}{q \cdot N_{ph}} \quad [2.22]$$

dimana sudut *coil span* ε adalah:

$$\varepsilon = \pi - \gamma_s \quad [2.23]$$

Sehingga faktor *coil span* dapat diperoleh dari persamaan berikut:

$$k_{en} = \cos\left(\frac{1}{2}n\varepsilon\right) \quad [2.24]$$

- **Faktor Winding.**

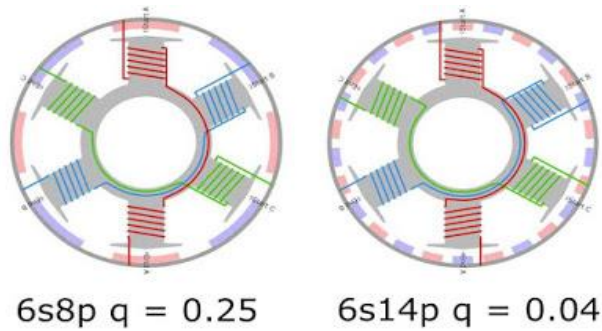
Faktor *winding* secara sederhana dapat diekspresikan sebagai perkalian antara faktor distribusi dan faktor *coil span*.

$$k_{wn} = k_{mn} \cdot k_{en} \quad [2.25]$$

2.5.2.2 Pertimbangan Jumlah slot dan pole berdasarkan faktor winding dalam fungsi q

- **Winding factor dimana $q < 0.25$.**

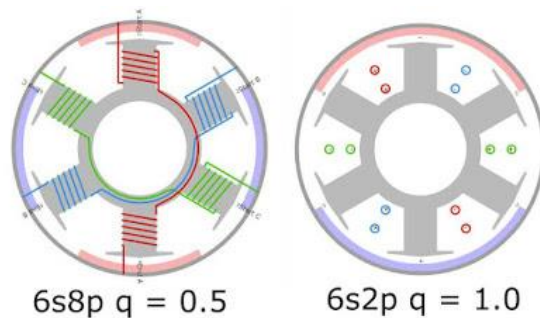
Jika nilai q kurang dari 0.25 maka keliling lingkaran yang ditutupi oleh rotor *pole* kurang dari setengah gigi stator, sehingga terjadi interaksi yang banyak antara kutub-kutub magnet dengan gigi stator, hal ini akan mengurangi torsi yang bisa dihasilkan oleh motor, yang bisa dilihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 konfigurasi jumlah slot dan pole dengan nilai $q < 0.25$
(Shi-Uk Chung, 2011)

- **Winding factor dimana $q > 0.5$**

Jika q lebih besar dari 0.5 maka tipe *concentrated winding* tidak lagi efektif, maka konfigurasi *distribute winding* digunakan bisa dilihat pada Gambar 2.11



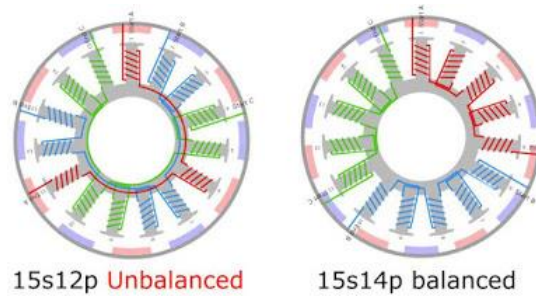
Gambar 2.11 Konfigurasi jumlah slot dan pole dengan $q > 0.5$ atau $q=1$
(Shi-Uk Chung, 2011)

- **Winding factor dimana $N_s = N_m$**

Jika jumlah *slot* sama dengan jumlah *pole* maka motor akan menghasilkan *cogging torque* yang besar dan tidak lagi *self starting*.

- ***Winding factor* apabila konfigurasi winding tidak seimbang dan simetris.**

Motor yang memiliki *winding* yang seimbang akan memiliki jumlah coil yang sama per fasa per pengulangan segmen kutub pole. Motor yang tidak memiliki *winding* yang seimbang akan menghasilkan torsi hanya pada satu sisi rotor, yang dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Konfigurasi jumlah Slot dan Pole unbalance dan balance rotor (Shi-Uk Chung, 2011)

- **Pertimbangan Jumlah Frekuensi *Cogging Torque*.**

Cogging Torque terjadi akibat interaksi antara permanen magnet pada rotor dengan *stator core*. *Cogging torque* menciptakan vibrasi dan noise selama motor beroperasi. *Cogging torque* juga memiliki korelasi dengan produksi kerugian pada rotor baik itu dengan atau tanpa arus yang disuplai kedalam coil. Tabel 5 pada lampiran menunjukkan frekuensi *cogging torque* yang diperoleh melalui fungsi (LCM) pada *excel*, dimana semakin tinggi nilai LCM maka semakin tinggi frekuensi *cogging torque* maka amplitude vibrasi semakin kecil.

2.5.3 Perhitungan Kerugian-Kerugian

Kerugian daya pada motor listrik merupakan permasalahan yang penting karena kerugian ini menentukan efisiensi dari motor dan panas yang didesipasi sistem. Motor listrik dengan efisiensi yang tinggi akan mengurangi biaya pengoperasian dan sekaligus berkontribusi pada penghematan energi. Pada sub-bab berikut akan dijabarkan beberapa persamaan yang digunakan untuk memprediksi kerugian-kerugian seperti *copper losses*, *stator iron losses* pada gigi

stator dan yoke, *mechanical losses, friction, windage* (Andrada, Torrent and Perat, 2004).

- **Copper Losses**

Copper Losses pada temperatur spesifik θ dihitung dengan persamaan berikut:

$$p_{cu\theta} = 3k_{\theta}R_{20^{\circ}}I_{RMS}^2 (W) \quad [2.26]$$

dimana :

k_{θ} : Faktor Koreksi Temperatur, dan diekspresikan sebagai :

$$k_{\theta} = \frac{235 + \theta}{255}$$

$R_{20^{\circ}}$: Hambatan fase, dan diekspresikan sebagai :

$$R_{20^{\circ}} = \rho_{20^{\circ}} \frac{N_f}{S_c} l_{em} (\Omega)$$

$\rho_{20^{\circ}}$: *Copper resistivity*

N_f : Jumlah lilitan per fase

l_{em} : Rata-rata panjang koil

S_c : Penampang Konduktor.

Jika perkiraan ideal 120° pada *square wafe* diberikan maka parameter I_{RMS} dapat dihitung sebagai :

$$I_{RMS} = I \sqrt{\frac{2}{3}} (A) \quad [2.27]$$

Variabel I merepresentasikan garis arus (A) teratas pada *square-wave input* DC. I bisa disubstitusikan ke persamaan [21] menjadi :

$$p_{cu\theta} = 2k_{\theta}R_{20^{\circ}}I^2 (W) \quad [2.28]$$

- **Iron Losses**

Perhitungan *iron losses* yang diprediksi dengan persamaan *Steinmetz* dan hanya valid untuk medan magnet yang dibangkitkan dengan *input arus* yang

memiliki karakter *sinusoidal waveform*, sehingga pendekatan alternatif untuk menghitung *iron losses* untuk *brushless DC motor* yang memiliki *input* arus berbentuk *trapezoidal* diekspresikan melalui persamaan berikut :

$$P_{Fe} = k_h f \hat{B}^\alpha + \frac{k_e}{2\pi^2} \left(\frac{dB}{dt} \right)_{RMS}^2 (W/kg) \quad [2.29]$$

Dari persamaan tersebut terlihat *hysteresis loss* tidak berubah karena hanya bergantung pada nilai puncak dari *flux density*, dengan mengasumsikan tidak ada *hysteresis loops* secara minor. Dimana komponen pertama dari persamaan adalah *hysteresis loss* dan komponen kedua adalah *specific eddy current loss*. \hat{B} adalah nilai puncak dari *flux density* dan β , k_h , α dan k_e adalah konstanta yang ditetapkan dengan teknik *curve fitting* dari data manufaktur.

- **Iron Losses pada gigi stator**

Spesifik *Iron Losses* pada gigi stator atau p_t , termasuk *hysteresis* dan *eddy current losses* ditetapkan menggunakan persamaan berikut:

$$P_t = k_h f B_t^\alpha + \frac{4}{\pi} k_e \frac{f^2 \hat{B}_t^2}{a_{tt}} \gamma (W/kg) \quad [2.30]$$

dimana \hat{B}_t adalah *flux density* pada gigi dan α_n adalah *augmented tooth arc* yang diekspresikan sebagai:

$$\alpha_n = p \left(\frac{\pi}{s} - \frac{k_c w_o}{D} \right) (elec. rad.)$$

Dan $\gamma = 1$ jika $\alpha_n \leq \pi - \beta_m$ atau

$$\gamma = \left(2 - \frac{\pi - \beta_m}{\alpha_{tt}} \right) (elec. rad)$$

Jika $\alpha_n > \pi - \beta_m$

dimana s adalah jumlah slot, k_c adalah koefisien *carter*, w_o adalah *slot opening* dan D adalah diameter stator.

- **Iron Losses pada stator yoke**

Spesifik *iron losses* pada *stator yoke* atau p_y , termasuk *hysteresis* dan *eddy current losses* ditetapkan menggunakan persamaan berikut:

$$p_y = k_h f B_y^\alpha + \frac{8}{\pi} k_e \frac{f^2 \hat{B}_y^2}{\beta_m} \text{ (W/kg)} \quad [2.31]$$

dimana \hat{B}_y adalah *flux density* pada *yoke* dan β_m (*elec.rad*) adalah *magnetic pole arc*.

- **Stator Core Loss.**

Kerugian Total dari *Iron losses* p_{Fe} pada *stator core*, jika kita mengabaikan *surface loss*, diekspresikan melalui persamaan berikut :

$$p_{Fe} = p_t G_t + p_y G_y \text{ (W)} \quad [2.32]$$

dimana p_t dan p_y masing-masing adalah *losses* (W/kg) dari gigi stator dan *stator yoke* dan G_t dan G_y adalah berat dari gigi dan *stator yoke*.

- **Mechanical Losses**

Kerugian mekanik p_{mec} terbagi menjadi dua yakni kerugian gesekan dan kerugian gulungan p_{wind} (Gieras, 2010)

$$p_{mec} = p_{fr} + p_{wind} \text{ (W)} \quad [2.33]$$

Kerugian gesekan pada *bearing* dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$p_{fr} \approx \frac{3}{2} n_r G_{rot} N \times 10^3 \text{ (W)} \quad [2.34]$$

dimana n_r adalah jumlah *bearing*, G_{rot} adalah berat rotor dan N adalah kecepatan rotor (RPM).

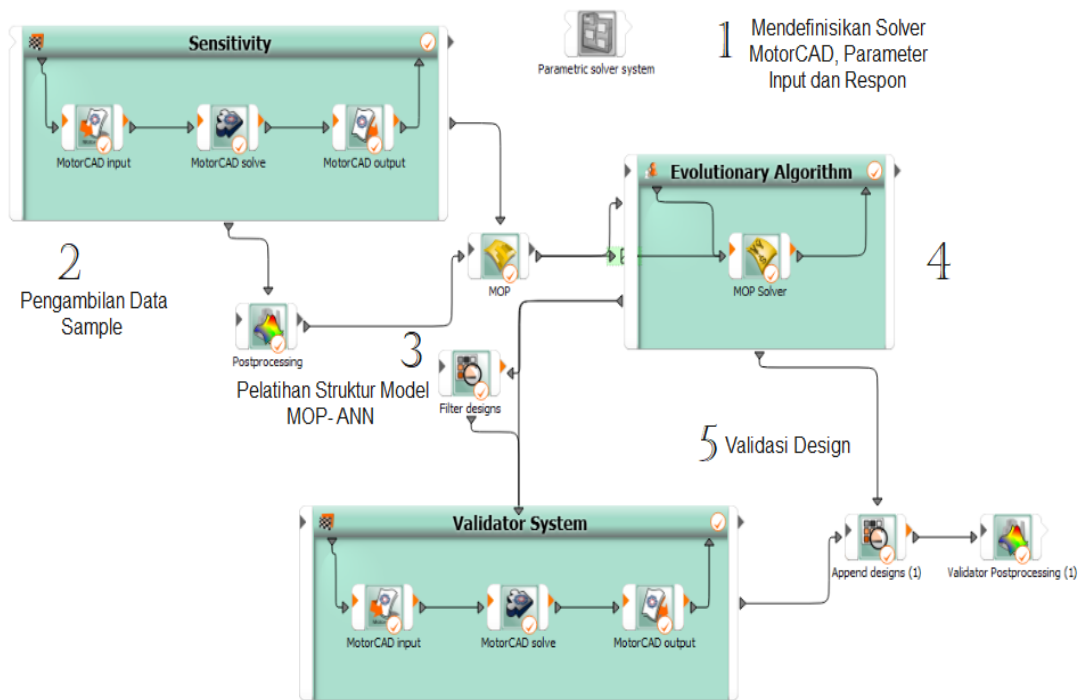
Kerugian dari gulungan dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$p_{wind} \approx 2D_{out}^3 L N^3 \times 10^{-6} \text{ (W)} \quad [2.35]$$

dimana D_{out} adalah diameter terluar dari rotor (m) dan L adalah panjang rotor (m)

2.6 Optimasi Desain WHM 2KW

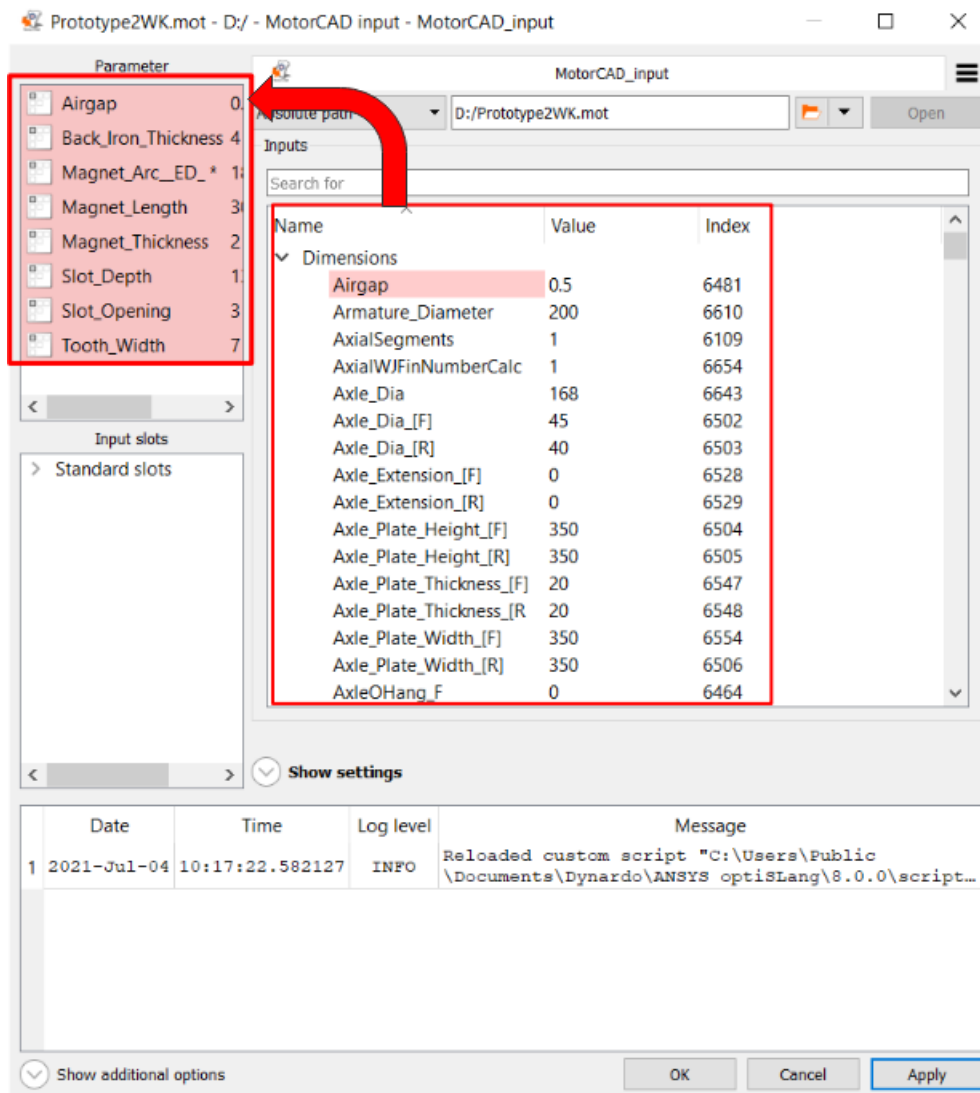
Optimasi desain WHM 2KW dilakukan oleh (idabagus, 2021) dengan integrasi antara perangkat lunak *OptiSlang* dan *MotorCad* yang dijumpatani oleh *Algoritma active link*. Seluruh alur optimasi dijalankan dan dikendalikan melalui *user interface* dimana aliran data dari satu proses ke proses lainnya disambungkan melalui *node-node* seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Alur Kerja Optimasi Desain WHM 2KW (Idabagus, 2021)

2.6.1 Pendefinisian Solver MotorCad dan Parameter

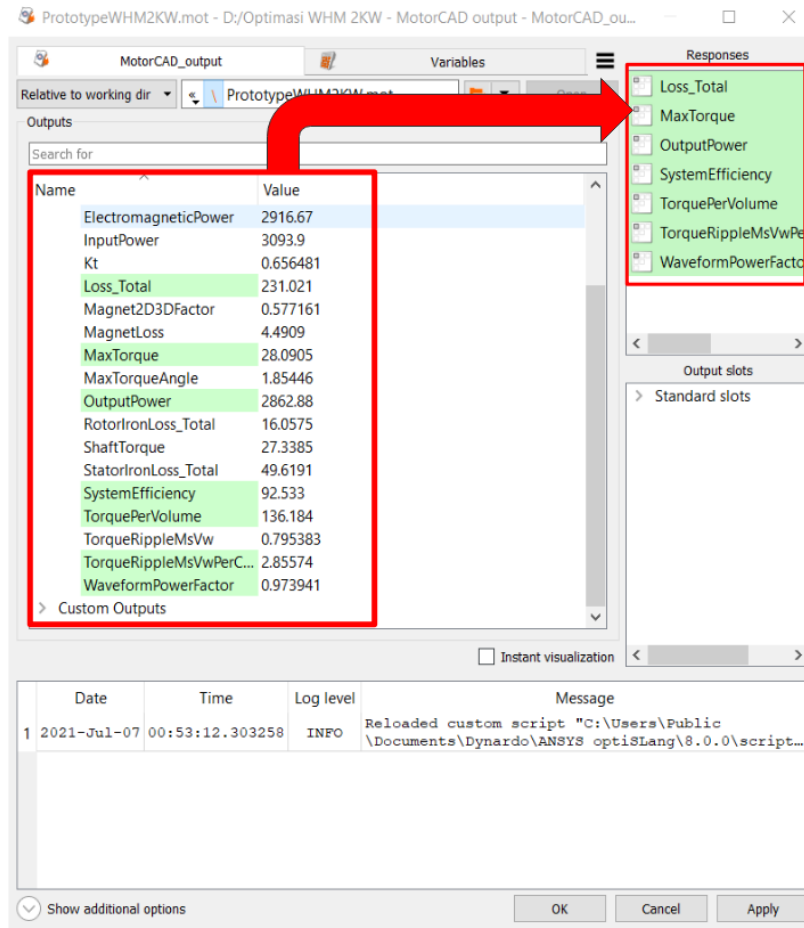
Langkah pertama dalam optimasi adalah mendefinisikan solver *MotorCad* dimana seluruh input parameter dan respon akan dipanggil melalui *active link algorithm* pada *Optislang*.



