



TUGAS AKHIR - EE 184801

**DESAIN KONSTRUKSI, PEMODELAN, DAN
PERHITUNGAN PARAMETER MOTOR INDUKSI ROTOR
LUAR**

**Faizal Ramadhan Putra
NRP 07111640000107**

**Dosen Pembimbing
Eka Iskandar, S.T., M.T.
Ir. Rusdhianto Effendi A.K., M.T.**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro Dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020**

Halaman ini sengaja dikosongkan



TUGAS AKHIR - EE 184801

**DESAIN KONSTRUKSI, PEMODELAN, DAN
PERHITUNGAN PARAMETER MOTOR INDUKSI ROTOR
LUAR**

Faizal Ramadhan Putra
NRP 07111640000107

Dosen Pembimbing
Eka Iskandar, S.T., M.T.
Ir. Rusdhianto Effendi A.K., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro Dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

Halaman ini sengaja dikosongkan



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - EE 184801

***CONSTRUCTION DESIGN, MODELLING, AND PARAMETER
COMPUTATION OUTER ROTOR INDUCTION MOTOR***

Faizal Ramadhan Putra
NRP 0711164000107

Supervisor(s)
Eka Iskandar, S.T., M.T.
Ir. Rusdhianto Effendi A.K., M.T.

***DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Intelligent Electrical and Informatics Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020***

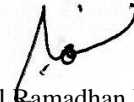
Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “**Desain Konstruksi, Pemodelan dan Perhitungan Parameter Motor Induksi Rotor Luar**” adalah hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

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

Surabaya, Agustus 2020



Faizal Ramadhan Putra
NRP. 07111640000107

Halaman ini sengaja dikosongkan

**DESAIN KONSTRUKSI, PEMODELAN, DAN
PERHITUNGAN PARAMETER MOTOR INDUKSI
ROTOR LUAR
TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan Untuk
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Elektro
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui:



**Surabaya,
Juli 2020**

**DESAIN KONSTRUKSI, PEMODELAN, DAN
PERHITUNGAN PARAMETER MOTOR INDUKSI
ROTOR LUAR**

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan Untuk
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Elektro
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui:

Dosen Pembimbing II

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'R. Effendi', with a horizontal line underneath the name.

Ir. Rusdhianto Effendi A.K., M.T.
NIP. 195704241985021001

Surabaya,
Agustus 2020

DESAIN KONSTRUKSI, PEMODELAN DAN PERHITUNGAN PARAMETER MOTOR INDUKSI ROTOR LUAR

Faizal Ramadhan Putra
0711164000107

Dosen Pembimbing : 1. Eka Iskandar, S.T., M.T.
 2. Ir. Rusdhianto Effendi A.K., M.T.

ABSTRAK

Pada buku tugas akhir ini akan dibahas tentang mendesain konstruksi dari motor induksi rotor luar yang dapat diaplikasikan pada mobil listrik yang dipasang di dalam roda mobil tersebut. Dalam mendesain motor, perlu diperhatikan parameter-parameter motor baik parameter mekanik maupun parameter elektrik. Parameter tersebut akan dihitung menggunakan *software* dan didesain sedemikian rupa sehingga mendapatkan parameter yang seefektif dan seefisien mungkin pada penggunaan mobil listrik. Setelah mendapatkan desain yang terbaik, akan dilihat perbandingan dari hasil simulasi dengan pemodelan matematis. Pada tugas akhir ini kami bisa mendapatkan desain dengan torsi awal sebesar 64 Nm untuk batas kecepatan 25 km/jam

Kata Kunci : konstruksi, motor, induksi, rotor luar, dalam roda

Halaman ini sengaja dikosongkan

**CONSTRUCTION DESIGN, MODELLING AND PARAMETER
COMPUTATION OUTER ROTOR INDUCTION MOTOR**

Faizal Ramadhan Putra
0711164000107

Supervisor :

1. Eka iskandar, S.T., M.T.
2. Ir. Rusdhianto Effendi A.K., M.T.

ABSTRACT

In this final project, we will discuss about designing an external rotor motor construction that can be used on electric cars mounted on car wheels. In designing a motor, it is important to consider the motor parameters both mechanical parameters and electrical parameters. This parameters will be calculated using software and designed in such a way as to get parameters that are as effective and as efficient as possible in the use of electric cars. After getting the best design, it will be seen from the results of simulations with mathematical modeling. In this final project we can get a design with an initial torque of 64 Nm for a 25 km/h speed limit

Keyword : *construction, motor, induction, outer rotor, in-wheel*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Dengan menyebut nama Allah SWT yang Maha Pengasih lagi Maha Panyayang, puji syukur kehadiran-Nya, atas berkah dan limpahan rahmat, hidayah, dan karunia-Nya, sehingga kami dapat dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “Desain Konstruksi, Pemodelan dan Perhitungan Parameter Motor Induksi Rotor Luar”.

Penelitian ini telah dikerjakan dengan maksimal dan pada saat pengerjaan kami mendapatkan bantuan dari berbagai pihak sehingga dapat memperlancar penelitian tugas akhir ini. Untuk itu kami menyampaikan banyak terima kasih kepada :

1. Bapak Ir. Rusdhianto Effendi A.K., M.T. dan bapak Eka Iskandar S.T., M.T. yang telah membimbing kami dengan baik dan sabar
2. Teman-teman program studi Sistem Pengaturan angkatan 2016
3. Anggota Lab AJ104, B106, B105, AJ204, dan B405 yang telah mendukung serta membantu pada proses penelitian ini.
4. Kepada semua pihak, teman, para dosen yang telah membantu kami selama proses studi.

Kami menyadari sepenuhnya bahwa masih ada kekurangan baik dalam segi kejelasan maupun kelengkapan materi dari tugas akhir ini, Oleh karena itu dengan penuh harap kami menerima segala saran dan kritik sebagai pembelajaran. kami harap semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi kami maupun bagi pembaca yang membaca laporan ini.