Gambar 2.14 Pendefinisian Input Parameter (Idabagus, 2021)

Parameter input yang diekstrak dari solver *MotorCad* terdiri dari 3 kategori yakni dimensi, magnetic dan auxiliary parameter. Pada penelitian ini 8 parameter hanya diambil dari kategori dimensi seperti yang ditunjukkan Gambar 2.14.

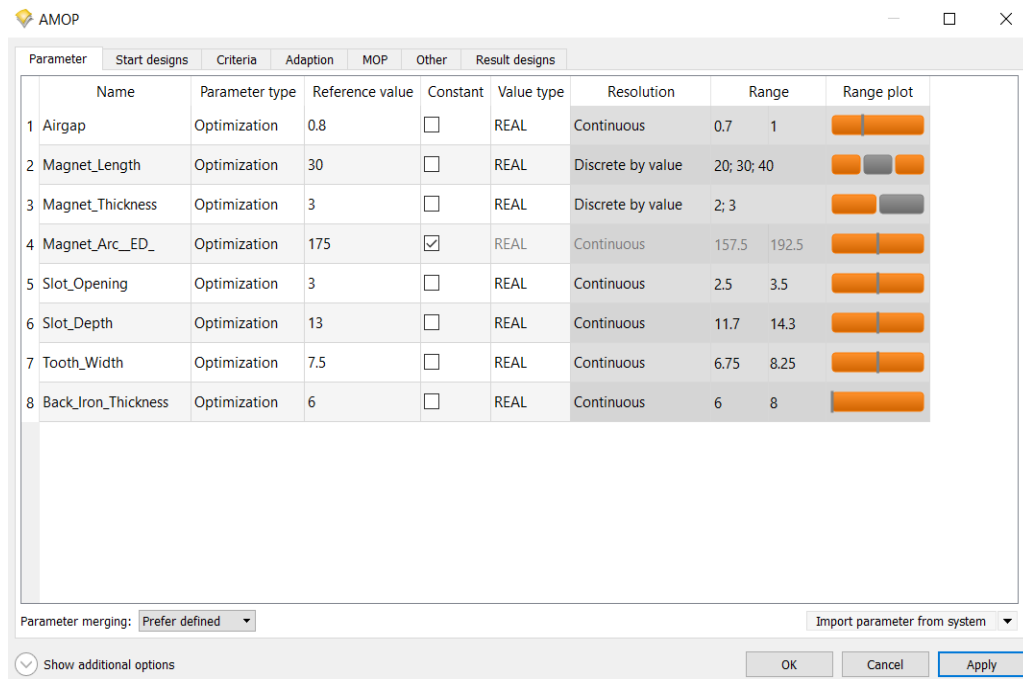
Gambar 2.15 menunjukkan parameter respon kinerja WHM 2 KW yang nantinya akan digunakan sebagai objektif dan kostrain pada pencarian desain optimum.



Gambar 2.15 Pendefinisian Paramater Respon (Idabagus, 2021)

2.6.2 Inisiasi Variasi Data Sampel

Setelah *solver* dan penentuan parameter *input* dan respon telah dilakukan maka langkah selanjutnya adalah menginisiasi pengambilan data sampel. Inisiasi ini diawali dengan menetapkan variasi di masing-masing parameter *input* geometri. Seperti yang ditunjukkan Gambar 2.16.

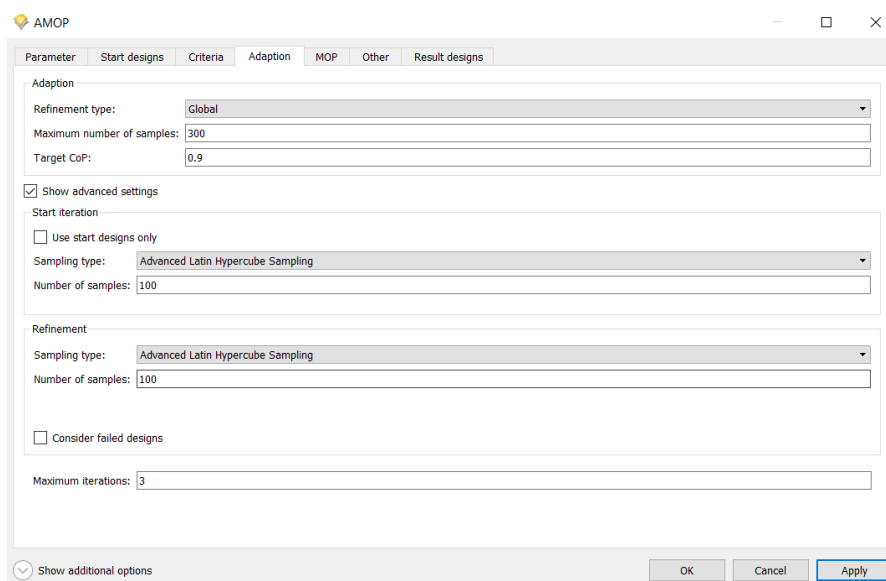


Gambar 2.16 Pendefinisian Variasi pada Input (Idabagus, 2021)

Parameter *airgap* dipilih dengan resolusi kontinyus dengan rentang dari 0.7 hingga 1 mm. Semakin kecil nilai *airgap* maka semakin kuat *flux linkage* atau koneksi medan magnet yang diproduksi oleh permanen magnet dengan medan magnet bangkitan dari stator sehingga semakin besar torsi yang dapat dihasilkan, namun hal ini berbanding terbalik apabila dikaji dari kaca mata kekuatan struktural dari komponen motor, dimana pada topologi WHM, pemilihan ukuran *airgap* menjadi sesuatu yang krusial, hal ini mengingat bahwa WHM terintegrasi langsung pada roda sehingga resiko beban *impact* juga patut dipertimbangkan. *Airgap* adalah celah pembatas antara komponen berputar rotor dengan komponen diam stator, semakin kecil celah antara kedua komponen ini beresiko terjadinya kontak atau gesekan yang dapat merusak stator dan permanen magnet, selain itu toleransi pembuatan komponen juga akan semakin kecil sehingga apabila dikaji dari segi fabrikasi akan lebih sulit dan mahal. Parameter panjang magnet dipilih dengan resolusi diskrit yakni 20, 30 dan 40 mm. pemilihan ini didasari dengan mempertimbangkan ketersediaan ukuran magnet dipasaran saat ini, sehingga dapat mempersingkat waktu pembelian magnet. Parameter ketebalan magnet juga dipilih dengan alasan yang sama seperti panjang magnet nilai ketebalan dipilih 2 dan 3 mm. Parameter *magnet arc* atau sudut bentangan magnet dipilih sebesar 175° deg

agar arah magnetisasi paralel. Parameter *slot opening* dipilih dengan resolusi kontinyus dari 2.5 mm hingga 3.5 mm, *slot opening* adalah celah antara dua ujung gigi stator, apabila celah ini nilainya terlalu kecil maka akan sulit untuk melakukan penggulangan koil tembaga pada slot, namun apabila slot ini terlalu besar maka mempengaruhi besarnya amplitude dan intensitas *cogging torque*. Parameter slot depth juga dipilih dengan resolusi kontinyus dengan rentang dari 11.7 hingga 14.3 mm, dimana nilai *slot depth* yang terlalu besar akan beresiko menambah kepadatan *flux* pada *stator iron yoke* dan berpotensi terjadinya saturasi. Parameter *tooth width* divariasikan dengan resolusi kontinyus dengan rentang 6.75 dan 8.25 mm, semakin besar nilai parameter ini membantu mengurangi resiko saturasi *flux* pada gigi stator namun sebaliknya apabila terlalu besar akan mengurangi area slot yang bisa diisi dengan gulungan koil tembaga. Parameter terakhir yang divariasikan adalah *back iron thickness* atau rotor, rotor dipilih dengan resolusi kontinyus dengan rentang nilai ketebalan dari 6 mm dan 8 mm dimana secara struktural rotor harus mampu menahan gaya sentrifugal dari magnet-magnet pada mode operasi kecepatan tinggi.

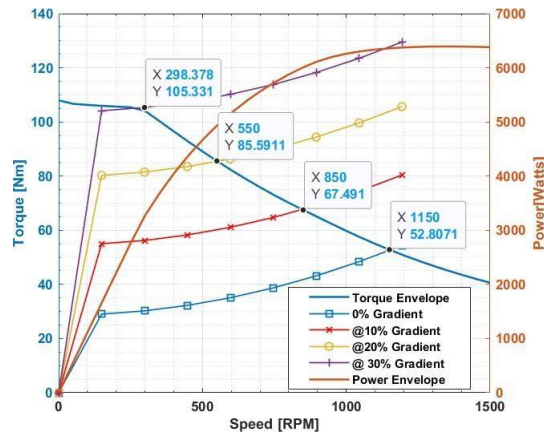
Pada Gambar 2.17 pengambilan data sampel dipilih dengan menggunakan teknik adaptasi MOP dengan maksimum jumlah sampel sebesar 300 dan target cop ≥ 0.9 . *OptiSlang* akan melakukan pengambilan sampel metode *advanced hypercube sampling* dengan memperhatikan nilai cop, apabila nilai cop belum mencapai 0.9 maka jumlah sampel akan ditambah.



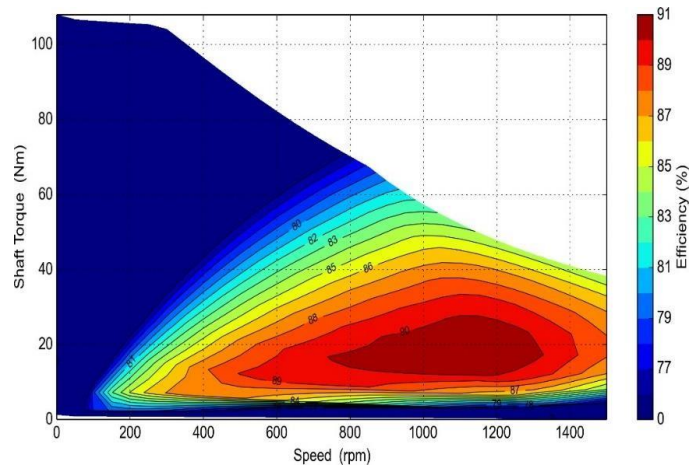
Gambar 2.17 Setting Pengambilan Sampel (Idabagus, 2021)

2.6.3 Karakteristik Desain Hub Motor

Karakteristik performa desain hub motor digunakan untuk mengetahui pencapaian target spesifikasi motor. Kinerja utama yang diprioritaskan dari desain awal adalah karakteristik kurva kecepatan dan torsi seperti yang ditunjukkan Gambar 2.18.



Gambar 2.18 Kurva torsi vs speed (Idabagus, 2021)



Gambar 2.19 Efisiensi desain awal WHM optimum (Idabagus, 2020)

Gambar 2.18 Kurva torsi vs speed menunjukkan kurva torsi- tenaga versus rpm yang digabung dengan kebutuhan torsi pada masing-masing gradien tanjak. Terlihat bahwa motor mampu memproduksi torsi yang dibutuhkan pada kondisi-kondisi tanjakan yang diberikan. Torsi puncak mampu dicapai secara konstan dari 0- hingga 300 rpm sebesar 105.331Nm. Gambar 2.19 menunjukkan kurva efisiensi yang dibangun berdasarkan lab MotorCad terlihat efisiensi dari desain awal WHM

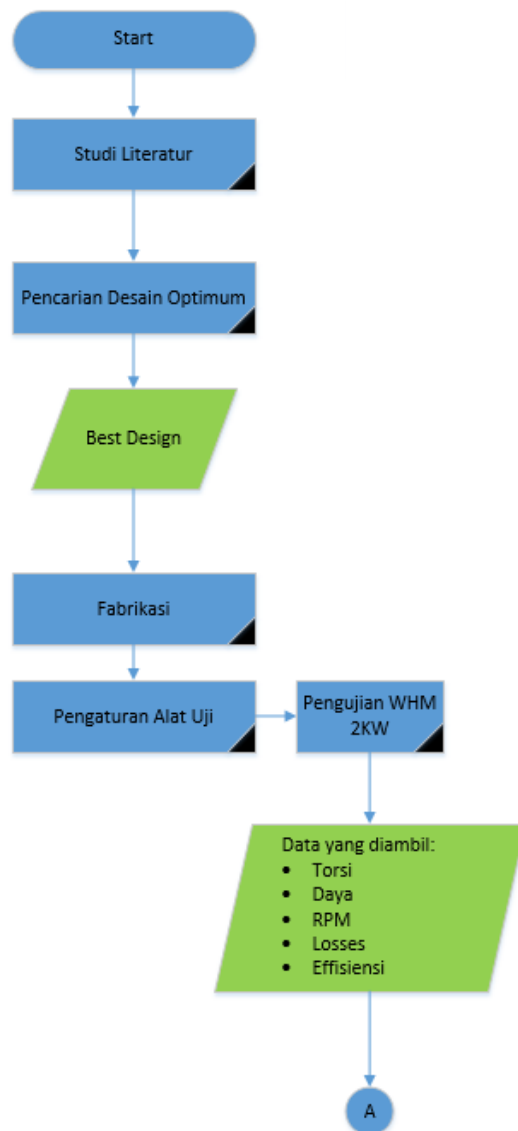
Optimum mampu mencapai 91% pada daerah operasi 800-1300 RPM dengan torsi konstant kontinyus $\geq 20\text{Nm}$. Namun torsi *ripple* pada desain ini masih melebihi 5%, dengan *power factor* kurang dari 0.9. Selain itu tingginya kenaikan temperatur padagulangan akibat kerugian ACcopper relatif tinggi, sehingga operasi mode ini hanyadapat dilakukan dengan waktu yang sangat singkat. Desain awal menggunakan material stator M250-50A yang memiliki nilai losses yang lebih kecil pada frekuensi rendah hingga tingginya, namunmaterial ini sangat sulit diperoleh dipasaran harganya lebih mahal,sehingga dalam analisa berikutnya WHM optimumhanya akan disimulasikan menggunakan material M350-50A dengan magnet N42SH yang dapat dipeoleh dengan mudah dipasaran (Idabagus,2020).

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 3 METODELOGI

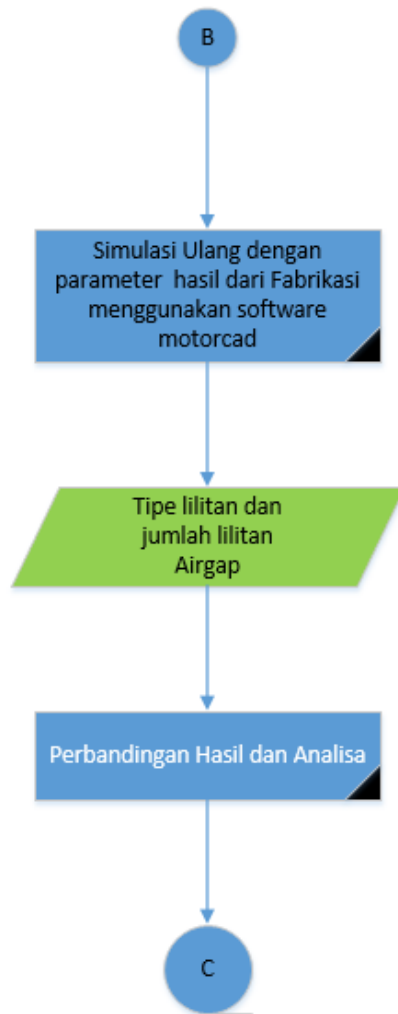
3.1 Diagram Alir Penelitian

Metodologi penelitian yang akan dilakukan sesuai dengan flowchart pada Gambar 3.1 dan akan dijelaskan pada sub bab selanjutnya



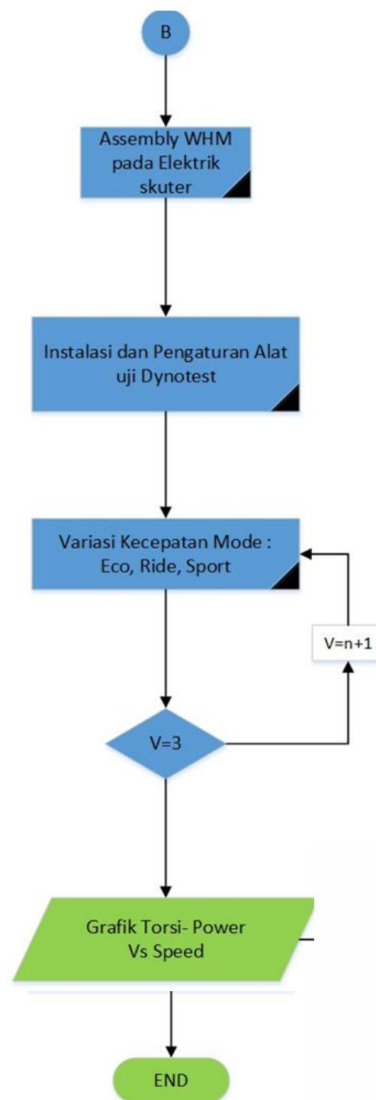
(a)

Gambar 3.1 Alur Kerja Penelitian Eksperimen dan Validasi desain Wheelhub Motor



(b)

Gambar 3.1 Alur Kerja Penelitian Eksperimen dan Validasi desain Wheelhub Motor (Lanjutan)



(c)

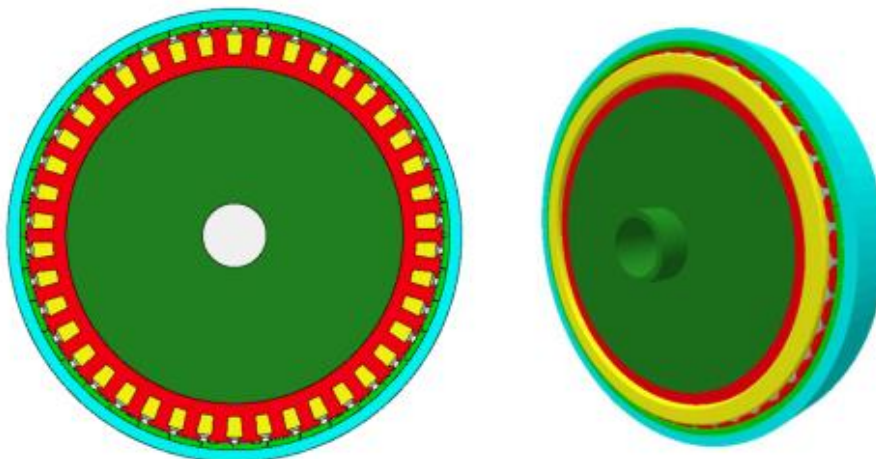
Gambar 3.1 Alur Kerja Penelitian Eksperimen dan Validasi desain Wheelhub Motor (Lanjutan)

3.2 Desain yang digunakan

Desain terpilih di highlight dengan kinerja yang diprediksi berdasarkan MOP-ANN dan FEA MotorCad memiliki deviasi kurang dari 5%. (Idabagus,2021). Tabel 3.1 menjelaskan parameter wheelhub motor yang digunakan dan untuk desain 3D dapat dilihat pada Gambar 3.2.