Surabaya, 27 Agustus 2020

Faizal Ramadhan Putra

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	VII
ABSTRAK.....	XI
ABSTRACT.....	XIII
KATA PENGANTAR.....	XV
DAFTAR ISI	XVII
DAFTAR GAMBAR.....	XXI
DAFTAR TABEL	XXIII
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Metode Penelitian	2
1.5.1 Studi Literatur.....	3
1.5.2 Mendesain Konstruksi	3
1.5.3 Pengukuran Parameter Fisik dan Elektrik Motor	3
1.5.4 Simulasi.....	3
1.5.5 Analisa	3
1.5.6 Penyusunan Buku Tugas Akhir.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
1.7 Relevansi	4
BAB 2 TEORI DASAR MOTOR INDUKSI.....	5
2.1 Umum.....	5
2.2 Konstruksi Motor Induksi	5
2.2.1 Stator	6
2.2.2 Rotor	7
2.3 Prinsip Kerja Motor Induksi.....	9

2.4	Slip Motor Induksi	11
2.5	Rangkaian Ekivalen Motor Induksi	13
2.6	Motor Induksi Rotor Luar	16
2.7	Pemodelan Motor Induksi	18
2.8	Gambaran Umum Software FluxMotor	23
BAB 3 PERANCANGAN DESAIN MOTOR		27
3.1	Finite Element Methode (FEM).....	27
3.2	Desain Konstruksi.....	27
3.2.1	Desain Ukuran Mesin	27
3.2.2	Desain Rotor.....	30
3.2.3	Desain Stator	35
3.3	Perhitungan Parameter	38
3.3.1	Batas Arus Stator	38
3.3.2	Nilai Frekuensi Sumber	38
BAB 4 SIMULASI DAN ANALISA		41
4.1	Simulasi awal.....	41
4.1.1	Simulasi Slot 96/120.....	41
4.1.2	Simulasi Slot 72/90.....	42
4.1.3	Simulasi Slot 48/60.....	43
4.1.4	Simulasi Slot 24/30.....	43
4.1.5	Slot Terbaik	44
4.2	Simulasi Lanjutan	44
4.2.1	Simulasi <i>Air Gap</i>	45
4.2.2	Simulasi Diameter Batang Rotor.....	45
4.2.2.1	Simulasi Diameter Batang Rotor.....	45
4.2.2.2	Simulasi Ukuran H_o Batang Rotor.....	46
4.2.2.3	Simulasi Ukuran W_o Batang Rotor.....	46
4.2.2.4	Simulasi Diameter dan Jumlah Batang Rotor	47
4.2.2.4.1	Simulasi Ukuran W_o Dengan Jumlah Lilitan Stator..	47
4.3	Desain Final.....	48
4.3.1	Desain Mesin Secara Umum	48
4.3.2	Desain Parameter Rongga Stator.....	49
4.3.3	Desain Parameter Lubang Rotor	50

4.4	Simulasi Kecepatan.....	50
4.5	Perhitungan Pada Wilayah Tanjakan	52
4.6	Pemodelan	53
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN		57
5.1	Kesimpulan.....	57
5.2	Saran.....	57
DAFTAR PUSTAKA		59
LAMPIRAN		61
BIOGRAFI PENULIS		66

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Konstruksi Motor Induksi [1].....	6
Gambar 2. 2 Stator Motor Induksi [2].....	7
Gambar 2. 3 Rotor Sangkar Motor Induksi [1]	8
Gambar 2. 4 Sketsa Rotor Sangkar Motor Induksi [1]	8
Gambar 2. 5 Sketsa Rotor Belitan Motor Induksi [1].....	9
Gambar 2. 6 Tegangan Tiga Fase [1].....	9
Gambar 2. 7 Arus Tiga Fase dan Torsi Magnetik [1]	10
Gambar 2. 8 Rangkaian Ekivalensi Motor Induksi [9]	13
Gambar 2. 9 Rangkaian Ekivalensi Rotor [9]	14
Gambar 2. 10 Rangkaian Ekivalensi Rotor Modifikasi [9].....	15
Gambar 2. 11 Rangkaian Ekivalensi Rotor Modifikasi Lanjutan [9]	15
Gambar 2. 12 Rangkaian Ekivalensi Modifikasi Motor Induksi [9]	16
Gambar 2. 13 Perbandingan Konstruksi Rotor Luar dan Dalam [6]	17
Gambar 2. 14 Contoh Produk Motor Induksi Rotor Luar [7]	17
Gambar 2. 15 Diagram Fasor Motor Induksi	18
Gambar 2. 16 Rangkaian Ekivalensi Sumbu Q [4].....	20
Gambar 2. 17 Rangkaian Ekivalensi Sumbu D [4].....	20
Gambar 2. 18 Halaman Depan FluxMotor	24
Gambar 2. 19 Motor Factory FluxMotor	25
Gambar 2. 20 Rotor Luar FluxMotor	25
Gambar 3. 1 Halaman Topologi Software FluxMotor	29
Gambar 3. 2 Masukan Parameter Mesin FluxMotor	29
Gambar 3. 3 Masukan Parameter Housing <i>Software</i> FluxMotor	30
Gambar 3. 4 Konstruksi Jenis Rotor Kelas A [11]	31
Gambar 3. 5 Konstruksi Jenis Rotor Kelas B [11]	31
Gambar 3. 6 Konstruksi Jenis Rotor Kelas C [11]	32
Gambar 3. 7 Konstruksi Jenis Rotor Kelas D [11]	32
Gambar 3. 8 Perbandingan Performa Torsi dengan Kecepatan Sinkron	33
Gambar 3. 9 Halaman Parameter Batang Rotor FluxMotor.....	33
Gambar 3. 10 Masukan Parameter Batang Rotor FluxMotor	34
Gambar 3. 11 Masukan Parameter Material Rotor FluxMotor	35
Gambar 3. 12 Parameter Ho Pada Rongga Stator.....	36
Gambar 3. 13 Bentuk Stator	36
Gambar 3. 14 Masukan Parameter Rongga Stator FluxMotor	37
Gambar 3. 15 Masukan Parameter <i>Winding</i> Stator.....	37

Gambar 4. 1 Ws Pada Slot Stator	41
Gambar 4. 2 Parameter Ho Pada Batang Rotor	46
Gambar 4. 3 Parameter Wo Pada Batang Rotor	46
Gambar 4. 4 Desain Motor Secara Umum	48
Gambar 4. 5 Desain Rongga Stator	49
Gambar 4. 6 Desain Lubang Rotor	50
Gambar 4. 7 Respons Torsi Tiap Batas Kecepatan	51
Gambar 4. 8 Respons Arus Tiap Batas Kecepatan	51
Gambar 4. 9 Respons Efisiensi Tiap Batas Kecepatan	52
Gambar 4. 10 Kondisi Mobil Pada Saat Tanjakan	52
Gambar 4. 11 Rangkaian Ekuivalensi Motor Induksi.....	54
Gambar 4. 12 Perbandingan Nilai Torsi Metode FEM dan Pemodelan	55
Gambar 4. 13 Perbandingan Nilai Arus Metode FEM dan Pemodelan.	55
Gambar 4. 14 Perbandingan Nilai Efisiensi Metode FEM dan Pemodelan	56