Tabel 3.1 Parameter WHM

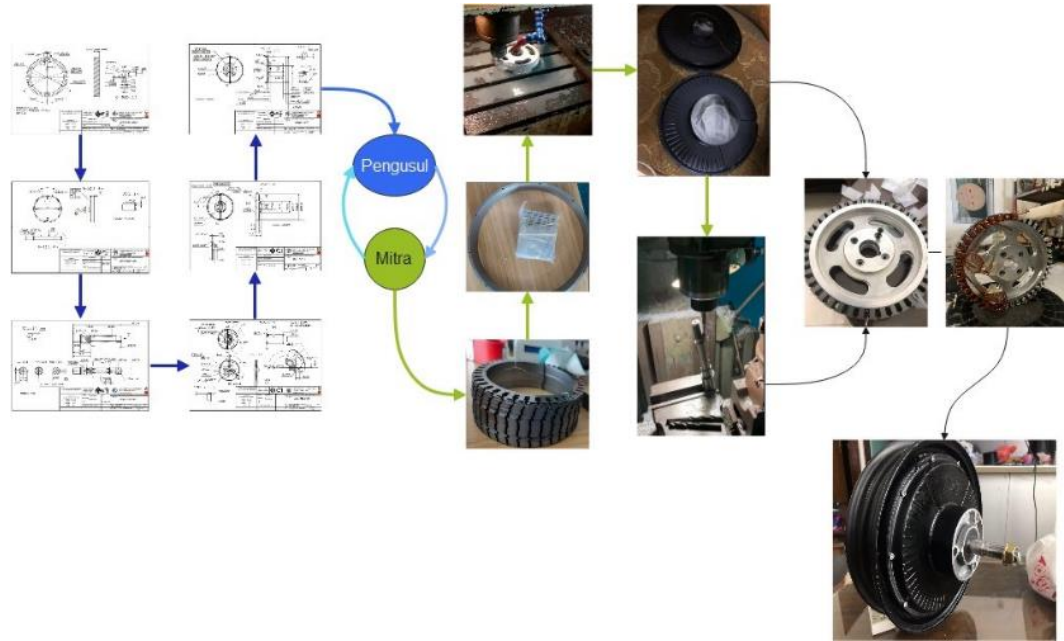
Parameter Motor	WHM	Unit
Pole	40	-
Slot	42	-
Back Iron Thickness	6.02432	mm
Magnet Arc ED	170	Deg
Magnet Segment	1	-
Magnet Length	30	mm
Magnet Thickness	3	mm
Armature Diameter	207	mm
Tooth Width	7.05101	mm
Slot Depth	13	mm
Slot Corner Radius	0.5	mm
Slot Opening	3.2	mm
Tooth Tip Depth	1.5	mm
Tooth Tip Angle	30	Deg
Airg Gap	0.715128	mm
Axle Dia	168	mm
Axle Hole Dia	32	mm



Gambar 3.2 Desain Inwheelhub Motor

3.3 Proses Pembuatan Prototype

Pembuatan prototipe dilakukan berdasarkan hasil desain dan simulasi pada penelitian sebelumnya, dengan memiliki beberapa tahapan yang dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Skema Proses Pembuatan Prototype Wheelhub Motor

3.4 Pengujian

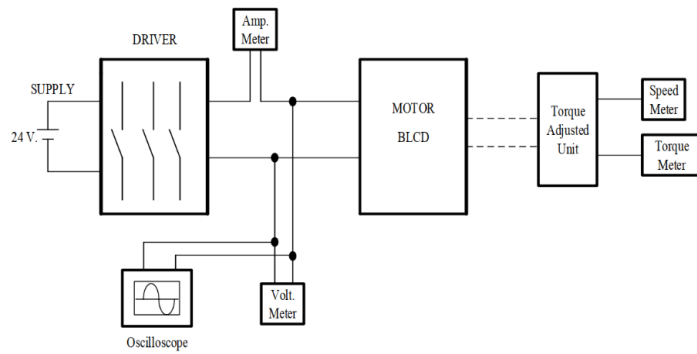
Pada pengujian penelitian ini melakukan dua pengujian yaitu pengujian simulasi dan pengujian eksperimen.

3.4.1 Pengujian Simulasi

Pada pengujian simulasi ini menggunakan software ansys motorcad, hal tersebut dilakukan mengurangi cost dalam pengujian eksperimen

3.4.2 Pengujian Eksperimen

Setelah melakukan fabrikasi diperlukan validasi melalui dengan menghubungkan motor in-wheel ke stasiun uji. Variasi yang dilakukan perbedaan voltase dan kecepatan putar wheelhub (Winai Chanpeng, 2014). Putaran motor dalam roda, arus, daya input, daya output, dan torsi diamati sehingga didokumentasikan. Gambar 3.4 adalah skema perangkat yang terhubung ke stasiun uji.



(a)



(b)



(c)

Gambar 3.4 (a) Diagram pengujian eksperimen, (b) Pengujian eksperimen, (c) Pengujian Dynotest

Dalam pengujian *wheelhub motor* menggunakan controller merk yuyangking yang dapat dilihat Gambar 3.5. Controller tersebut memiliki spesifikasi yang dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Spesifikasi Kontroller

Model	YKZ7250JG
Rated Voltage (V)	42-72
Peak Voltage (V)	100
Peak Battery Current (A)	50
Peak Phase Current (A)	150
MOSFET	18



Gambar 3.5 Controller

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 4
KEBUTUHAN TRAKSI PADA E-SCOOTER

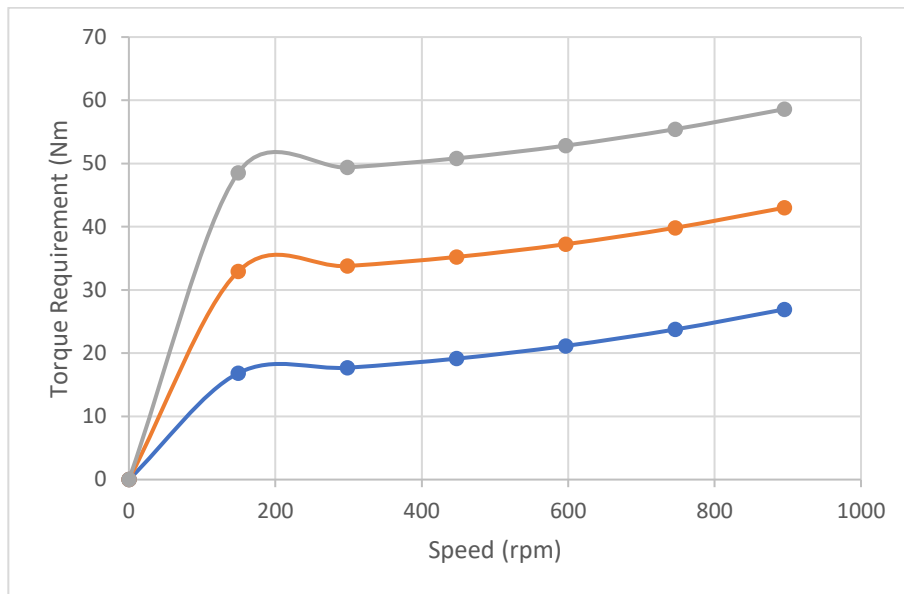
4.1 Perencanaan Kegiatan

Dalam mendesain sistem powertrain baru untuk E-skuter eksisting, maka perlu dikaji kebutuhan traksi berdasarkan dinamika kendaraan agar sesuai dengan kriteria spesifikasi yang ditentukan. Tabel 4.1 menunjukkan rancangan desain spesifikasi baru dari E-skuter eksisting dengan penggantian WHM.

Tabel 4.1 Rancangan spesifikasi awal *power train* WHM optimum

Parameter	Spesifikasi Awal
<i>Curb Weight</i>	150 kg
<i>Maximum speed</i>	60 Km/h
<i>Climbing capability @ 10% gradient</i>	30 km/h
<i>Climbing capability @ 20% gradient</i>	20 km/h
<i>Battery Voltage</i>	72Volt
<i>Battery Capacity</i>	20Ah
<i>Tire Diameter</i>	120/70 -10 inch
<i>Acceleration</i>	0-60km/s @ 12second
<i>Range Power</i>	2000 Watt
<i>Peak Torque @ 400 RPM</i>	48 Nm
<i>Continuous Torque @ 800 RPM</i>	18 Nm

Free body diagram E-Skuter eksisting dengan gaya-gaya yang berkerja untuk menentukan besar gaya traksi yang dibutuhkan agar memenuhi desain spesifikasi.



Gambar 4.1 Kebutuhan Traksi Torsi vs rpm

Pada Gambar 4.1 dapat dilihat grafik kebutuhan traksi dalam *powertrain* pada e-scooter. Sehingga pada grafik kebutuhan traksi tersebut sebagai dasar dalam pengembangan *inwheelhub* motor yang dirancang. Pada kebutuhan traksi kecepatan scooter hanya mencapai 60 km/h dikarenakan dari peraturan menteri perhubungan nomor PM 44 tahun 2020 pasal 3 kategori motor listrik dengan kapasitas 2 kilowatt kecepatan tidak melebihi 60 km/h.

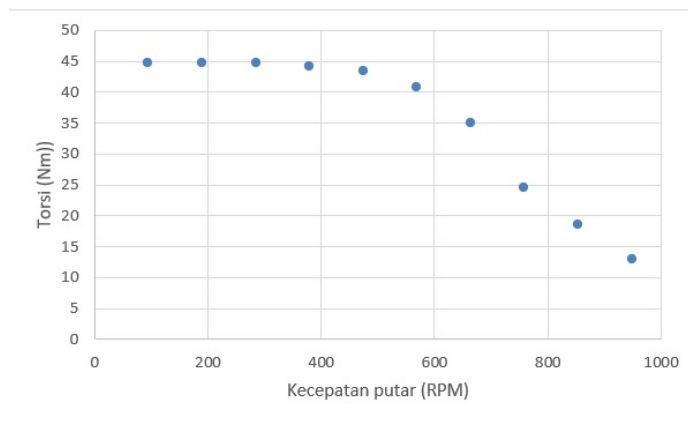
Tabel 4.2 menunjukkan beberapa parameter yang digunakan dalam menghitung kebutuhan traksi baru dari E-scooter yang pada akhirnya akan menentukan kapasitas motor WHM pengganti. Sehingga dilakukan pemilihan desain optimum wheelhub motor yang sudah dilakukan optimasi.

Tabel 4.2 Parameter perhitungan gaya traksi

Parameter Perhitungan Gaya Traksi	
Gaya Rolling	
Parameter	Nilai
Koefisien rolling	0.015
Massa Total [Kg]	150
Konstanta Gravitasi [m/s^2]	9.8
Gaya Drag Aerodinamis	
Parameter	Nilai
Densitas Udara [Kg/m^3]	1.225
Luas Penampang Depan Kendaraan [m^2]	0.6
Koefisien Drag	0.8
Resolusi Kecepatan [V^2]	0-45
Gaya Akselerasi	
Parameter	Nilai
Distance [dV] [m]	40000
Fraksi Waktu [dT] [s]	3600
waktu akselerasi [s]	12
Akselerasi [0-40km/h in 12 s]	0.92 m/s^2
Gaya Tanjak	
Parameter	Nilai
0% Gradient	0
10% Gradient	5.71 deg
20% Gradient	11.31 deg

4.2 Kemampuan Desain Motor

Pada kemampuan desain *inwheelhub motor* mampu menerima daya puncak sebesar 6500 watt, akan tetapi dalam penelitian ini terfokus dengan daya motor sebesar range 2000 watt,. Sehingga dilakukan simulasi motor-cad dengan memberikan daya input menyesuaikan spesifikasi controller produk eksisiting yang digunakan dalam eksperimen yaitu sebesar *peak* 50 ampere.









Gambar 4.2 Torsi terhadap kecepatan putar pada controller 50 ampere

Gambar 4.2 menunjukkan kurva torsi tenaga versus kecepatan putar dari WHM Optimum referensi terlihat bahwa torsi puncak konstan yang bisa dicapai sebesar 44.5 Nm dengan rentang kecepatan putar hingga 290 RPM. Dari *base speed* WHM optimum mampu beroperasi dengan rentang torsi kontinyus yang bervariasi seiring kecepatan motor bertambah dengan operasi *field weakening*, kecepatan puncak dari WHM optimum tercapai pada 952 RPM dengan masih memiliki torsi yang kurang sebesar 9,5 Nm.


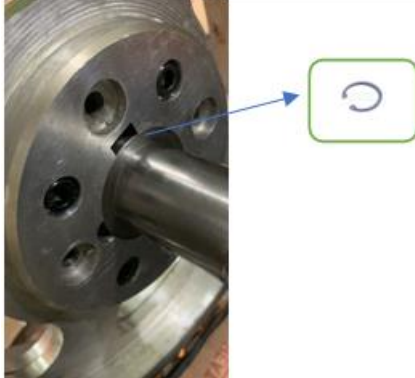
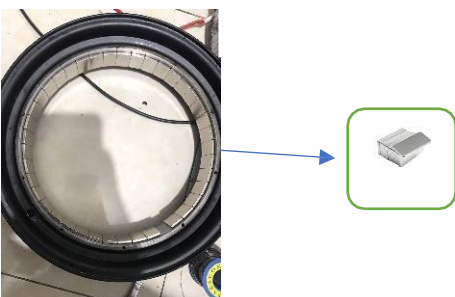

4.3 Desain dan Manufaktur

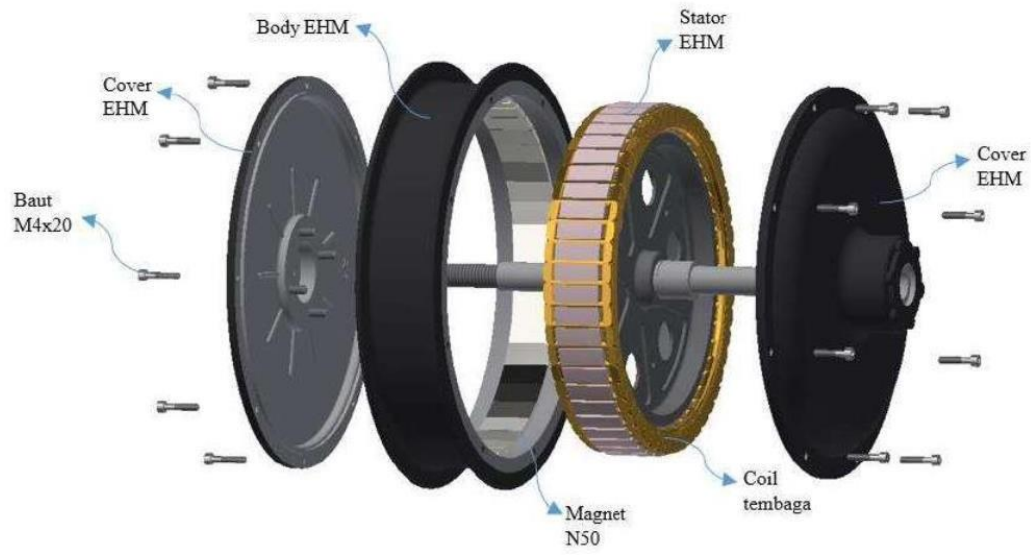
Analisa desain untuk manufaktur dilakukan untuk mengetahui visibilitas produksi dari komponen-komponen penyusun suatu produk menggunakan proses-proses permesinan yang tersedia saat ini. Selain itu analisa ini juga berfungsi untuk memetakan kecepatan produksi dan biaya produksi yang dibutuhkan. Namun pada penelitian ini hanya akan dikaji dari sisi proses permesinan yang dibutuhkan dan perakitan, sehingga dapat disusun seperti pada Tabel 4.3. Gambar 4.3 menjelaskan *design for assembly* secara keseluruhan dari cover, poros, stator, rotor, dan magnet.

Tabel 4.3 Desain untuk manufaktur (DFM)

No	Gambar	Nama	Proses Permesinan	Material	Jml
1		Stator	Pembentukan dengan metode <i>stamping</i> dengan menggunakan mesin <i>stamping</i>	<i>Electric steel</i>	100
2		Rotor	Pembentukan dengan proses <i>cnc milling</i>	<i>Steel</i>	1
3		Mounting Stator	Pembentukan dengan proses <i>cnc milling</i> .	<i>Aluminium</i>	2
4		Poros Motor	Pembentukan poros dilakukan <i>bubut</i>	<i>Steel</i>	1
5		Cover	Pembentukan cover motor dengan proses <i>cnc milling</i>	<i>Aluminium</i>	2
6		Velg Motor	Proses pembuatan velg dengan metode <i>forging</i> menggunakan material padat yang langsung dipanaskan hingga suhu tertentu yang	<i>Aluminium</i>	1

Tabel 4.4 Desain untuk Assembly (DFA)

No	Metode Perakitan	Visualisasi	Kebutuhan
1	Penguncian sistem baut ulir dengan alat <i>torque wrench</i> .		Socket Head Bolt ISO 4762 M2.5 x 6
2	Penguncian dengan menggunakan snipering		Snipring R28
3	<i>Slip On</i> dengan penambahan perekat		<i>Epoxy Adhesive & silicon seals</i>
4	Penguncian sistem baut ulir dengan alat <i>torque wrench</i>		Socket Head Bolt ISO 4762 M2.5 x 6



Gambar 4.3 Design for Assembly secara keseluruhan

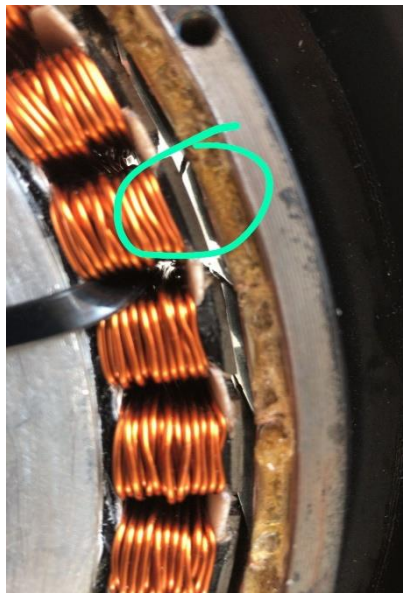
[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 5

ANALISA WHM OPTIMUM

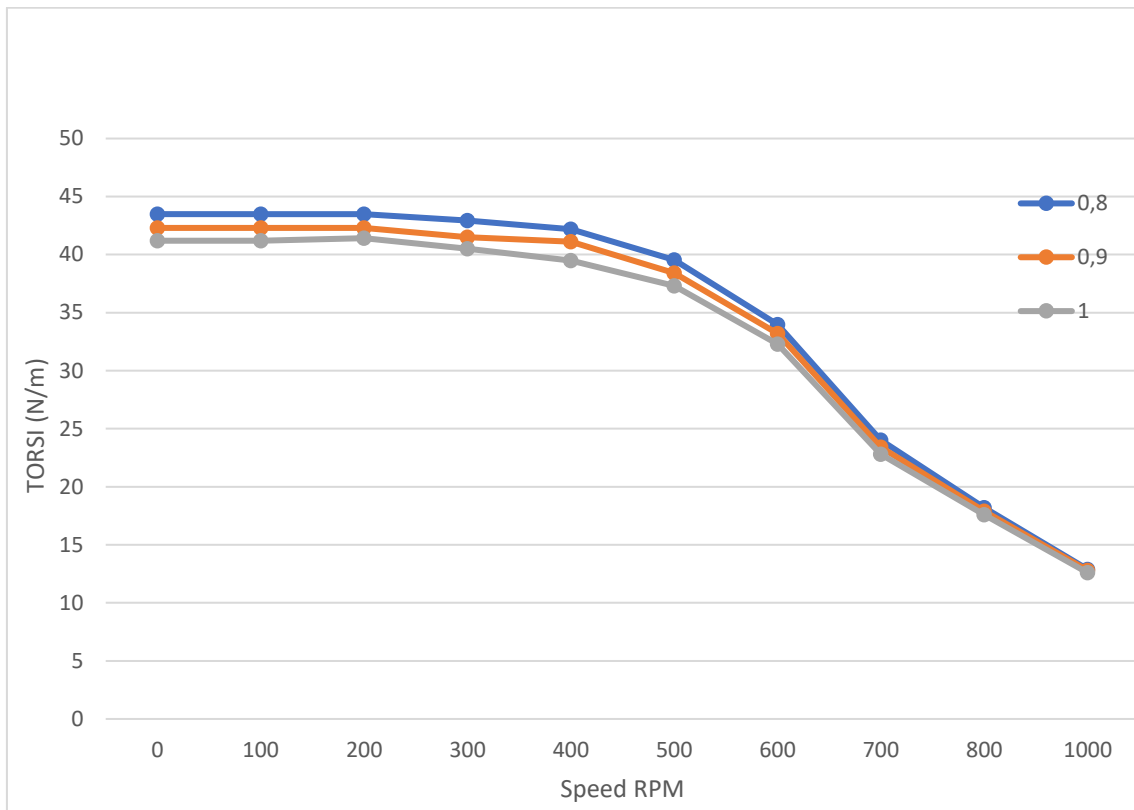
5.1 Airgap

Dalam desain *inwheelhub* motor pertama menggunakan airgap 0,7. Akan tetapi dalam pengujian eksperimen airgap tersebut terlalu rendah sehingga terjadi *misalignment* yang memicu gaya gesekan antar stator dengan magnet sehingga berpotensi menimbulkan menghilangkan sifat magnet dan menyumbang *mechanical losses*. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 5.1 hasil dari pengujian *inwheelhub motor* dengan airgap 0,7.