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Notasi dan Keterangan Rumus Prinsip Kerja Motor	10
Tabel 2.2 Notasi dan Keterangan Rumus Slip Motor Induksi	12
Tabel 2.3 Notasi dan Keterangan Parameter Rangkaian Ekuivalensi	13
Tabel 3.1 Ukuran Parameter Mesin Motor	28
Tabel 3.2 Batas Arus Kabel Tembaga	38
Tabel 3.3 Notasi dan Keterangan Perancangan Nilai Frekuensi Sumber	39
Tabel 4.1 Hasil Simulasi Slot 96/120	41
Tabel 4.2 Hasil Simulasi Slot 72/90	42
Tabel 4.3 Hasil Simulasi Slot 48/60	43
Tabel 4.4 Hasil Simulasi Slot 24/30	43
Tabel 4.5 Hasil Perbandingan Slot	44
Tabel 4.6 Hasil Simulasi <i>Air Gap</i>	45
Tabel 4.7 Hasil Simulasi Diameter Batang Rotor	45
Tabel 4.8 Hasil Simulasi Parameter H_o Pada Batang Rotor	46
Tabel 4.9 Hasil Simulasi Parameter W_o Pada Batang Rotor	46
Tabel 4.10 Hasil Simulasi Diameter dan Jumlah Batang Rotor	47
Tabel 4.11 Parameter Umum Motor	48
Tabel 4.12 Parameter Rongga Stator	49
Tabel 4.13 Parameter Lubang Rotor	50
Tabel 4.14 Parameter Induktansi dan Resistansi Motor	54
Tabel 4.15 Perbandingan Respons Motor Metode FEM dan Pemodelan	56

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

Dalam bab ini akan dipaparkan tentang latar belakang penelitian, permasalahan yang akan diselesaikan, tujuan dari penelitian, metodologi yang digunakan, sistematika penulisan serta relevansi penelitian ini terhadap penelitian sejenis atau lebih rumit di masa mendatang.

1.1 Latar Belakang

Penggunaan tenaga listrik semakin berkembang sering dengan perkembangan teknologi termasuk penggunaan listrik pada bidang transportasi. Mobil merupakan salah satu alat transportasi yang banyak digunakan. Terlindung dari panas dan hujan, tidak perlu ke stasiun maupun halte, lebih nyaman dan aman merupakan beberapa alasan masyarakat lebih suka menggunakan mobil. Mobil pada saat ini masih banyak yang menggunakan bahan bakar minyak bumi sebagai sumber energinya. Minyak bumi merupakan sumber energi yang tidak terbarukan yang sering berjalannya waktu dapat habis sehingga masyarakat mulai mencoba mengganti sumber energi minyak bumi dengan sumber energi yang lain salah satunya energi listrik. Pembangkitan energi listrik dapat menggunakan sumber energi terbarukan seperti ombak air laut, tekanan air pada danau, panas bumi, laju angin dan nuklir. Walaupun pembangkitan energi listrik belum sepenuhnya menggunakan energi yang terbarukan namun penggunaan energi terbarukan sebagai pembangkit listrik sudah dapat dan sedang gencar diterapkan.

Mesin yang ramah lingkungan disebabkan tidak adanya gas emisi merupakan kelebihan dari penggunaan listrik sebagai energi dari mobil. Mesin listrik yang digunakan untuk mengonversikan energi listrik adalah motor listrik. Motor listrik memiliki beberapa jenis dengan penggunaan sumber energi listrik AC (*Alternating Current*) maupun sumber energi listrik DC (*Direct Current*), dengan menggunakan magnet permanen maupun tidak.

Motor induksi merupakan salah satu jenis motor listrik dengan menggunakan sumber AC (*Alternating Current*) sebagai sumbernya. Konstruksi yang sederhana, kokoh, relatif murah serta perawatannya yang mudah menjadi alasan banyaknya penggunaan motor induksi dalam berbagai bidang tak terkecuali bidang transportasi. Tanpa menggunakan magnet permanen menjadikan motor induksi memiliki keunggulan perawatan yang mudah seperti yang telah disebutkan di atas karena bila

magnet permanen tersebut rusak tentunya harus membongkar dan mengganti motor tersebut.

Konstruksi motor induksi secara umum menempatkan rotor di bagian dalam stator. Rotor yang berada didalam stator tidak bisa dijadikan langsung sebagai roda penggerak, melainkan harus dikopel dengan roda penggerak yang lain. penambahan kopel pada motor menjadikan konstruksi lebih rumit serta menambah nilai rugi-rugi (*lost*) daya. Namun, apabila rotor berada di luar stator, maka motor induksi dapat dijadikan langsung sebagai roda penggerak tanpa dipasang kopel sehingga konstruksi lebih sederhana dan rugi-rugi (*lost*) daya berkurang.

Motor induksi rotor luar dapat diaplikasikan salah satunya pada mobil listrik. Pada mobil listrik, penggunaan motor induksi rotor luar lebih baik daripada rotor dalam. Motor induksi rotor dalam memerlukan kopel yang menghubungkan motor pada ban mobil, sedangkan motor induksi rotor luar dapat dipasang di dalam ban mobil (*in-wheel*) sehingga dapat menggerakkan mobil secara langsung.

1.2 Perumusan Masalah

Bagaimana cara mendesain konstruksi dan menentukan parameter pemodelan motor induksi rotor luar yang dapat dipasang langsung di dalam ban mobil listrik.

1.3 Batasan Masalah

Perlu diperhatikan batasan dalam melakukan penelitian ini, antara lain sebagai berikut:

1. Menggunakan metode FEM (*Finite Element Methode*)
2. Menggunakan jenis motor induksi tiga fase
3. Menggunakan konstruksi rotor yang berada di luar stator
4. Desain konstruksi motor untuk mobil listrik
5. Desain konstruksi motor untuk dipasangkan langsung di dalam ban
6. Nilai tegangan telah ditentukan terlebih dahulu sebesar 72 v

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah Menghasilkan rancangan motor induksi rotor luar yang dapat dipasang langsung di dalam ban mobil listrik.

1.5 Metode Penelitian

Metodologi yang akan diterapkan untuk penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1.5.1 Studi Literatur

Pada tahap ini akan dipelajari mengenai konstruksi dan komponen dari motor induksi rotor dalam. Setelah memahami konstruksi dan komponen motor induksi rotor dalam, dapat dijadikan referensi untuk mendesain jenis motor induksi rotor luar. Selain itu, akan dipelajari baik dalam buku maupun jurnal tentang motor induksi rotor luar.

1.5.2 Mendesain Konstruksi

Pada tahap ini akan didesain konstruksi dari motor induksi dengan rotor berada di luar stator.

1.5.3 Pengukuran Parameter Fisik dan Elektrik Motor

Setelah mendapat desain konstruksi selanjutnya akan akan diukur parameter-parameter fisik dan elektrik dari motor induksi yang telah didesain

1.5.4 Simulasi

Setelah mendapatkan parameter-parameter dari motor induksi, akan disimulasikan beserta konstruksi dan model motor induksi menggunakan *software* FluxMotor

1.5.5 Analisa

Pada tahap ini, akan dilakukan analisa dari hasil simulasi. Analisa dilakukan untuk melihat seberapa handal dan seberapa efisien konstruksi maupun parameter-parameter dari motor induksi.

1.5.6 Penyusunan Buku Tugas Akhir

Tahap terakhir akan disusun laporan penelitian yang telah dilaksanakan kedalam buku tugas akhir

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan pada buku tugas akhir ini terbagi menjadi lima bab, yaitu:

BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan tentang latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, metodologi penelitian, sistem penulisan laporan dan relevansi

BAB 2 MOTOR INDUKSI

Bab ini menjelaskan teori dasar yang digunakan dalam penelitian. Penjelasan umum tentang motor induksi, konstruksi motor, prinsip kerja motor, slip motor, rangkaian ekuivalen dari motor, bentuk rotor luar motor induksi, rangkaian

ekuivalen motor, pemodelan motor serta gambaran umum *software* yang digunakan dalam penelitian

BAB 3 PERANCANGAN SISTEM

Bab ini membahas *software Fluxmotor* yang digunakan yang menggunakan metode FEM (*Finite Element Method*) sebagai pengambilan data.

BAB 4 HASIL DAN ANALISA

Bab ini memuat hasil simulasi konstruksi motor induksi yang menggunakan *software Fluxmotor*. Hasil simulasi akan dibandingkan dan dianalisa dengan pemodelan Motor Induksi

BAB 5 KESIMPULAN

Bab ini menjelaskan kesimpulan akhir dari hasil simulasi dan analisa yang telah dicapai.

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari penelitian Tugas Akhir diharapkan dapat diaplikasikan pada penelitian mobil listrik yang sedang direncanakan. Penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi referensi penelitian Tugas Akhir maupun penelitian yang lainnya khususnya penelitian tentang Motor Induksi Rotor Luar dimasa depan

BAB 2

TEORI DASAR MOTOR INDUKSI

Pada bab ini akan dibahas mengenai teori dasar Motor Induksi berupa konstruksi, prinsip kerja, slip, bentuk rotor luar, rangkaian ekuivalensi, pemodelan serta gambaran umum *software* yang digunakan dalam penelitian.

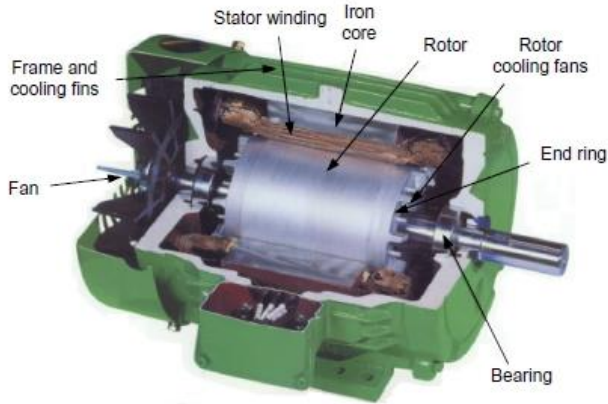
2.1 Umum

Dinamakan motor induksi karena arus yang timbul pada rotor disebabkan oleh tegangan yang terinduksi oleh medan magnet yang berasal dari stator. Motor induksi juga dinamakan motor tak serempak karena kecepatan putaran medan putar stator tidak sama dengan kecepatan putaran rotor.

Motor Induksi merupakan jenis motor yang sering digunakan. Pada dunia industri, motor ini menjadi penggerak utama bagi sebagian besar mesin. Dalam bidang rumah tangga sering dijumpai mesin listrik yang menggunakan motor induksi, diantaranya kipas angin, kulkas, *mixer*, dan sebagainya. Motor ini sering digunakan terutama dalam bidang industri karena memiliki keunggulan dibanding jenis motor yang lain diantaranya konstruksi yang sederhana, kokoh, relatif murah serta perawatannya yang mudah.

2.2 Konstruksi Motor Induksi

Secara mendasar konstruksi motor induksi terdiri dari dua bagian utama yaitu bagian yang diam (statis) dan bagian yang berputar. Bagian yang diam bernama stator dan bagian yang berputar bernama rotor seperti pada gambar 2.1. Secara ringkas stator terbuat dari baja yang terlaminsi dan berongga. Laminasi baja berfungsi untuk mengurangi arus Eddy (*Eddy current*) sedangkan Rongga pada stator digunakan sebagai tempat meletakkan kumparan. Rotor juga terbuat dari baja yang terlaminsi. Laminasi ini berada pada bagian luar rotor untuk menerima fluks dari medan putar. Menurut konstruksinya, rotor dibedakan menjadi dua jenis, yaitu rotor sangkar dan rotor belitan

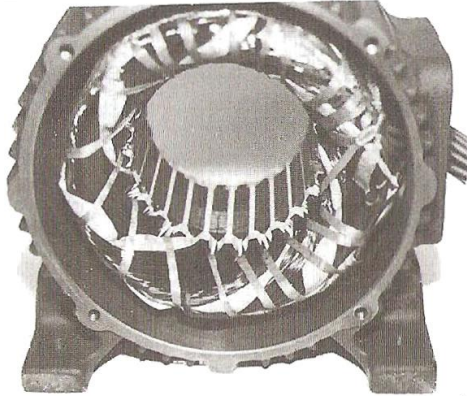


Gambar 2. 1 Konstruksi Motor Induksi [1]

2.2.1 Stator

Bagian yang statis (diam) pada motor disebut stator merupakan bagian dari motor yang berperan sebagai tempat pembentukan medan putar pada motor induksi. Stator memiliki tiga bagian utama yaitu rangka stator, inti stator dan kumparan stator. Rangka atau gandar stator merupakan bagian terluar dari stator yang berfungsi sebagai penopang dan pelindung stator, di dalamnya terdapat inti stator dan kumparan stator. Inti stator terbuat dari baja yang terlamiasi. bentuknya berongga dan berpola yang disebut *stator slot*. Stator slot ini digunakan sebagai tempat dari kumparan stator. Kumparan stator dihubungkan pada sumber tegangan. Kumparannya dibelitkan di dalam *stator slot* dengan berpola dan membentuk sejumlah pasang kutub. Bila jumlah pasang kutub semakin sedikit maka kecepatan putar yang didapat semakin cepat namun torsiya semakin kecil, Bila jumlah pasang kutub semakin banyak maka kecepatan putar yang didapat semakin lambat namun torsiya semakin besar.