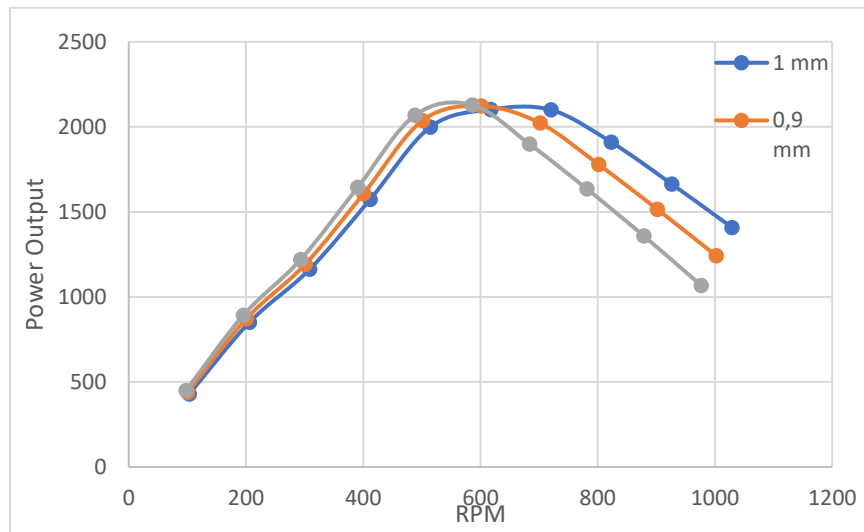
Gambar 5. 1 Airgap 0.71

Sehingga dilakukan perubahan airgap agar mengatasi permasalahan tersebut. Variasi yang digunakan adalah 0,8; 0,9; dan 1 mm. hal ini dikarenakan jarak airgap mempengaruhi besarnya torsi yang dihasilkan. Dibuktikan dengan hasil simulasi motorcad pada Gambar 5.2 dengan perubahan geometri airgap.



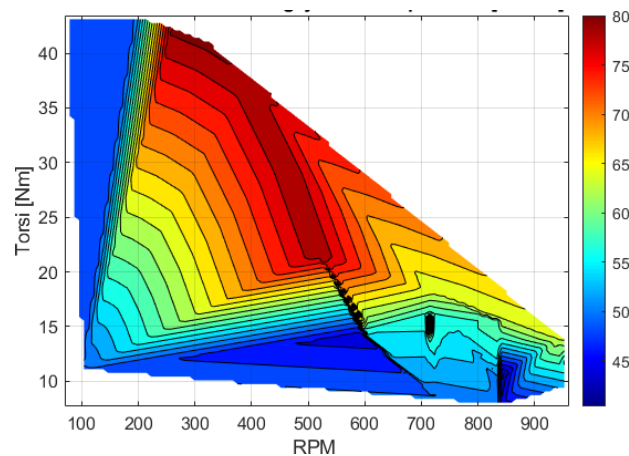
Gambar 5.2 Hasil simulasi pengaruh airgap terhadap torsi

Gambar 5.2 menunjukkan hasil simulasi pengaruh airgap membuktikan dalam besar *airgap* mempengaruhi besaran torsi yang dihasilkan, dengan *airgap* yang semakin dekat maka torsi yang dihasilkan semakin besar (Norman,2020). Hal ini terjadi karena semakin kecil jarak airgap maka semakin rapat fluks pada motor sehingga torsi semakin meningkat. Terlihat Gambar 5.2 torsi terbesar pada *airgap* 0,8 yaitu 43,48 Nm pada 100 rpm, akan tetapi kecepatan putar yang dihasilkan sebesar 950 rpm. Dari hasil yang diperoleh diketahui bahwa pada kondisi jarak air gap yang sama, torsi dan kecepatan memiliki nilai yang berbanding terbalik. Jarak *airgap* akan mempengaruhi besarnya torsi yang dapat dihasilkan oleh sebuah motor, karena jarak *airgap* akan menentukan kerapatan fluks pada sebuah motor. Semakin dekat jarak air gap, maka fluks motor akan semakin rapat dan menyebabkan torsi motor meningkat (Yang,2020).



Gambar 5.3 Hasil Simulasi Pengaruh airgap terhadap power output

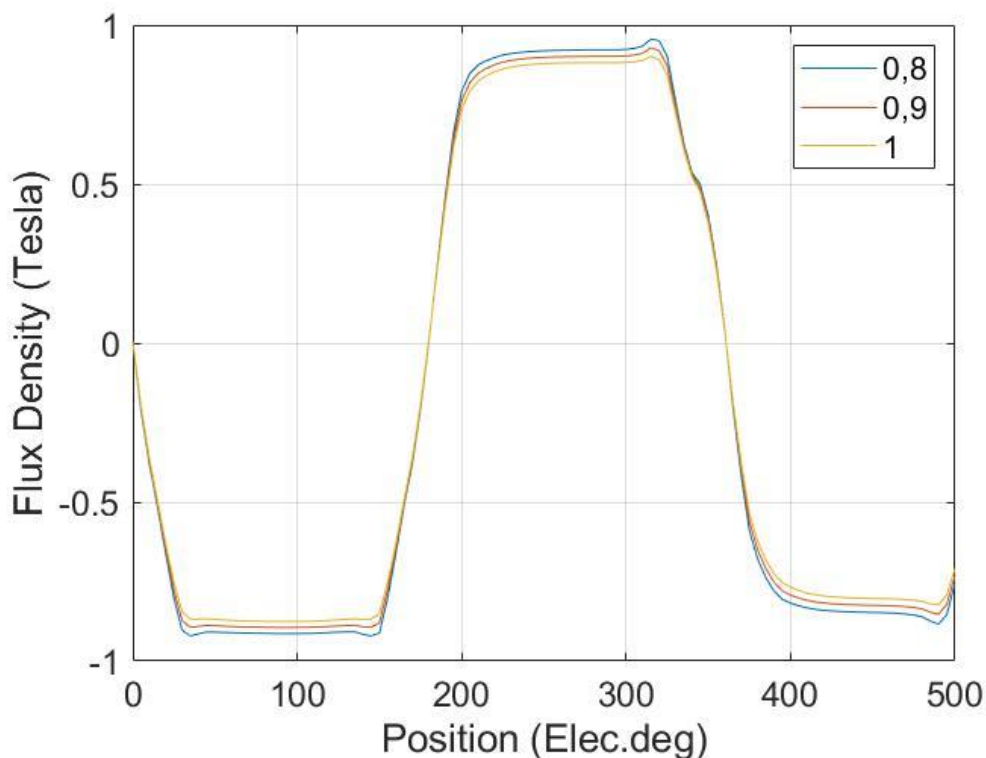
Gambar 5.3 menunjukkan hasil simulasi pengaruh *airgap* yang mempengaruhi besaran *power output* yang dihasilkan. Semakin besar *airgap* semakin besar pula daya *output* yang dihasilkan. Dikarenakan semakin besar *airgap* kecepatan putar yang dihasilkan sehingga untuk *power output continuous* yang dihasilkan juga semakin besar. Pada Gambar 5.3 *airgap* menghasilkan *power output* tinggi yaitu pada *airgap* 1 mm pada kecepatan putar 720 rpm dengan daya *output* 2100 watt. Akan tetapi pada *airgap* 1 mm torsi yang dihasilkan lebih rendah. Gambar 5.4 menunjukkan peta efisiensi yang diplotkan menggunakan perangkat lunak Matlab. Efisiensi tertinggi yang mampu dicapai adalah sebesar 80-82% pada putaran tinggi di rentang 250- 350 RPM.



Gambar 5.4 Mapping Matlab Effisiensi

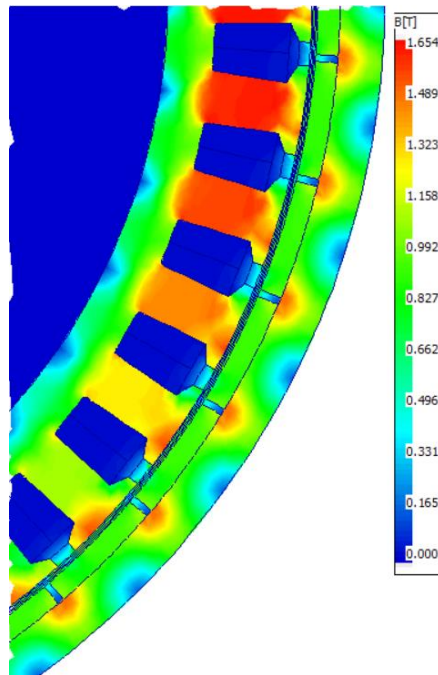
5.1.1 Kinerja Operasi Maksimum

Operasi torsi maksimum hanya dapat digunakan dalam waktu yang relatif singkat, hal ini dikarenakan oleh kenaikan temperatur yang rapid pada gulungan akibat suplai arus yang sangat besar untuk memproduksi torsi yang dibutuhkan. Operasi ini merupakan operasi kritis dari motor karena menentukan performa akselerasi dan kinerja saat menanjak. Analisis ini berfokus terhadap pengaruh parameter airgap terhadap *airgap flux density*.

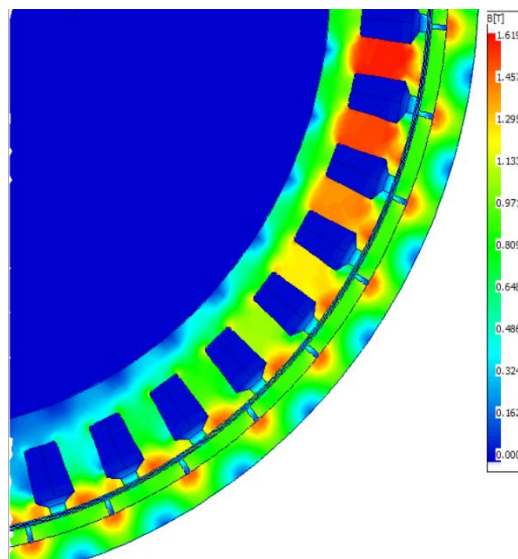


Gambar 5.5 Airgap flux density pada airgap (a) 0,8 (b) 0,9 (c) 1

Gambar 5.5 menunjukkan kepadatan flux tiap variasi *airgap* yang dihasilkan oleh magnet dimana rentang nilai umumnya berada pada [0.80-0.95T] oleh (Cros *et al.*, 2014). Hasil yang relatif sama juga diperoleh dari peneliti (Karnavas, Chasiotis and Stravoulellis, 2018) dimana puncak *flux density* yang diperoleh 0.852 dengan konfigurasi *magnet embrace* sebesar 66.7% dan lebar magnet sebesar 16 mm. Dalam simulasi distribusi magnet saat operasi maksimum tiap variasi *airgap* dapat dilihat pada Gambar 5.6.



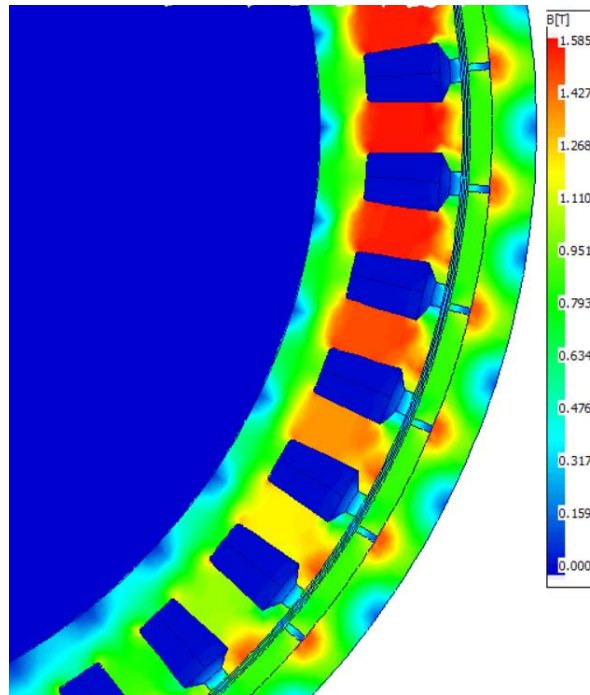
(a)



(b)

Gambar 5.6 Distribusi medan magnet pada operasi torsi maksimum pada *airgap*

(a) 0,8 mm (b) 0.9 mm (c) 1mm



(c)

Gambar 5.6 Distribusi medan magnet pada operasi torsi maksimum pada airgap (a) 0,8 mm (b) 0.9 mm (c) 1mm (Lanjutan)

Gambar 5.6 terlihat bahwa interaksi *flux* di gigi stator dan magnet terdistribusi merata, dimana nilai tertinggi *flux* pada variasi *airgap* 0,8 mm dengan sebesar 1.355 tesla pada ujung gigi stator sangat mendekati titik saturasi material. Dan nilai terendah flux pada variasi *airgap* 1 mm dengan sebesar 1,101 tesla. Sehingga dapat disimpulkan semakin besar jarak *airgap stator* dengan magnet semakin rendah juga nilai kepataan *flux* yang didapatkan, rendah *flux* yang didapatkan rendah juga torsi yang dihasilkan (Uygun and Solmaz, 2015).

Tabel 5.1 Kepadatan flux pada Operasi torsi maksimum

Keterangan	Nilai Airgap 0,8 mm	Nilai Airgap 0,9 mm	Nilai Airgap 1 mm
<i>Airgap flux density (mean) Skewed</i>	0.8015Tesla	0,7777Tesla	0,7561Tesla
<i>Airgap Flux Density (peak) Skewed</i>	1.355 Tesla	1,139 Tesla	1,101 Tesla

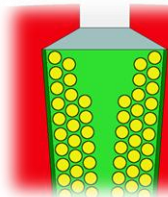
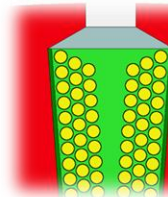
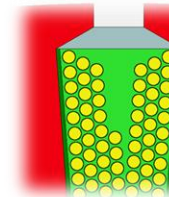
Pada Tabel 5.1 menunjukkan pengaruh perubahan airgap pada besar flux density menunjukkan kepadatan *flux* yang dihasilkan oleh magnet. Dalam penelitian Cross mengungkapkan dimana rentang nilai umumnya berada pada [0.80-0.95T] oleh (Cros *et al.*, 2014). Pada variasi *airgap* 0,8 mm memiliki nilai kepadatan flux sekitar 0,8015 T yang merupakan rentang nilai pada umumnya dibanding dengan variasi *airgap* lainnya. Variasi *airgap* yang menghasilkan dibawah rentang nilai umumnya. Akan tetapi torsi yang dihasilkan pada *inwheelhub motor* tersebut masih belum sesuai dengan kebutuhan traksi pada e-scooter. Pada kebutuhan traksi membutuhkan torsi puncak yaitu 48 Nm, Sehingga perlu peningkatan torsi dari perubahan *winding turn*.(Winai, 2015).

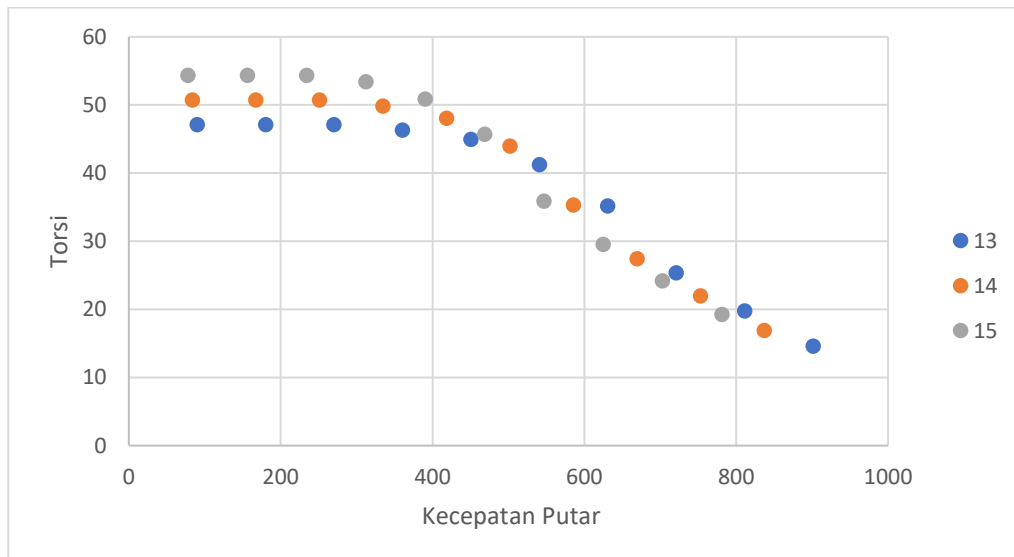
5.2 Konfigurasi Winding

Agar motor tetap dapat menghasilkan torsi yang lebih besar maka diameter kawat gulungan dan *winding turn* dapat ditingkatkan sehingga semakin banyak arus yang dapat dialirkan ke motor. Sehingga dalam peningkatan torsi pada *inwheelhub motor* salah satunya adalah dengan *winding turn*. Namun peningkatan torsi ada hal yang dikorbankan yaitu kecepatan putar. Sehingga dilakukan simulasi agar menemukan hasil torsi sesuai kebutuhan traksi agar tidak terlalu mengorbankan kecepatan putar pada *inwheelhub motor*.