Kumparan stator yang disuplai dengan sumber tegangan tiga fase akan mengalirkan arus tiga fase. Arus tiga fase pada kumparan akan menghasilkan fluks magnetik yang berputar atau medan putar dengan besaran konstan. Medan putar ini yang akan menginduksikan gaya gerak listrik pada rotor.



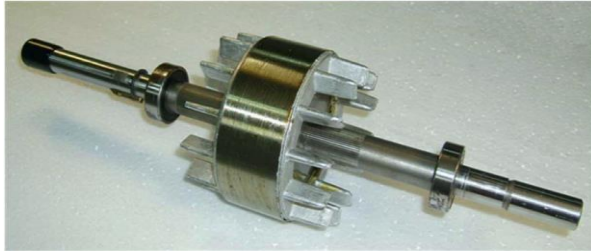
Gambar 2. 2 Stator Motor Induksi [2]

2.2.2 Rotor

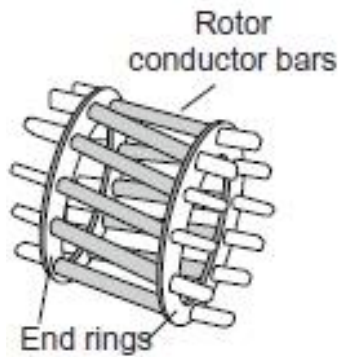
Bagian yang berputar (*rotate*) pada motor disebut rotor. Rotor terdiri dari laminasi baja yang tipis yang dibuat bersama jalur magnetik silinder dan rangkaian listrik. Laminasi ini ditempatkan disisi luar untuk menerima fluks dari medan putar. Rotor pada motor induksi dibedakan menjadi dua macam menurut konstruksinya, yaitu rotor sangkar dan rotor belitan

a. Rotor Sangkar

Motor induksi jenis ini mempunyai kumparan yang berupa beberapa batang konduktor yang disusun dengan bentuk menyerupai sangkar tupai. konstruksi rotor sangkar tupai lebih sederhana daripada rotor belitan. Rotor sangkar tupai harganya lebih murah dibanding rotor kumparan. Untuk membatasi arus *starting* yang besar pada rotor jenis ini, tegangan dari sumber harus dikurangi menggunakan transformator atau saklar *y-a*. Tetapi berkurangnya arus akan berakibat berkurangnya kopel kelebihan dari motor jenis ini yaitu konstruksi yang sederhana, biaya perawatan rendah, pengaturan *starting* sederhana sedangkan kekurangan dari motor jenis ini yaitu variasi kecepatan dapat mengurangi efisiensi, kecepatan menurun jika beban bertambah, torsi *starting* lebih rendah Motor induksi memiliki slip.



Gambar 2. 3 Rotor Sangkar Motor Induksi [1]

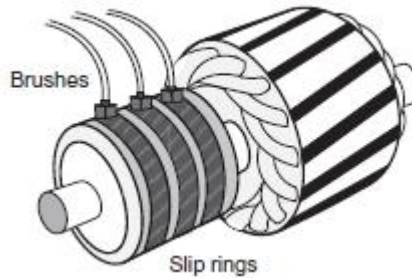


Gambar 2. 4 Sketsa Rotor Sangkar Motor Induksi [1]

b. Rotor Belitan

Motor induksi jenis rotor Belitan mempunyai rotor dengan belitan kumparan tiga fase sama seperti kumparan stator. Jumlah kutub kumparan stator dan rotor memiliki jumlah yang sama. Penambahan tahanan luar sampai harga tertentu, dapat membuat kopel mula mencapai harga kopel maksimumnya. Motor induksi dengan rotor belitan memungkinkan penambahan (pengaturan) tahanan luar. Tahanan luar yang dapat diatur ini dihubungkan ke rotor melalui cincin. selain untuk menghasilkan kopel mula yang besar, tahanan luar tadi diperlukan untuk membatasi arus mula yang besar pada saat start. Disamping itu dengan mengubah-ubah tahanan luar, kecepatan motor dapat diatur. kelebihan dari motor ini adalah torsi start tinggi, arus start rendah, efisiensi bagus saat kondisi normal

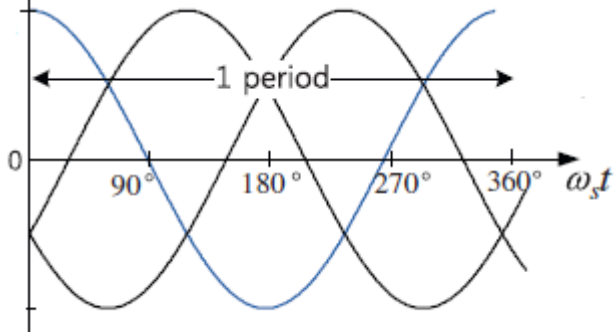
sedangkan kekurangannya lebih mahal dari rotor sangkar tupai, butuh banyak perawatan dan butuh kontrol otomatis yang lebih kompleks



Gambar 2. 5 Sketsa Rotor Belitan Motor Induksi [1]

2.3 Prinsip Kerja Motor Induksi

Sesuai dengan namanya, motor induksi bekerja dengan menginduksikan tegangan. Awalnya kumparan stator yang terdiri dari tiga lilitan fase disuplai dengan sumber tegangan tiga fase seperti pada gambar 2.5.



Gambar 2. 6 Tegangan Tiga Fase [1]

Suplai tegangan tiga fase kepada kumparan stator menimbulkan medan yang berputar dengan kecepatan sinkron, kecepatan sinkron ini berbanding lurus dengan frekuensi sumber dan berbanding terbalik dengan jumlah kutub

$$n_s = \frac{120fc}{p} \quad (2.1)$$

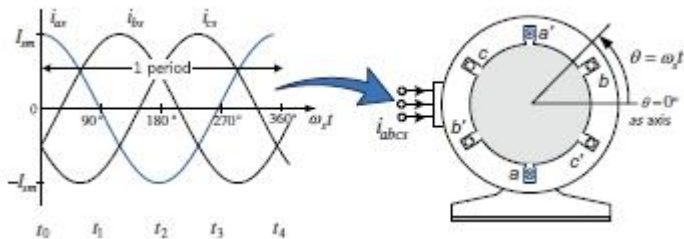
medan putar tersebut memotong batang konduktor pada rotor sehingga rotor terinduksi menimbulkan gaya gerak listrik. Adanya gaya gerak listrik menimbulkan tegangan pada rotor atau bisa disebut tegangan induksi. Rumus tegangan induksi :

$$e_{ind} = (v \times B) \cdot l \quad (2.2)$$

Rangkaian pada rotor merupakan rangkaian tertutup (*closed loop*). Adanya tegangan induksi pada rotor yang merupakan rangkaian tertutup maka akan menimbulkan arus. Arus listrik pada rotor berada dalam jangkauan medan putar. Adanya arus berada dalam medan putar menimbulkan Torsi magnetik yang disebut gaya *Lorenz*. Berdasarkan hukum lenz, arah gaya cenderung untuk mengurangi perubahan fluks itu sendiri, artinya rotor akan berputar mengikuti arah dari rotasi fluks atau arah dari medan putar. Medan putar atau medan stator bereaksi dengan medan rotor menimbulkan torsi induksi pada rotor yang membuat rotor dapat berputar. rumus torsi induksi :

$$T_{ind} = k B_R \times B_S \quad (2.3)$$

Besarnya torsi yang dihasilkan tiap fase tidak sama disetiap waktu, karena besarnya arus pada tiap fase berubah-ubah pada tiap waktunya. Pada gambar 2.6 besarnya arus pada masing-masing fase berbeda tiap waktunya. Perbedaan arus menimbulkan resultan torsi berbeda arahnya karena cenderung mengarah ke fase yang memiliki arus tertinggi. Resultan torsi akan berputar seiring perubahan arus pada tiap fase dan mengakibatkan rotor berputar



Gambar 2. 7 Arus Tiga Fase dan Torsi Magnetik [1]

Tabel 2.1 Notasi dan Keterangan Rumus Prinsip Kerja Motor

Notasi	Keterangan
n_s	Kecepatan sinkron (rpm)

f_c	frekuensi sumber (Hz)
p	Jumlah kutub
e_{ind}	Tegangan induksi (Volt)
v	Kecepatan rotor terhadap kecepatan medan putar (m/s)
B	Kerapatan fluks magnet (Tesla)
l	Panjang konduktor magnet (m)
T_{ind}	Torsi induksi (Nm)
k	Konstanta torsi
B_R	Kerapatan fluks magnet rotor (Tesla)
B_S	Kerapatan fluks magnet stator (Tesla)

2.4 Slip Motor Induksi

Tegangan induksi pada rotor timbul akibat adanya perbedaan kecepatan putaran rotor dengan kecepatan putaran medan putar stator. Kecepatan putaran rotor harus lebih lambat dari kecepatan medan putar stator. Bila kecepatan putaran rotor sama dengan kecepatan putaran medan putar stator, maka fluks dari medan putar stator tidak dapat memotong batang-batang konduktor maupun kawat belitan rotor sehingga tidak akan menimbulkan gaya gerak listrik sehingga stator tidak akan menginduksikan tegangan pada rotor.

Selisih kecepatan medan putar dengan kecepatan rotor dinamakan slip. Slip merupakan parameter yang sering menjadi perhatian dalam desainer motor maupun teknisi karena slip ini yang mempengaruhi kinerja dari motor induksi. Berikut adalah rumus untuk slip :

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \cdot 100\% \quad (2.4)$$

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \cdot 100\% \quad (2.5)$$

Apabila rotor dalam keadaan diam maka slip motor induksi bernilai satu ($s = 1$). Apabila rotor berputar dengan kecepatan yang sama dengan kecepatan medan putar maka slip dari motor induksi bernilai nol ($s = 0$). Biasanya slip pada saat beban penuh bernilai sekitar 5% atau lebih kecil. Besar kecilnya nilai dari slip

dipengaruhi dari sumber tegangan. Berikut adalah hubungan antara sumber tegangan dengan slip

$$f_2 = \frac{p(n_s - n_r)}{120} \quad (2.6)$$

$$f_2 = \frac{pn_s}{120} \cdot \frac{(n_s - n_r)}{n_s} \quad (2.7)$$

Karena

$$s = \frac{(n_s - n_r)}{n_s} \quad (2.8)$$

$$f_1 = \frac{pn_s}{120} \quad (2.9)$$

$$f_2 = f_1 s \quad (2.10)$$

Pada motor induksi, nilai frekuensi dari sumber juga mempengaruhi tegangan induksi pada rotor dan reaktansi kumparan rotor. Sehingga nilai dari slip juga mempengaruhi tegangan induksi dan reaktansi kumparan rotor.

$$E_{2s} = 4.44 f_2 N_2 \phi_m \quad (2.11)$$

$$E_{2s} = 4.44 s f_1 N_2 \phi_m \quad (2.12)$$

$$E_{2s} = s E_2 \quad (2.13)$$

$$X_{2s} = 2\pi f_2 L_{2s} \quad (2.14)$$

$$X_{2s} = 2\pi s f_1 L_{2s} \quad (2.15)$$

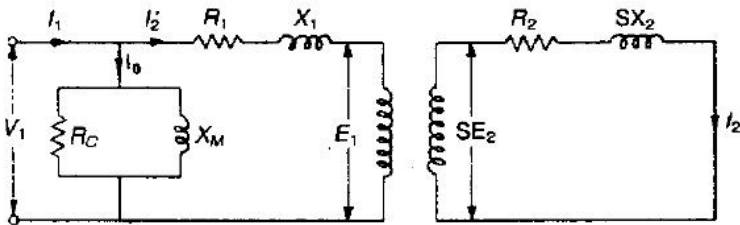
$$X_{2s} = s X_2 \quad (2.16)$$

Tabel 2 2 Notasi dan Keterangan Rumus Slip Motor Induksi

Notasi	Keterangan
s	Slip
n_s	Kecepatan sinkron (rpm)
n_r	Kecepatan putar rotor (rpm)
ω_s	Kecepatan angular medan putar stator (rad/s)
ω_r	Kecepatan angular rotor (rad/s)
E_2	Tegangan induksi pada saat start (volt)
E_{2s}	Tegangan induksi pada saat rotor berputar (volt)