Dalam penelitian Winai melakukan peningkatan torsi dengan proses *winding turn*. Teknik yang dilakukan diadopsi untuk menghasilkan 3-kumparan fase, dengan pola belitannya adalah AabBCcaABbcC dengan menyesuaikan jumlah slot pada stator yang digunakan.

Tabel 5.2 Variasi Winding Turn Wheelhub Motor

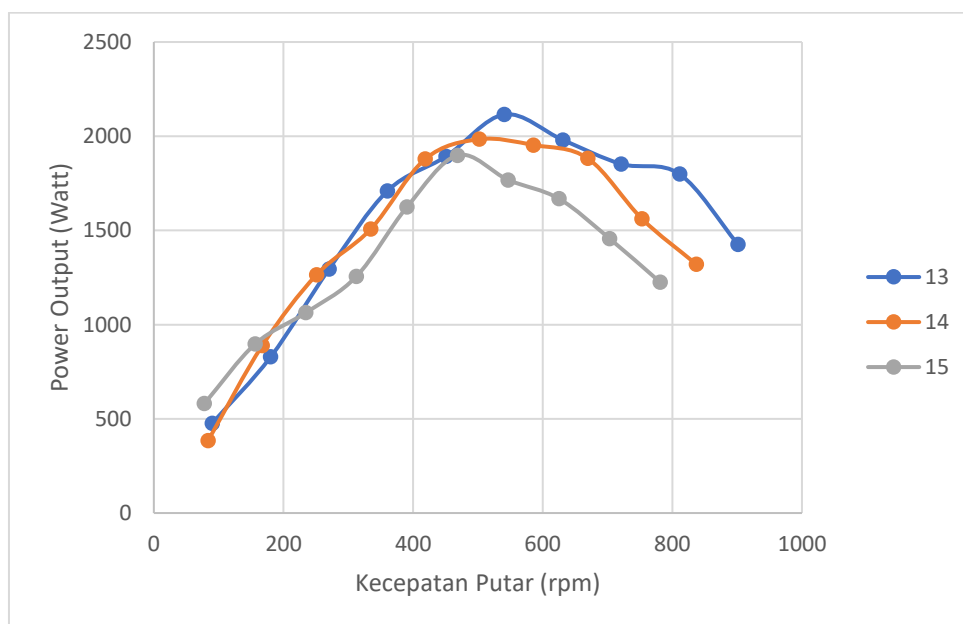
Parameter Motor	Variasi 1	Variasi 2	Variasi 3	Unit
Winding Turn	13	14	15	-
Path	2	2	2	-
Wire Gauge	SWG 21	SWG 21	SWG 21	-
Wire Dia	[0.8788,0.8128]	[0.8788,0.8128]	[0.8788,0.8128]	mm
Number Stranded	2	2	2	-
Conductor/Slot Drawn	52	56	60	-
Konfigurasi Gulungan				-



Gambar 5.7 Torsi- Kecepatan putar terhadap perubahan *winding turn*

Pada Gambar 5.7 terlihat dengan perubahan *winding turn* mempengaruhi torsi yang dihasilkan. Semakin banyak jumlah *winding turn* semakin besar pula

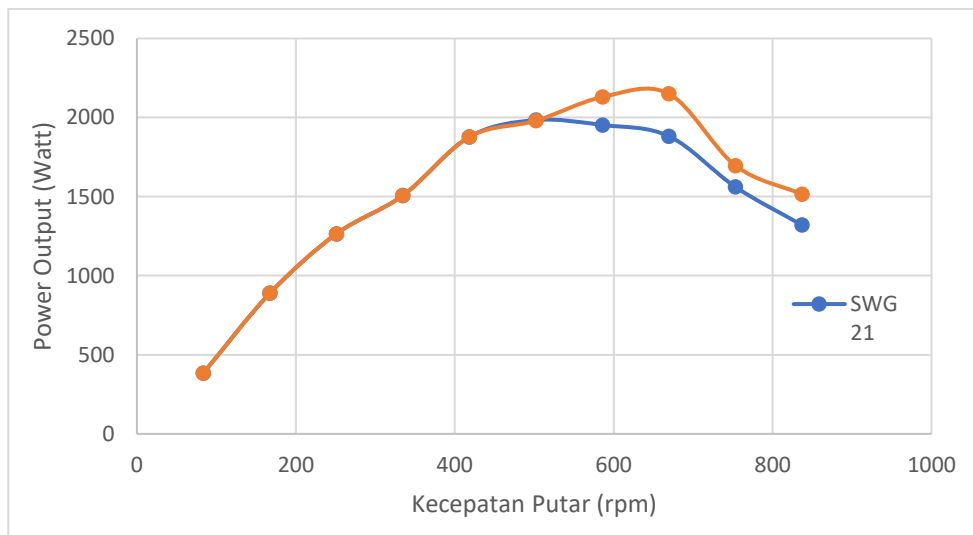
torsi yang dihasilkan. Pada *winding turn* 15 menghasilkan torsi sebesar 54,35 Nm pada kecepatan putar 78 -312 rpm. Namun besarnya torsi yang dihasilkan mengorbankan kecepatan putar yang dihasilkan. Dalam Gambar 5.8 menunjukkan besaran kecepatan putar yang dihasilkan paling rendah dibanding dengan variasi yang lainnya yaitu sebesar 781.97 rpm. Sehingga kecepatan putar yang dihasilkan tidak memenuhi kebutuhan traksi. Pada variasi *winding turn* 14 torsi yang dihasilkan sebesar 50,72 Nm pada pada kecepatan putar 83 – 400 rpm, dalam hal ini torsi yang dihasilkan sudah memenuhi dalam kebutuhan traksi dengan minimal torsi 48 Nm. Sehingga dalam pemilihan *winding turn* yang memenuhi kebutuhan traksi yaitu pada *winding turn* 14. Dikarenakan pada *winding turn* 13 torsi yang dihasilkan adalah 47 Nm yang belum memenuhi dalam torsi pada kebutuhan traksi dan untuk *winding turn* 15 kecepatan putarnya belum memenuhi 890 rpm sedangkan yang dihasilkan *winding turn* 15 yaitu 790 rpm. Gambar 5.8 memperlihatkan hasil daya output pada variasi *winding turn*.



Gambar 5.8 Power Output - Kecepatan putar terhadap perubahan Winding Turn

Pada penelitian Ratna melakukan pengujian tentang diameter kumparan untuk mendapatkan torsi yang maksimal. Dalam hasil penelitiannya menunjukkan bahwa penggunaan diameter kumparan tipe SWG 22 membuat torsi dan daya rata-rata motor listrik mencapai puncaknya. Diameter kumparan SWG 22 menghasilkan torsi dan daya paling optimal. (Ratna, 2019) Sehingga dalam pemilihan konfigurasi

gulungan untuk diameter kumparan menggunakan SWG 22 untuk di *wheelhub motor* yang digunakan. Diameter kawat tersebut lebih kecil dari sebelumnya yaitu SWG 21. Semakin besar tebal kawat tembaga yang digunakan maka semakin besar hambatan yang dihasilkan yang pada akhirnya memperbesar kerugian copper secara total dan berdampak pada tingginya kenaikan temperatur gulungan pada operasi torsi maksimum. Maka dari itu gulungan *wheelhub motor* dipilih menggunakan diameter tembaga yang lebih kecil dari desain awal. Sehingga konfigurasi yang digunakan dapat dijelaskan pada Tabel 5.3 dan dibuktikan dengan hasil simulasi yang bisa dilihat pada Gambar 5.9.



Gambar 5.9 Power output – Kecepatan Putar terhadap perubahan Diameter kawat

Tabel 5.3 Konfigurasi Gulungan pada *Wheelhub Motor*

Parameter Motor	WHM Referensi	WHM
Winding Turn	14	14
Path	2	2
Wire Gauge	SWG 21	SWG 22
Wire Dia	[0.8788,0.8128]	[0.7712,0.7012]
Number Stranded	2	3
Conductor/Slot Drawn	56	84

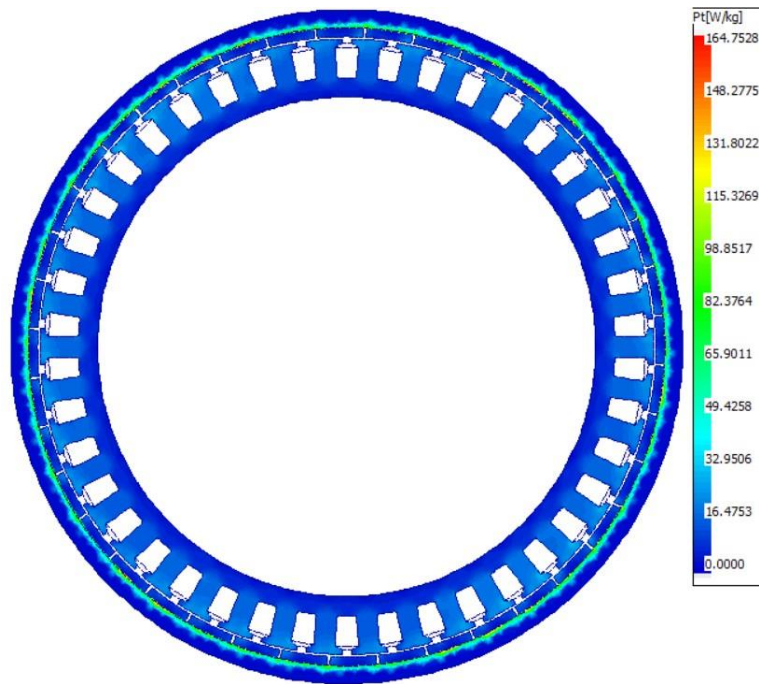
5.3 Kerugian pada operasi maksimum

Operasi torsi maksimum hanya dapat digunakan dalam waktu yang relatif singkat, hal ini dikarenakan oleh kenaikan temperatur yang rapid pada gulungan akibat suplai arus yang sangat besar untuk memproduksi torsi yang dibutuhkan. Operasi ini merupakan operasi kritis dari motor karena menentukan performa akselerasi dan kinerja saat menanjak. Pada desain WHM Optimum terlihat operasi torsi maksimum dapat dicapai dengan kisaran 50.72 Nm dengan durasi operasi ada pada rentang 0-450 RPM sehingga dilakukan simulasi untuk melakukan prediksi losses yang terjadi. Kerugian yang terjadi dapat dilihat pada Tabel 5.4.

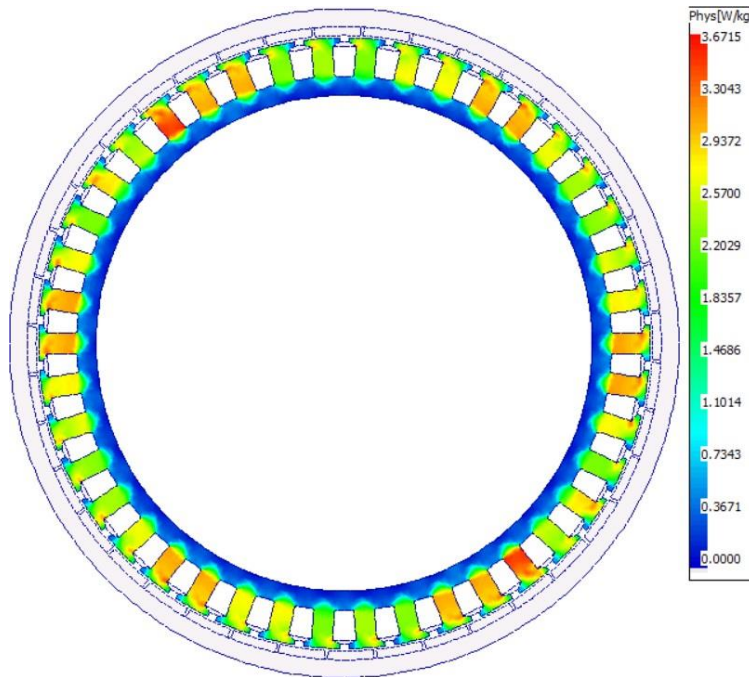
Tabel 5.4 Kerugian-kerugian pada operasi torsi maksimum

Tipe Kerugian	Nilai
<i>Armature DC CopperLoss (on load)</i>	341,3 Watts
<i>AC Copper Loss(Hybrid)(Total)</i>	0,3841 Watts
<i>Magnet Loss (on load)</i>	2,407 Watts
<i>Stator iron Loss [total](on load)</i>	21,44 Watts
<i>Rotor iron Loss [total](on load)</i>	7,813 Watts

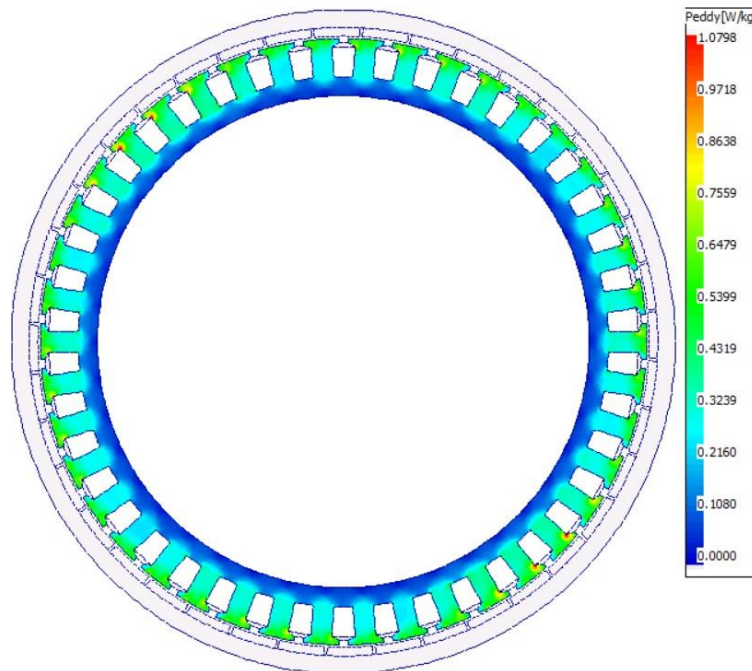
Kerugian-kerugian pada operasi ini lebih didominasi oleh kerugian *copper*. Kerugian inti pada stator dihitung sebesar 21.44 Watt yang disebabkan oleh *histerisis* dan *eddy current*, sedangkan pada rotor dihitung sebesar 7.813 Watt yang didominasi oleh *eddy current*.



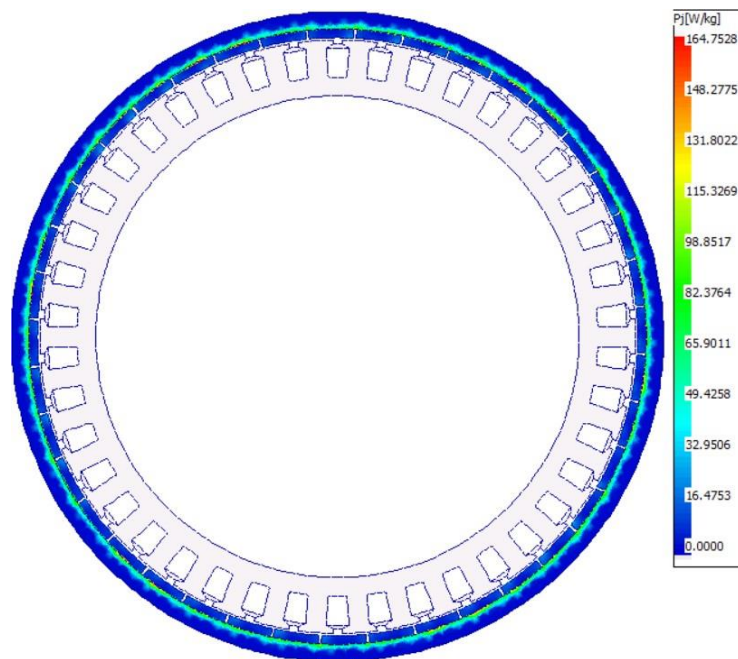
Gambar 5.10 Distribusi kerugian total *loss*



Gambar 5.11 Distribusi kerugian *histeris loss*



Gambar 5.12 Distribusi kerugian stator *eddy current*



Gambar 5.13 Distribusi kerugian rotor *eddy current*

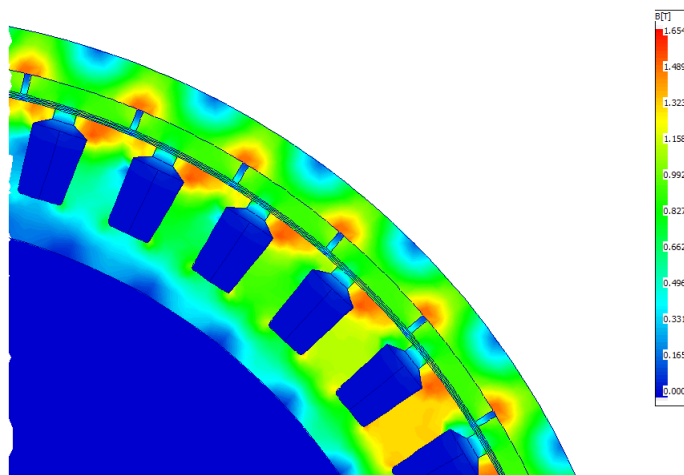
Gambar 5.10 menunjukkan total kerugian W/kg yang dihitung pada operasi ini, kerugian- kerugian ini disusun oleh beberapa kerugian seperti histerisis pada stator dan *eddy current* yang terjadi pada inti stator laminasi dan

rotor. Kerugian histeris diakibatkan oleh perubahan arah magnetisasi pada inti stator secara berulang-ulang yang mengakibatkan sebagian energi dirubah menjadi panas. Terlihat pada Gambar 5.11 kerugian histeris hanya terjadi pada stator dan terdistribusi merata. Puncak kerugian terhitung pada nilai 1,1014 Watt/kg terjadi pada leher gigi stator. Kerugian *eddy current* terjadi baik pada stator dan rotor akibat elektromagnetik yang membangkitkan arus pada material dimana kerugian ini dapat diminimalkan pada stator karena stator tersusun oleh lapisan lapisan sehingga memiliki penampang axial yang lebih kecil dibandingkan rotor yang solid. Sehingga pada Gambar 5.12 dan Gambar 5.13 menunjukkan nilai kerugian yang dominan terjadi pada rotor yakni kerugian *eddy current*.

5.4 Kerugian pada operasi kontinu

5.4.1 Kinerja Operasi Maksimum Distribusi Medan Magnet pada Operasi Kontinu (*Rate torque @800 RPM*)

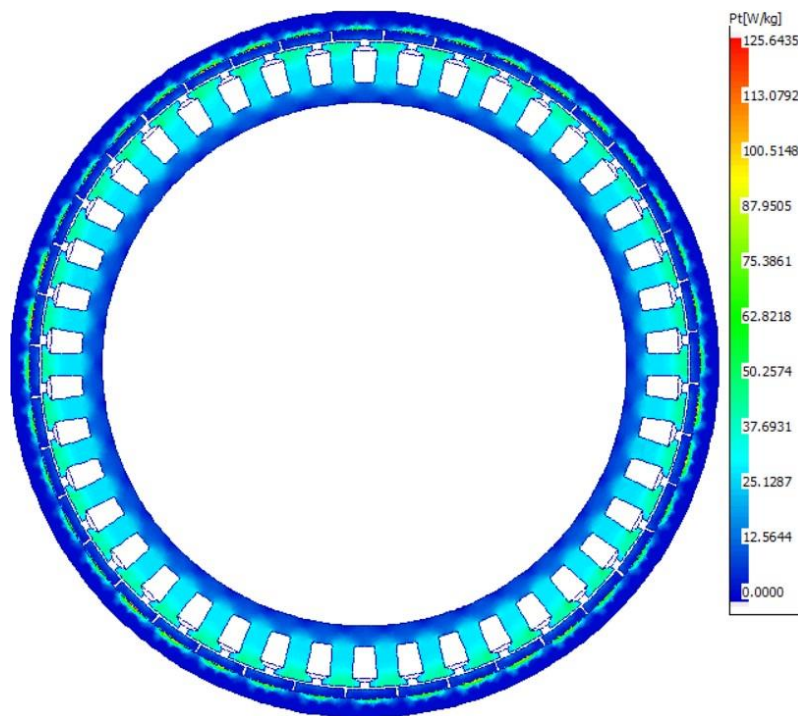
Pada operasi *on-load transient* pada operasi kontinyus dimana putaran motor sebesar 800 RPM dengan torsi sebesar $\pm 16,8$ Nm, puncak tertinggi *flux density*, yang bisa dilihat pada Gambar 5.14.



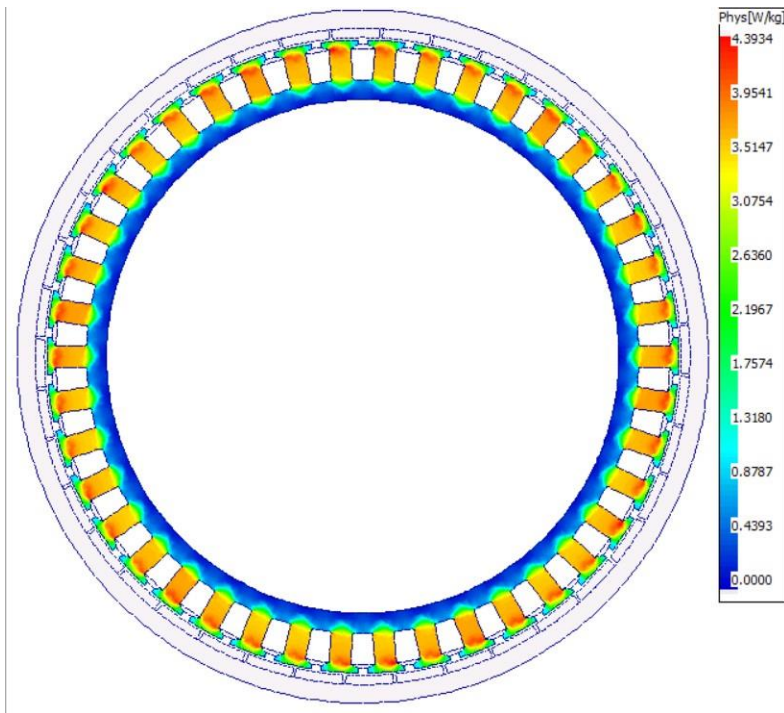
Gambar 5.14 Distribusi medan magnet WHM pada operasi *on load*

Tabel 5.5 Nilai kepadatan *flux* WHM referensi pada operasi kontinyus

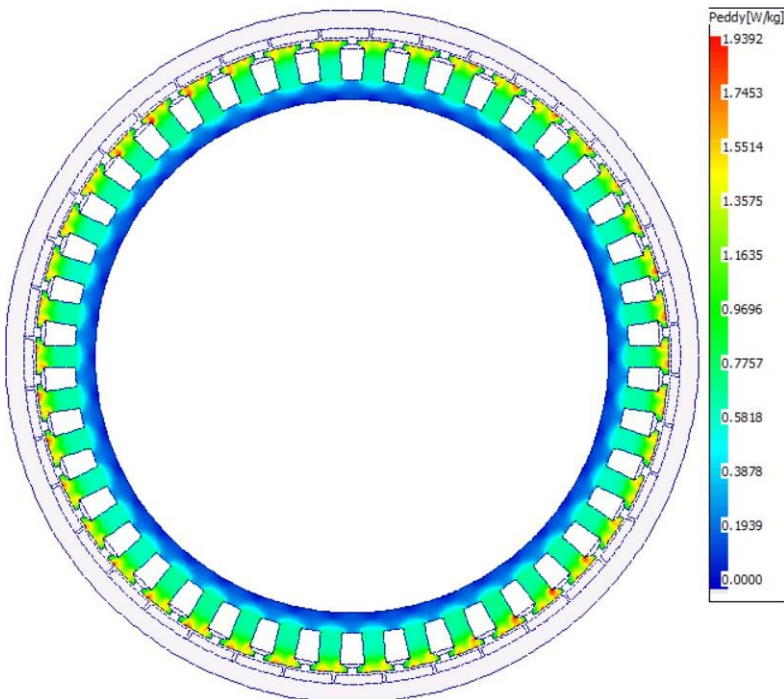
Keterangan	Nilai
<i>Airgap flux density(mean) Skewed</i>	0,7994 Tesla
<i>Airgap Flux Density(peak) Skewed</i>	1,195 Tesla
<i>Stator Tooth FluxDensity (peak)</i>	1,713Tesla
<i>Stator Tooth Tip Flux Density (peak)</i>	1,847Tesla
<i>Stator Back Iron Flux Density (peak)</i>	1,037Tesla
<i>Rotor Back Iron Flux Density (peak)</i>	1,308 Tesla



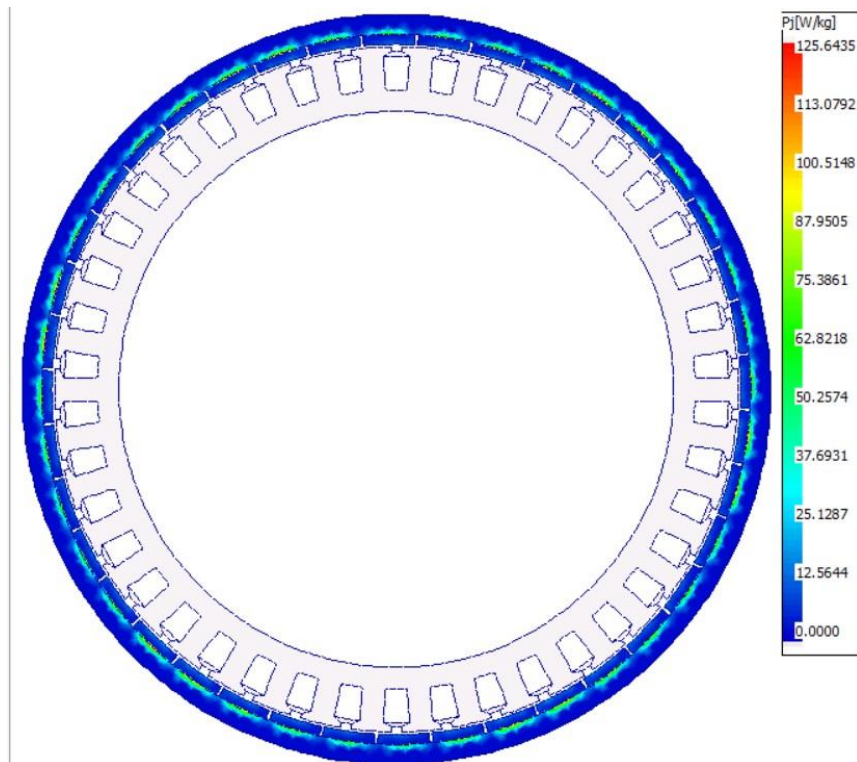
Gambar 5.15 Kerugian elektromagnetik WHM pada operasi kontinyus



Gambar 5.16 Kerugian elektromagnetik WHM pada operasi kontinu *hysteresis Loss*



Gambar 5.17 Kerugian elektromagnetik WHM pada operasi kontinu *lamination eddy current loss*



Gambar 5.18 Kerugian elektromagnetik WHM pada operasi kontinyus *eddy current*

Tabel 5.6 Kerugian yang terjadi

Type Kerugian	Nilai
<i>Armature DC CopperLoss (on load)</i>	87,61 Watts
<i>AC Copper Loss (Hybrid)(Total)</i>	0,3402 Watts
<i>Magnet Loss (on load)</i>	4,003 Watts
<i>Stator iron Loss [total](on load)</i>	60,24 Watts
<i>Rotor iron Loss [total](on load)</i>	9,211Watts

Terhitung sebesar 1.847 tesla yang terjadi di beberapa titik saturasi lokal seperti pada ujung gigi stator. Namun secara global *flux density* terdistribusi merata pada rentang 0.662 hingga 1.489 Tesla. Pada bagian rotor nilai *flux density* terdistribusi pada rentang yang lebih rendah dimana nilai maksimum hanya berkisar pada 1.037 Tesla, dimana nilai ini masih jauh dari titik saturasi *mild steel*.

Gambar 5.15 menunjukkan kontur kerugian-kerugian yang terjadi pada motor pada mode *on load-transient* yang terdiri dari kerugian akibat histerisis dan *eddy current* yang terjadi pada inti laminasi stator dan solid rotor serta magnet. Kerugian-kerugian ini diukur dalam satuan W/kg. Kerugian yang diakibatkan oleh *histerisis* ditunjukkan pada Gambar 5.16 dimana kerugian ini didominasi dan terdistribusi secara merata pada inti laminasi gigi stator. Nilai kerugian tertinggi berada pada rentang 3.074 hingga 3.954 Watt/kg, kerugian akibat histerisis ini disebabkan oleh proses magnetisasi dan demagnetisasi secara berulang pada inti stator. Saat arus diberikan ke arah positif maka memicu gaya magnet yang mencoba menyearahkan orientasi molekul-molekul dari magnetik material ke arah yang sama. Namun ketika arus yang dialirkan berlawanan arah maka begitu juga dengan arah gaya magnetik namun molekul-molekul magnetik ini tidak bisa merubah arahnya seketika, akibat gesekan yang terjadi secara internal, sehingga gesekan ini akan melawan gaya magnetik yang mencoba untuk merubah arahnya, fenomena ini dinamakan *histerisis* magnet. Sebagian gaya magnetik yang diberikan akan digunakan untuk melawan gesekan internal ini dan berubah menjadi panas. Apabila dikaji melalui Gambar 5.16 terlihat bahwa kerugian ini hanya terjadi pada inti stator dimana proses magnetisasi dan demagnetisasi secara elektromagnetik dengan mengalirkan arus pada koil-koil yang tersusun menjadi gulungan. Kerugian *eddy current* disebabkan oleh medan magnet yang berputar dan membangkitkan tegangan balik atau EMF. Terjadinya *EMF* memicu sirkulasi arus pada material konduktor arus ini yang disebut *eddy current*, apabila inti motor terbuat dari solid material dengan luas penampang yang besar maka kerugian yang ditimbulkan juga besar.

Pada Gambar 5.17 dan Gambar 5.18 menunjukkan distribusi kerugian pada material inti stator dan material rotor. Kerugian *eddy current* pada material inti relatif lebih rendah dengan maksimum hanya sebesar 1.3575 W/kg, hal itu disebabkan oleh hambatan pada konduktor sangat besar jika memiliki luas penampang yang kecil. Tidak seperti pada rotor, WHM referensi memiliki tipe rotor yang terbuat dari material solid, sehingga kerugian *eddy current* sangat besar hingga mencapai puncak sebesar 125 W/kg pada beberapa titik aktif. Selain itu

eddy current juga terjadi pada magnet sehingga berpotensi akan terjadinya proses demagnetisasi ketika temperatur semakin tinggi.

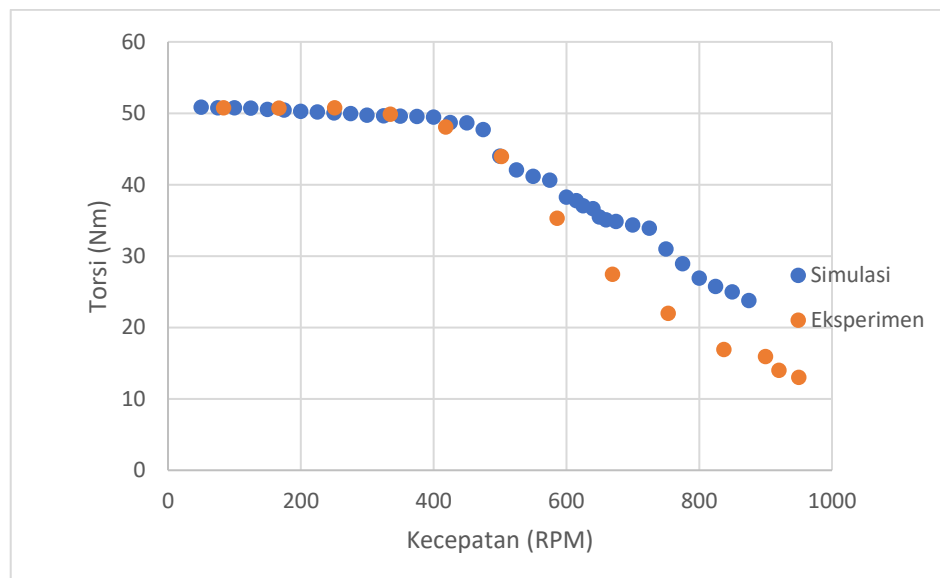
[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 6

PENGUJIAN INWHEELHUB MOTOR

6.1 Pengujian *Eksperimen Inwheelhub Motor*

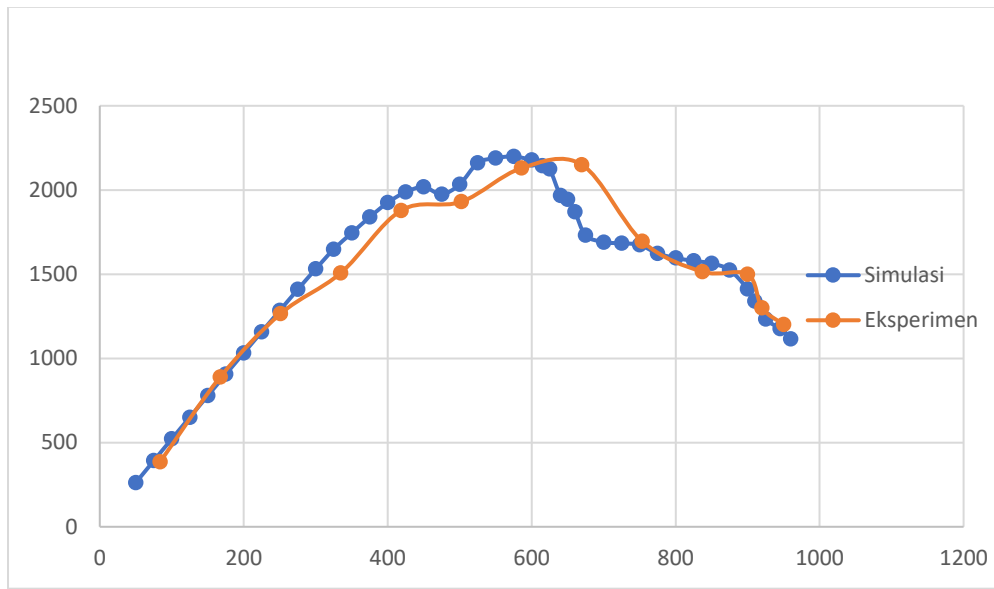
Setelah melakukan pengujian simulasi yang dilakukan hasil tersebut diterapkan pada prototype dan dilanjutkan pengujian eksperimen. Pengujian *eksperimen* dari WHM merupakan hasil dari pengembangan *inwheelhub* motor sebelumnya. Pengujian ini dilakukan untuk melakukan validasi data dari hasil simulasi dengan eksperimen.



Gambar 6.1 Torsi terhadap kecepatan putar

Gambar 6.1 menjelaskan torsi puncak pada *base speed* 50 RPM adalah sebesar 50,829 Nm, dimana area kinerja torsi konstan ini relatif singkat. Pada area tenaga konstan pada range kecepatan putar 50 – 475 rpm, kemudian terlihat torsi perlahan-lahan turun seiring dengan kecepatan motor yang bertambah. Pada area ini nilai *back-EMF* atau voltase bangkitan balik juga akan semakin besar karena voltase ini nilainya proporsional dengan pertambahan kecepatan, sehingga berdampak pada terhambatnya arus yang bisa disuplai kontroler, dimana besar arus proporsional dengan torsi yang dapat dihasilkan oleh motor. Hasil eksperimen dengan pengujian *independent* mendekati dengan hasil simulasi yang didapatkan dengan

menggunakan *controller* 50 amper. Tenaga maksimal yang didapatkan sebesar 960 rpm dengan voltase 72 volt. Akan tetapi pada kurva torsi- tenaga memiliki perbedaan pada kecepatan putar. Hal ini dikarenakan terjadi *field weakening* pada *controller* sehingga dapat meningkatkan kecepatan putar pada *inwheelhub* motor (Yuniarto,2019).



Gambar 6.2 Power Output terhadap kecepatan putar

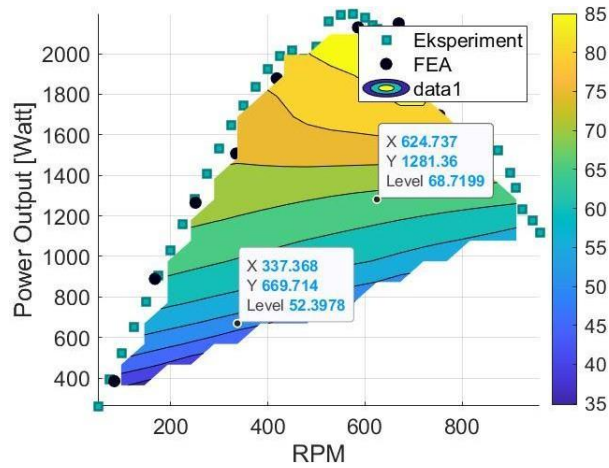
Berdasarkan Gambar 6.2 kedua grafik tersebut, terlihat bahwa pola karakteristik kecepatan dan power antara simulasi dan prototipe memiliki pola yang sama. Pada grafik tersebut juga terlihat peak power yang didapatkan sekitar 2198,82 watt pada kecepatan putar 575 rpm. Setelah pada kecepatan putar 575 rpm terlihat power output perlahan-lahan turun seiring dengan kecepatan motor yang bertambah dikarenakan limit yang bisa diterima pada *inwheelhub* motor .