ϕ_m	Fluks medan
N_2	Lilitan rotor
X_2	Reaktansi pada saat start (Ω)
X_2	Reaktansi pada saat rotor berputar (Ω)
L_2	induktansi pada saat start (H)
L_2	induktansi pada saat rotor berputar (H)

2.5 Rangkaian Ekivalen Motor Induksi



Gambar 2. 8 Rangkaian Ekivalensi Motor Induksi [9]

Tabel 2.3 Notasi dan Keterangan Parameter Rangkaian Ekivalensi

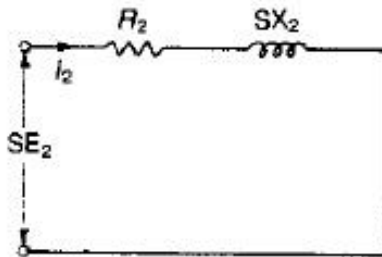
Notasi	Keterangan
V_1	Tegangan suplai stator (volt)
E_1	Tegangan induksi stator (volt)
E_2	Tegangan induksi rotor (volt)
I_1	Arus stator (A)
I_0	Arus magnetisasi (A)
I_2'	Arus kumparan (A)
R_1	Resistansi stator (Ω)
R_2	Resistansi rotor (Ω)
R_C	Resistansi inti (Ω)

X_1	Reaktansi stator (Ω)
X_2	Reaktansi bocor rotor (Ω)
X_M	Reaktansi magnetisasi (Ω)
s	Slip

Gambar 2.7. di atas merupakan gambar dari rangkaian ekuivalensi motor induksi untuk satu fasenya. Jika dilihat dari rangkaian ekuivalensi, kerja motor induksi mirip dengan trafo yang dengan berdasarkan induksi elektromagnetik hanya saja motor induksi menggunakan parameter slip untuk nilai tegangan induksinya.

Ketika tegangan sumber dinyalakan, arus stator akan bergerak dan bercabang menjadi arus magnetisasi dan arus kumparan. besar arus magnetisasi merupakan sebagian kecil dari arus stator sehingga biasanya dapat diabaikan untuk motor dengan beban besar. Arus kumparan menuju lilitan stator dan akan diinduksikan ke rotor sesuai dengan prinsip kerja motor induksi menjadi tegangan induksi rotor.

Rangkaian ekuivalensi di atas akan sulit untuk dianalisa karena perbandingan atau rasio antara lilitan stator dan lilitan rotor akan berubah ketika slip berubah sehingga rangkaian perlu disederhanakan terlebih dahulu secara matematis dengan mengganti nilai impedansi dari rotor sedangkan arus rotor tetap



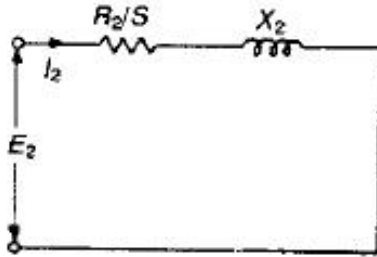
Gambar 2. 9 Rangkaian Ekuivalensi Rotor [9]

$$I_2 = \frac{sE_2}{R_2 + jsX_2} \quad (2.17)$$

Kita kalikan arus rotor (I_2) dengan $\frac{1}{s}$, menjadi :

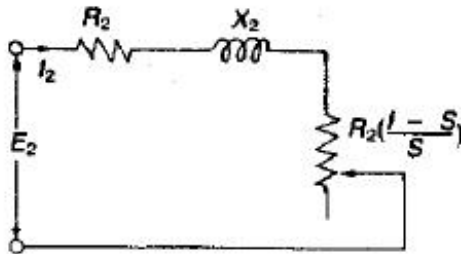
$$I_2 = \frac{E_2}{\frac{R_2}{s} + jX_2} \quad (2.18)$$

Sehingga rangkaian rotor menjadi seperti gambar 2.9. di bawah



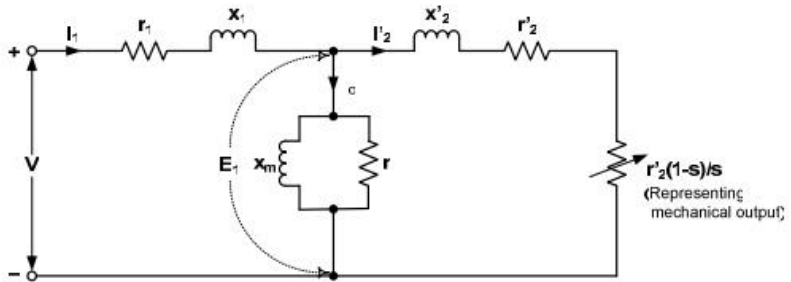
Gambar 2. 10 Rangkaian Ekivalensi Rotor Modifikasi [9]

Parameter resistansi rotor (R_2) diperlukan untuk menyatakan rugi tembaga rotor, maka kita dapat memodifikasi lagi rangkain diatas dengan memisahkan parameter slip (s) dari Parameter R_2/s menjadi dua parameter R_2 dan $R_2(1-s)/s$.



Gambar 2. 11 Rangkaian Ekivalensi Rotor Modifikasi Lanjutan [9]

Maka rangkaian ekuivalensi menjadi seperti gambar 2.11 di bawah



Gambar 2. 12 Rangkaian Ekuivalensi Modifikasi Motor Induksi [9]

2.6 Motor Induksi Rotor Luar

Motor merupakan penggerak yang dapat menggerakkan benda dengan menggunakan energi. Pada perkembangan zaman, motor sudah menggunakan listrik sebagai sumber energi dalam penggerakannya, tak terkecuali motor induksi

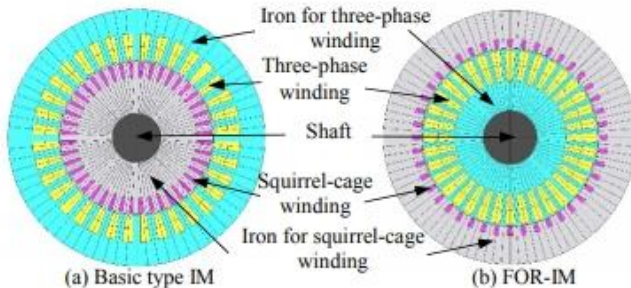
Motor induksi merupakan jenis motor yang banyak digunakan dalam dunia perindustrian. Motor ini menggunakan sumber energi berupa listrik AC (*Alternating Current*) yang akan dikonversikan menjadi medan magnet. Sesuai dengan namanya, motor induksi menginduksikan medan magnet yang berada di stator ke rotor. Medan magnet yang dibangkitkan dengan energi listrik AC ini akan berputar menyentuh rotor sehingga terjadinya perbedaan fluks yang mengakibatkan munculnya tegangan pada rotor. Munculnya tegangan pada rotor mengakibatkan rotor ikut berputar searah dengan medan putar seperti yang telah dijelaskan pada bab Prinsip Kerja Motor Induksi di atas.