Terdapat perbedaan pada nilai daya maksimal, torsi maksimal, dan kecepatan putar. Selisih nilai tersebut ditampilkan pada tabel berikut.

Tabel 6.1 Perbandingan Simulasi dan Eksperimen

Nama	Simulasi	Eksperimen	Error
Peak Torsi (Nm)	50,72	50,83	1%
Peak Power Output (Watt)	2257	2358	4%
Peak Kecepatan Putar (rpm)	865	960	8%

Gambar 6.3 menunjukkan peta efisiensi yang diplotkan menggunakan perangkat lunak Matlab. Efisiensi tertinggi yang mampu dicapai adalah sebesar 80- 90% pada putaran tinggi di rentang 400- 800 RPM. Pada hasil peta efisiensi tersebut juga terlihat peningkatan efisiensi pada *inwheelhub* sebelumnya yang effisiensinya sekitar 80- 82% pada kecepatan putar di rentang 250- 350 RPM.



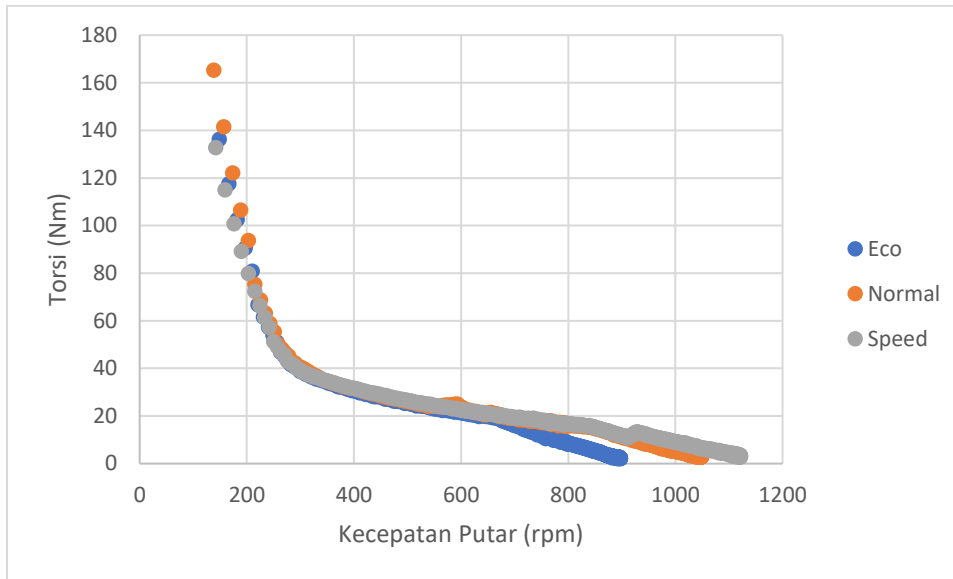
Gambar 6.3 Mapping Matlab Efisiensi

6.2 Dynotest

Dalam pengujian *dyno* dari elektrik skuter eksisting terdapat 3 tahap akuisisi data yang dilakukan secara berurut dimulai dari mode *eco*, *ride* dan *sport*. Proses pengujian dilakukan pada lab. STP ITS dapat dilihat pada Gambar 6.4 sebagai berikut.



Gambar 6.4 Proses Pengujian Dynotest



Gambar 6.5 Pengujian dynotest (a) mode eco, (b) mode normal, (c) mode speed

Gambar 6.5 menunjukkan kurva kecepatan *versus* tenaga-torsi dan kurva kecepatan *versus* power output, yang digabungkan menjadi satu ditiap mode. Perbedaan performa sangat jelas teridentifikasi dimana kecepatan maksimum yang ditawarkan dari mode *eco* sampai *sport* berturut-turut sebesar 897, 1048, dan 1112 rpm. Puncak torsi awalan untuk berakselerasi juga memiliki perbedaan di semua mode kecepatan. Nilai perubahan mode *eco* sampai *sport* berturut turut sebesar 136 Nm, 145 Nm dan 132 Nm.

BAB 7

KESIMPULAN

6.3 Kesimpulan

Dari hasil pembahasan dari bab 4,5,6 maka dapat ditarik kesimpulan seperti berikut.

1. Desain Inwheelhub dari Kebutuhan Traksi

Desain Inwheelhub didasari oleh Kebutuhan traksi force dengan torsi 48 Nm pada slope 20% dengan torsi continuss 18 Nm. Dan kecepatan maksimal yaitu 60 km/h atau 897 rpm sesuai dengan peraturan kementrian perhubungan nomor PM 44 tahun 2020 pasal 3. Desain yang dipilih adalah desain inwheelhub yang dilakukan optimasi dengan menggunakan ANN.

2. Pengembangan

• Airgap

Pada desain sebelumnya mengalami *misalignment* yang memicu gaya gesekan antar stator dengan magnet sehingga berpotensi menimbulkan menghilangkan sifat magnet dan menyumbang *mechanical losses*. Sehingga melakukan perubahan *airgap* dan mendapat variasi *airgap* yaitu 0,8

• Winding Turn

Karena desain *inwheelhub* sebelumnya memiliki kekurangan kebutuhan torsi dengan daya 2000 watt, sehingga dilakukan peningkatan torsi melalui *winding turn* dengan rumus jurnal referensi dan mendapatkan torsi yang sesuai kebutuhan yaitu winding turn 14 dengan nilai sebesar 50,72 Nm pada kecepatan putar 83 – 400 rpm . Namun peningkatan torsi juga ada hal yang dikorbankan yaitu kecepatan putar desain *inwheelhub* motor.

• Diameter Kawat

Pemilihan diameter kawat ini dilakukan untuk mendapatkan torsi yang maksimal. Dalam hasil penelitiannya menunjukkan bahwa penggunaan diameter kumparan tipe SWG 22 membuat torsi dan daya rata-rata motor listrik mencapai puncaknya. Diameter kumparan SWG 22 menghasilkan

torsi dan daya paling optimal, hal itu juga dibuktikan dengan perbandingan dengan diameter kawat sebelumnya yaitu SWG 21 melalui hasil simulasi motorcad.

3. Pengujian Eksperimen

Pengujian indenpendent dilakukan sebagai perbandingan hasil simulasi dengan ekseperimen. Pengujian indenoedent ini menggunakan dengan power supply sebesar 72 volt dan menggunakan controller 50 amper dengan menyesuaikan spesifikasi produk eksisting. Hasil yang didapat yaitu dengan torsi maksimal 50,8 Nm dengan kecepatan putar 960 rpm. Pada pola grafik antara eksperimental dengan simulasi sudah sesuai namun ada perbedaan pada kecepatan putar maksimal dikarenakan terjadi operasi *field weakening* yang mampu meningkatkan kecepatan motor.

4. Pengujian Dynotest

Pengujian dynotest dilakukan di SPT ITS dengan melakukan 3 mode yaitu mode *eco*, normal dan *speed*. Hasil data yang didapat semakin mode ditingkatkan semakin tinggi kecepatan putar yang dihasilkan. Kecepatan tertinggi pada mode speed yaitu 1112 rpm. Namun semakin tinggi kecepatan putar yang didapatkan torsi puncak juga semakin rendah.

6.4 Saran

1. Melakukan Pengembangan penelitian Analisa pengaruh panas pada performa dan efisiensi pada inwheelhub motor.
2. Melakukan pengembangan pada prototype melalui perubahan desain stator agar meningkatkan efisiensi inwheelhub motor
3. Melakukan Pengembangan Controller dengan menyesuaikan mapping efisiensi motor BLDC

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR PUSTAKA

- Ajamloo, A. M., Ghaheri, A. and Afjei, E. (2019) 'Multi-objective Optimization of an Outer Rotor BLDC Motor Based on Taguchi Method for Propulsion Applications', *2019 10th International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference, PEDSTC 2019*, pp. 34–39. doi: 10.1109/PEDSTC.2019.8697586.
- Andrada, P., Torrent, M. and Perat, J. I. (2004) 'Power Losses in Outside-Spin Brushless DC Motors Power Losses in Outside-Spin Brushless D . C . Motors Key words', (April). doi: 10.24084/repqj02.320.
- Bianchi, N., Bolognani, S. and Zigliotto, M. (2001) 'High-performance PM synchronous motor drive for an electrical scooter', *IEEE Transactions on Industry Applications*, 37(5), pp. 1348–1355. doi: 10.1109/28.952510.
- Carunaiselvane.C, S. J. (2012) 'Generalized Procedure for BLDC Motor Design and Substantiation in', pp. 18–25.
- Chung, S. *et al.* (2015) 'Development of a 20Pole-24Slot SPMSM with Consequent Pole Rotor for In-Wheel Direct Drive', 0046(c). doi: 10.1109/TIE.2015.2472375.
- Cuadrado, J. *et al.* (2015) 'A Multibody Model to Assess the Effect of Automotive Motor In-wheel Configuration on Vehicle Stability and Comfort A Multibody Model to Assess the Effect of Automotive Motor In-wheel Configuration on Vehicle Stability and Comfort', (July).
- Dal, O., Yildirim, M. and Kurum, H. (2019) 'Optimization of Permanent Magnet Synchronous Motor Design by Using PSO', *Proceedings - 2019 4th International Conference on Power Electronics and their Applications, ICPEA 2019*, (September), pp. 25–27. doi: 10.1109/ICPEA1.2019.8911192.
- David E. Rumelhart, Geoffrey E. Hinton, R. J. W. (1986) 'Learning representations by back-propagating errors David', *Computer Science, Nature*, 114(2), pp. 102–108. doi: 10.1016/j.measurement.2017.09.025.

Fodorean, D., Idoumghar, L. and Szabó, L. (2013) ‘Motorization for an electric scooter by using permanent-magnet machines optimized based on a hybrid metaheuristic algorithm’, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 62(1), pp. 39–49. doi: 10.1109/TVT.2012.2215970.

Gieras, J. F. (2010) *Permanent Magnet Motor Technology Design and Applications*, Taylor & Francis Group, LLC.

Gruber, W., Bäck, W. and Amrhein, W. (2011) ‘Design and implementation of a wheel hub motor for an electric scooter’, *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2011*, pp. 1–6. doi: 10.1109/VPPC.2011.6043139.

Harus, G. (2020) ‘Pengembangan Motor BLDC 100KW dengan Coaxial Magnetic Gear (CMG) Terintegrasi untuk Sistem Transmisi Daya Bus Listrik’.

Holland, J. H. (1957) ‘ADAPTATION IN NATURAL An Introductory Analysis with Applications to Biology’, p. 3 pages.

Kumar, M. S. and Revankar, S. T. (2017) ‘Development scheme and key technology of an electric vehicle: An overview’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70(December), pp. 1266–1285. doi: 10.1016/j.rser.2016.12.027.

Lee, J. Y. *et al.* (2017) ‘In-wheel motor design for an electric scooter’, *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 12(6), pp. 2307–2316. doi: 10.5370/JEET.2017.12.6.2307.

Lei, G. *et al.* (2017) ‘A review of design optimization methods for electrical machines’, *Energies*, 10(12). doi: 10.3390/en10121962.

Motors, B. P., Koh, C. S. and Seol, J. (2003) ‘New Cogging-Torque Reduction Method for’, *IEEE Transactions on Magnetics*, 39(6), pp. 3503–3506.

Qinghua, L., Jabbar, M. A. and Khambadkone, A. M. (2004) ‘Response surface methodology based design optimisation of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors for wide-speed operation’, *IEE Conference Publication*, 2(6), pp. 546–551. doi: 10.1049/cp:20040346.

Sadrossadat, S. A. and Rahmani, O. (2020) ‘ANN-based method for parametric

modelling and optimising efficiency, output power and material cost of BLDC motor', *IET Electric Power Applications*, 14(6), pp. 951–960. doi: 10.1049/iet-epa.2019.0686.

Van Schalkwyk, D. J. and Kamper, M. J. (2006) 'Effect of hub motor mass on stability and comfort of electric vehicles', *2006 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2006*. doi: 10.1109/VPPC.2006.364297.

Shenoy, K. L. and Kumar, M. S. (2016) 'Design topology and electromagnetic field analysis of Permanent Magnet Brushless DC motor for electric scooter application', *International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques, ICEEOT 2016*, pp. 1541–1545. doi: 10.1109/ICEEOT.2016.7754942.

Shu, Z. *et al.* (2017) 'Electromagnetic performance evaluation of an outer-rotor flux-switching permanent magnet motor based on electrical-thermal two-way coupling method', *Energies*, 10(5). doi: 10.3390/en10050677.

Skaar, S. E., Krovel, O. and Nilssen, R. (2006) 'Distribution, coil-span and winding factors for PM machines with concentrated windings', *XVII International Conference on Electrical Machines, ICEM 2006*, p. 346. doi: 10.1016/j.jsr.2011.12.001.

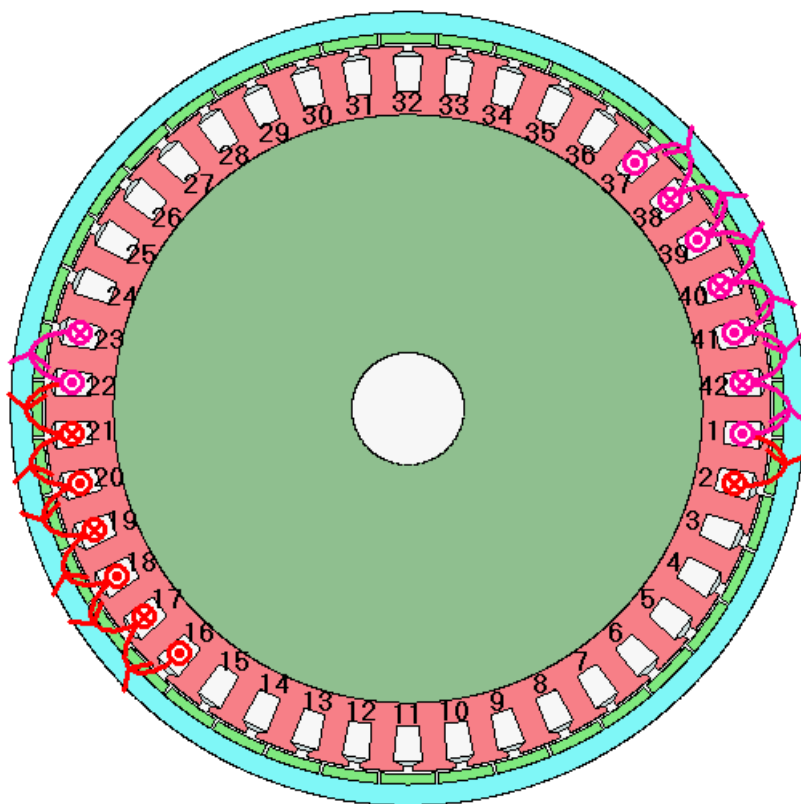
Song, B. M., Chang, K. C. and Choi, J. Y. (2010) 'Design of an outer-rotor-type permanent magnet motor for electric scooter propulsion systems', *2010 International Power Electronics Conference - ECCE Asia -, IPEC 2010*, pp.

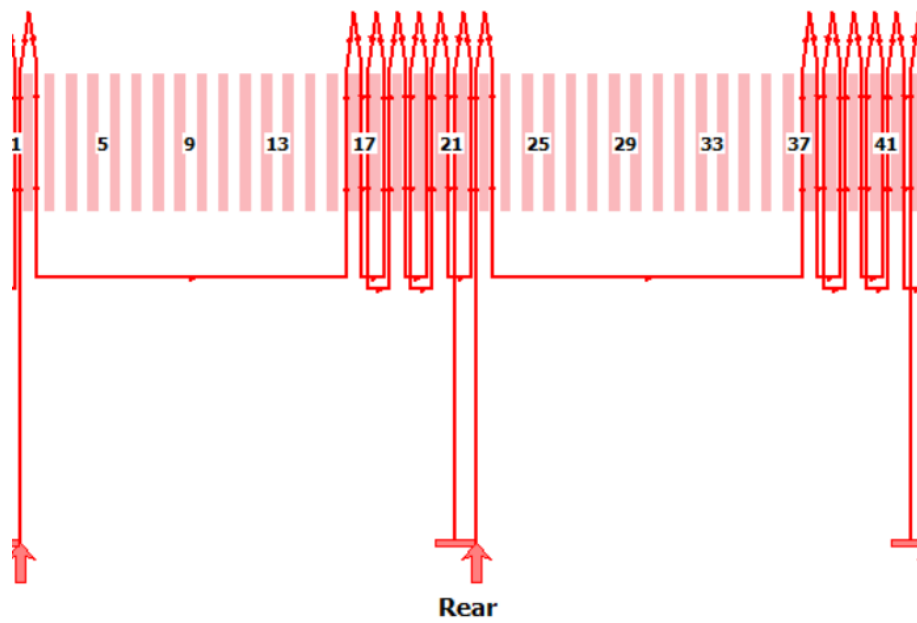
Ida Bagus Putu Putra Mahartana.(2021) 'Pengembangan *In-Wheelhub Brushles DC Motor* sebagai Sistem *Powertrain* pada Skuter Elektrik.

Lampiran 1

1. Alur Penggulungan
Alur Penggulungan Phasa A WHM

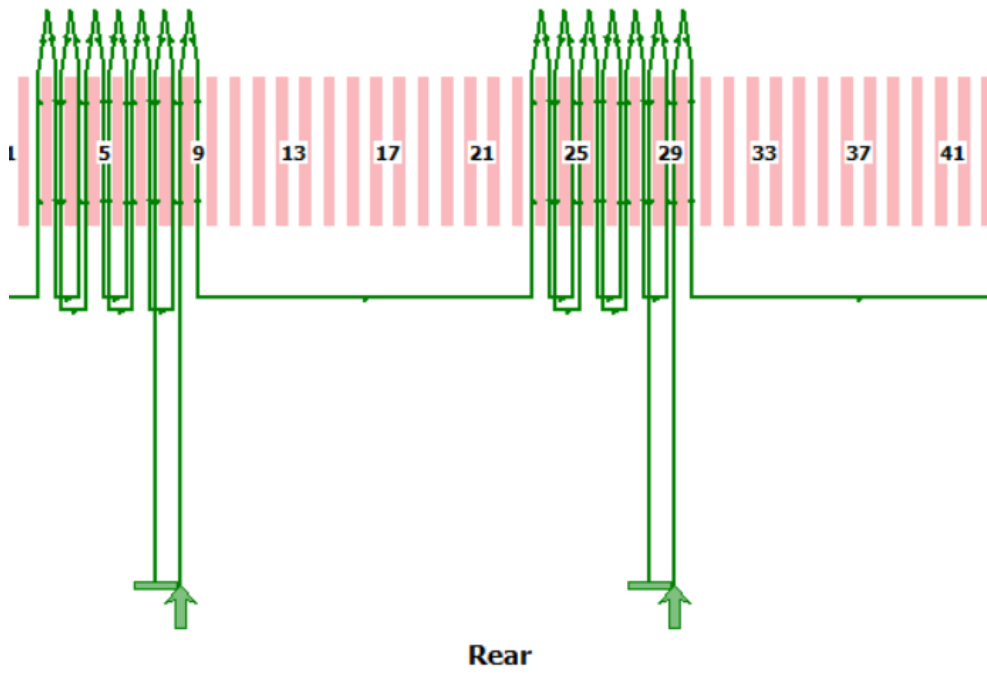
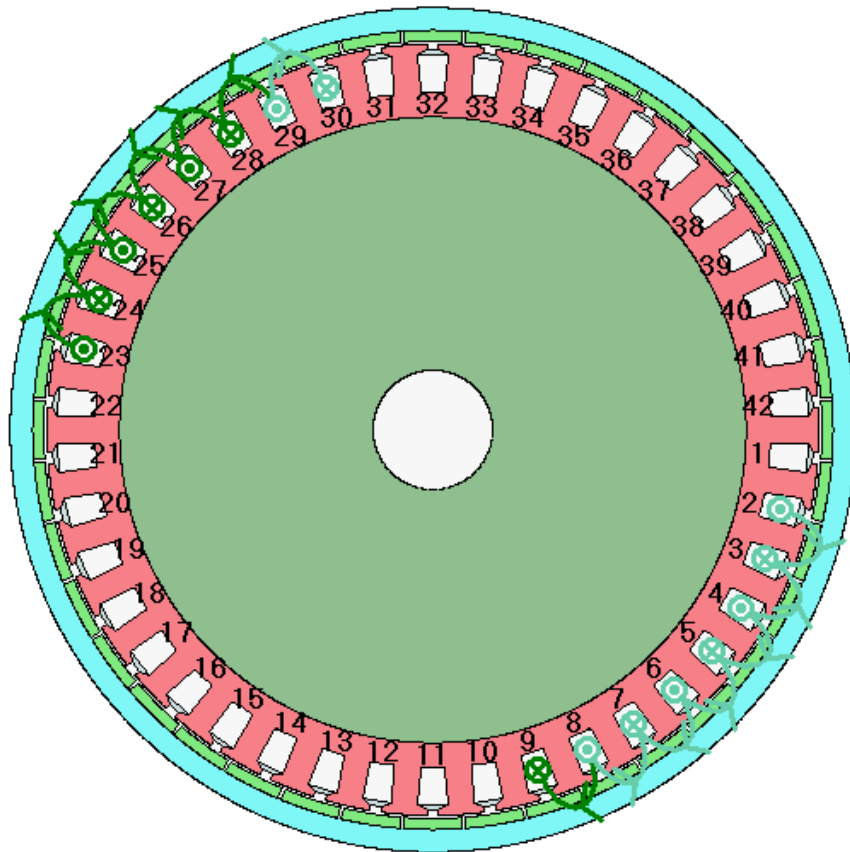
Coil	Path	Go Slot	Return Slot	Throw	Turns
1	1	1	2	1	14
2	1	16	17	1	14
3	1	18	17	-1	14
4	1	18	19	1	14
5	1	20	19	-1	14
6	1	20	21	1	14
7	1	22	21	-1	14
1	2	22	23	1	14
2	2	37	38	1	14
3	2	39	38	-1	14
4	2	39	40	1	14
5	2	41	40	-1	14
6	2	41	42	1	14
7	2	1	42	-1	14





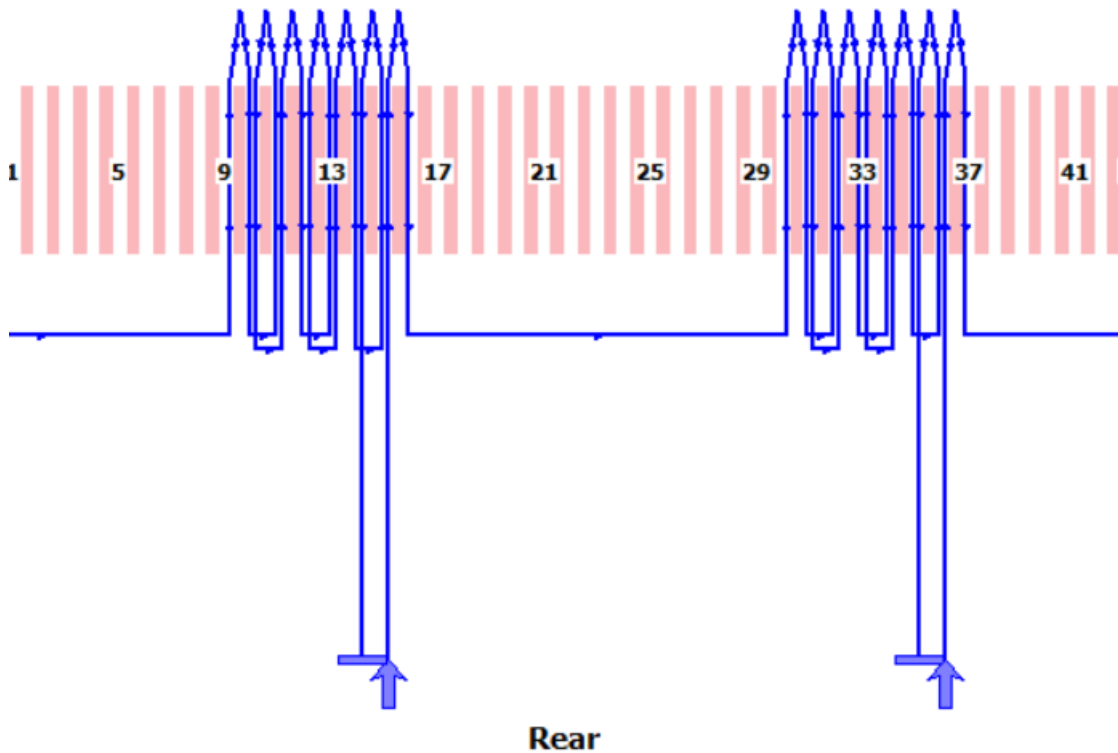
Alur Penggulungan Phasa B WHM

Coil	Path	Go Slot	Return Slot	Throw	Turns
1	1	8	9	1	14
2	1	23	24	1	14
3	1	25	24	-1	14
4	1	25	26	1	14
5	1	27	26	-1	14
6	1	27	28	1	14
7	1	29	28	-1	14
1	2	29	30	1	14
2	2	2	3	1	14
3	2	4	3	-1	14
4	2	4	5	1	14
5	2	6	5	-1	14
6	2	6	7	1	14
7	2	8	7	-1	14



Alur Penggulungan Phasa C WHM

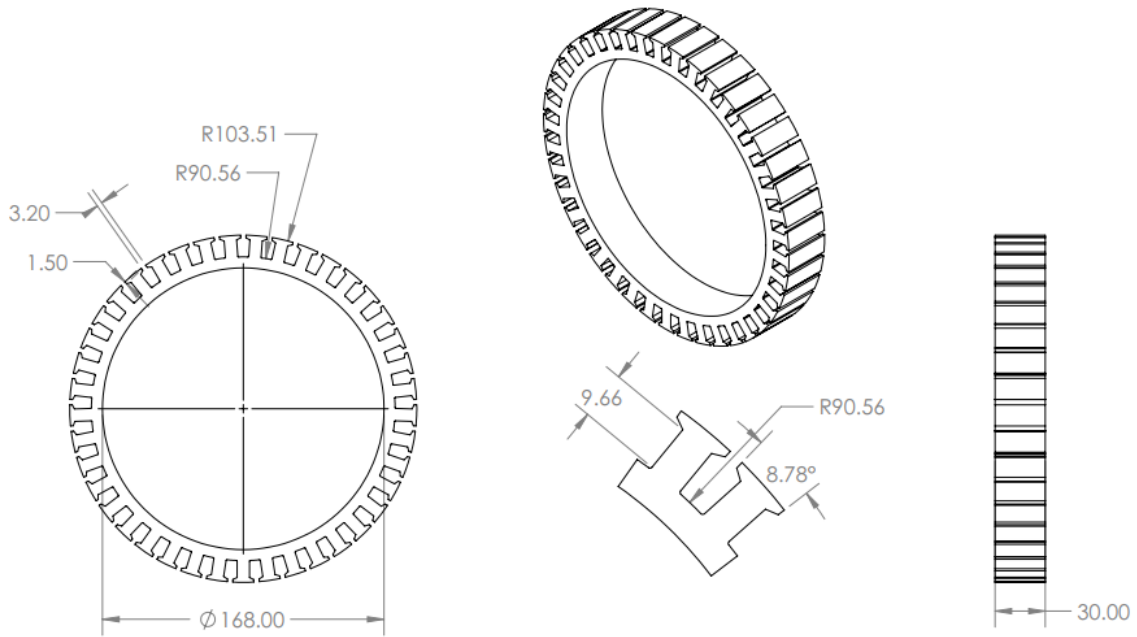
Coil	Path	Go Slot	Return Slot	Throw	Turns
1	1	15	16	1	14
2	1	30	31	1	14
3	1	32	31	-1	14
4	1	32	33	1	14
5	1	34	33	-1	14
6	1	34	35	1	14
7	1	36	35	-1	14
1	2	36	37	1	14
2	2	9	10	1	14
3	2	11	10	-1	14
4	2	11	12	1	14
5	2	13	12	-1	14
6	2	13	14	1	14
7	2	15	14	-1	14





Lampiran 2

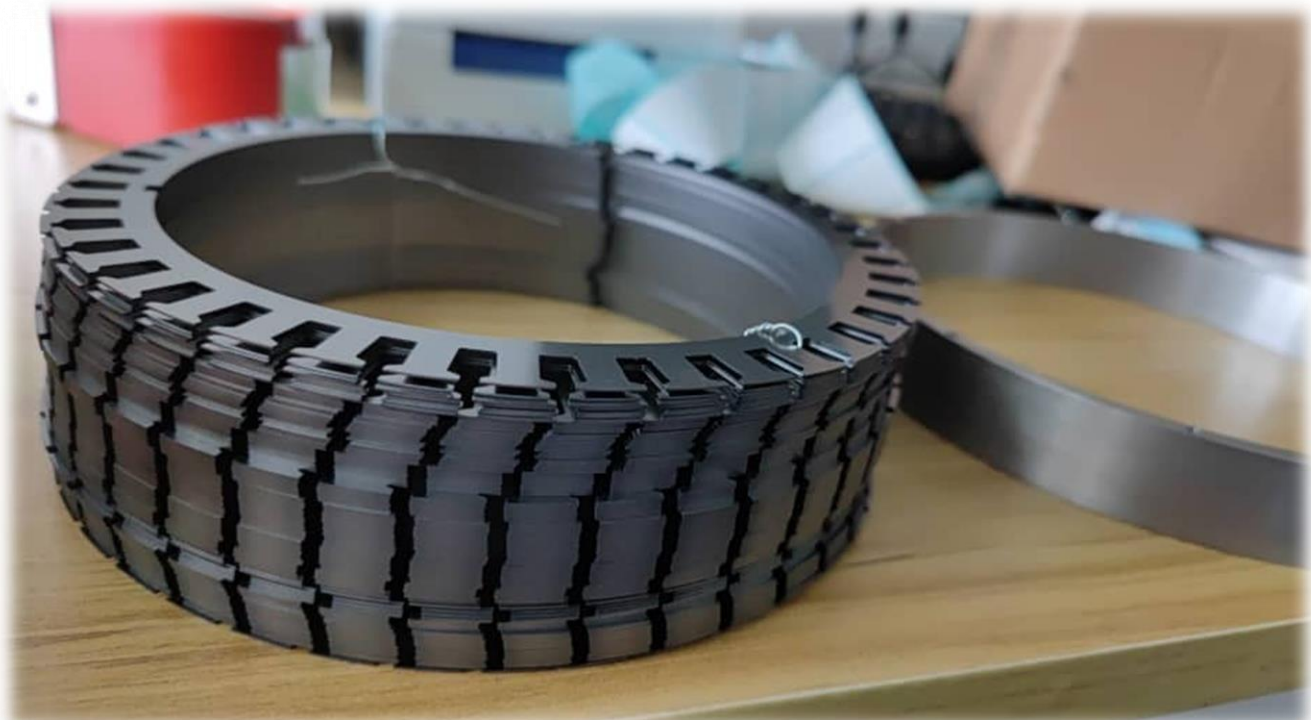
Desain Fabrikasi Stator



PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL
 THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

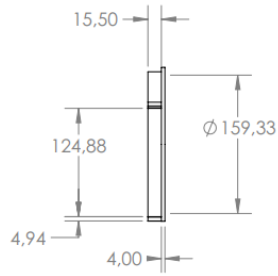
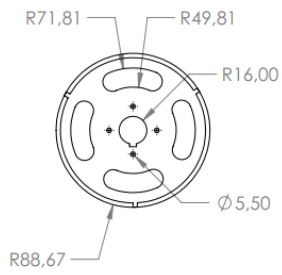
		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:	NAME	DATE
		DIMENSIONS ARE IN INCHES	DRAWN	
		TOLERANCES:	CHECKED	
		FRACTIONAL ±	ENG APPR.	
		ANGULAR: MACH ± BEND ±	MFG APPR.	
		TWO PLACE DECIMAL ±	Q.A.	
		THREE PLACE DECIMAL ±	COMMENTS:	
		INTERPRET GEOMETRIC TOLERANCING PER:		
		MATERIAL		
NEXT ASSY	USED ON	FINISH		
APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING		

TITLE:		
SIZE	DWG. NO.	REV
A	StatorLamination	
SCALE: 1:2	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1



Lampiran 3

Desain Fabrikasi Mounting

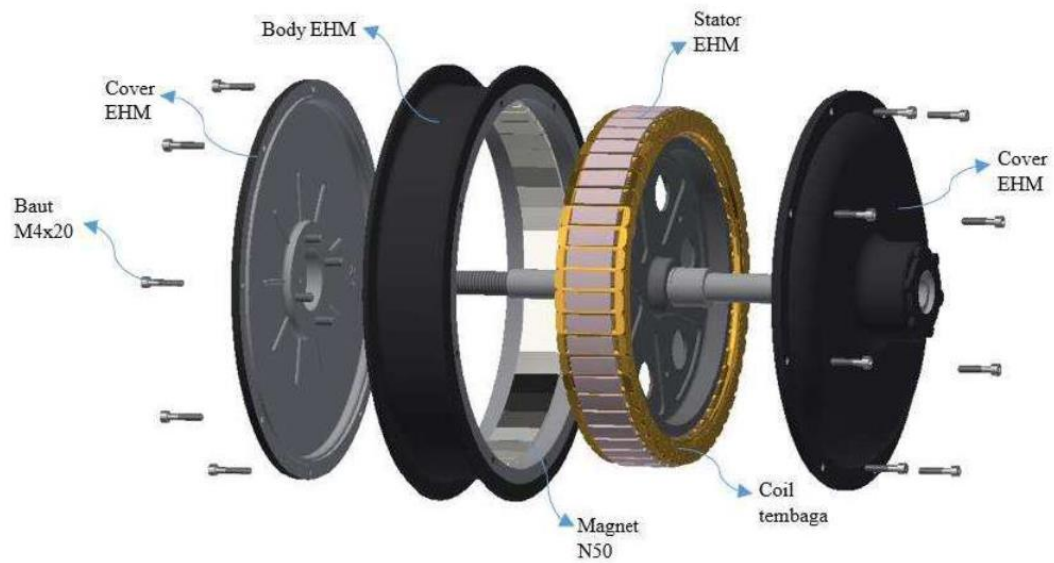


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:	DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
	NAME	SIGNATURE	DATE			TITLE:	
DRAWN							
CHK'D							
APP'VD							
MFG							
QA					MATERIAL:	DWG NO. mounting kanan A4	



Lampiran 4

Desain Fabrikasi Assembly



Lampiran 5

No	rpm	P in (W)	P out (W)	Torsi (N/m)	Effisiensi (%)
1	50	753,04	261,95	50,829	34,786
2	75	884,46	392,01	50,732	44,322
3	100	1011,3	521,79	50,728	51,596
4	125	1129,1	650,33	50,681	57,598
5	150	1254,2	778,15	50,539	62,044
6	175	1382,5	905,5	50,411	65,499
7	200	1511,2	1031,9	50,272	68,287
8	225	1640,6	1158	50,146	70,582
9	250	1770,5	1283,8	50,039	72,512
10	275	1900,1	1409,1	49,931	74,16
11	300	2024,9	1530,9	49,73	75,605
12	325	2143,6	1648,4	49,634	76,899
13	350	2229,3	1844,1	49,584	78,233
14	375	2317	1939	49,53	79,372
15	400	2394,1	1955,2	49,46	80,413
16	425	2439	1988,1	48,672	81,515
17	450	2439,3	2017,4	48,651	82,705
18	475	2445,4	2154,9	47,703	84,202
19	500	2446,6	2233,9	43,955	86,411
20	525	2445,4	2219,97	42,031	88,328
21	550	2439,5	2289,64	41,172	89,758
22	575	2430,8	2358,82	40,596	90,457
23	600	2425,9	2277,44	38,25	89,758
24	615	2389,9	2243,07	37,74	89,672
25	625	2375,7	2124,46	37,04	89,425
26	640	2215,6	2066,47	36,64	88,756
27	650	2201,9	1984,89	35,45	88,328
28	660	2164,5	1870,36	35,04	86,411
29	675	2032,8	1730,92	34,84	85,15
30	700	1994,6	1690,22	34,32	84,74
31	725	1991	1683,58	33,87	84,56

No	rpm	P in (W)	P out (W)	Torsi (N/m)	Effisiensi (%)
32	750	1989,5	1673,56	30,97	84,12
33	775	1987,4	1622,71	28,89	81,65
34	800	1967	1596,41	26,88	81,16
35	825	1961,3	1579,04	25,75	80,51
36	850	1960,6	1564,56	24,96	79,8
37	875	1956,8	1524,34	23,75	77,9
38	900	1955,6	1412,72	22,75	72,24
39	910	1952,6	1339,28	22,32	68,59
40	925	1940,6	1233,83	21,87	63,58
41	945	1931,5	1175,51	21,42	60,86
42	960	1918,7	1155,53	20,68	58,14

BIOGRAFI PENULIS



Penulis lahir di Surakarta, 27 Juni 1995. Putra pertama dari pasangan Prof Dr Ir H Edi Purwanto M,Sc. dan Dra Hj Rosidah. Penulis menyelesaikan pendidikan formal di TK Widya Putra, SD Muhammadiyah 1 Surakarta, SMP Muhammadiyah 1 Surakarta, SMA Negeri 6 Surakarta dan S1 Teknik Mesin UNS. Setelah itu penulis bekerja di kampus IT Telkom Surabaya dan mengembangkan ilmu dengan melanjutkan studi magister di Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2020. Selama menempuh pendidikan di jenjang magister, penulis mengambil bidang studi automotive di laboratorium

Rekayasa Vibrasi dan Sistem Otomotif sembari aktif dalam berbagai peneliti, kompetisi dan pengembangan startup pribadi. Jika ada informasi atau pertanyaan yang berkaitan dengan hasil riset didalam tesis ini maka dapat disampaikan melalui email dwirifki165@gmail.com atau rifki.206007@mhs.its.ac.id [@mhs.its.ac.id](mailto:mhs.its.ac.id) .