Secara umum konstruksi motor induksi menempatkan rotor berada di dalam stator yang disebut motor induksi rotor dalam (*inner rotor induction motor*). Konstruksi rotor di dalam stator berarti ukuran atau diameter stator lebih besar daripada rotor. Konstruksi ini mungkin akan lebih mudah dibuat disamping desain yang sudah umum, pemasangan stator berada di luar yang artinya pada saat pengujian rotor bergerak di dalam sehingga motor dapat diletakkan di tempat sedangkan bila rotor berada di luar stator maka pada saat pengujian harus dipegang atau ada penyangga dan sebagainya.

Konstruksi motor induksi rotor luar (*outer rotor induction motor*) menempatkan rotor di luar stator yang berarti diameter rotor lebih besar daripada stator, karena ukuran diameter rotor dari motor induksi rotor luar lebih besar daripada motor induksi rotor dalam untuk ukuran yang sama

maka momen inersia dari motor induksi rotor luar lebih besar sehingga untuk fluks yang sama torsi yang dibangkitkan lebih besar dibanding rotor dalam.

Pada aplikasi mobil listrik, motor induksi rotor dalam akan dipasang pada bagian bawah mobil di sisi depan dan belakang. Motor induksi rotor luar dapat dipasang langsung di dalam ban mobil (in-wheel) sebagai penggerak yang pastinya akan menghemat tempat pada konstruksi mobil. Motor induksi rotor dalam membutuhkan kopel yang akan dihubungkan dengan ban mobil yang pastinya menimbulkan rugi-rugi daya sedangkan motor induksi rotor luar dapat dipasang langsung tanpa menggunakan kopel.



Gambar 2. 13 Perbandingan Konstruksi Rotor Luar dan Dalam [6]

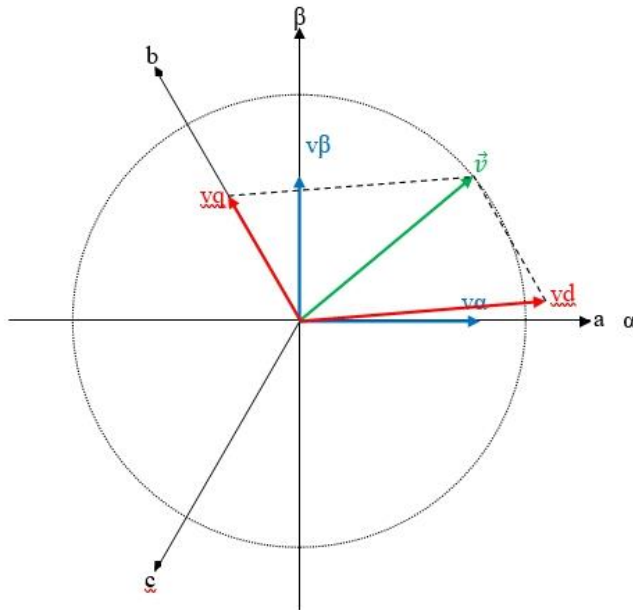


Gambar 2. 14 Contoh Produk Motor Induksi Rotor Luar [7]

2.7 Pemodelan Motor Induksi

Pemodelan adalah sebuah upaya untuk mendapatkan model dari sistem sedangkan menurut KBBI (Kamus Besar Bahasa Indonesia) arti kata model yang tepat untuk dipakai pada kata pemodelan adalah pola (contoh, acuan, ragam, dan sebagainya) dari sesuatu yang akan dibuat atau dihasilkan. Pemodelan motor induksi berarti bertujuan untuk mencari model atau pola dari motor induksi yang nantinya dapat digunakan untuk mencari persamaan-persamaan tegangan, torsi, arus, dsb.

Pada motor induksi terdapat belitan stator dengan tiga fase dan Belitan rotor tiga fase. Dari sini nantinya akan didapat persamaan tegangan dengan persamaan matriks 6×6 . Persamaan ini ke depan akan sangat kompleks dan sulit untuk dianalisa. Untuk mempermudah analisa terdapat sebuah metode yang nantinya akan mengubah sistem tiga fase tersebut menjadi sistem dua fase. Metode tersebut disebut pemodelan dq (*direct quadrate*). Untuk lebih jelasnya dapat dilihat gambar 2.14 di bawah



Gambar 2. 15 Diagram Fasor Motor Induksi

Pada sistem tiga fase (abc) resultan tegangan didapat dari resultan tegangan v_a, v_b , dan v_c . Resultan tegangan tersebut ternyata dapat

dinyatakan dalam koordinat alfa beta ($\alpha\beta$). Resultan tegangan tersebut ternyata juga menjadi resultan tegangan alfa ($v\alpha$) dan tegangan beta ($v\beta$). Pada keadaan ini sistem tiga fase (abc) telah direduksi menjadi sistem dua fase ($\alpha\beta$). Resultan tegangan tersebut akan berputar seiring berjalannya waktu. Oleh karena itu, Nilai dari tegangan alfa ($v\alpha$) dan tegangan beta ($v\beta$) juga akan berubah terhadap waktu dengan fungsi sinus. Sehingga, terdapat sebuah cara yaitu dengan mentransformasikan sistem koordinat alfa beta ($\alpha\beta$) kedalam sistem *direct quadrate* (dq). Sistem *direct quadrate* mempunyai sistem dua fase d dan q. Perbedaannya dengan fase alfa beta adalah besaran tegangan $v\alpha$ dan $v\beta$ berubah ubah terhadap waktu seperti fungsi sinus sedangkan besaran tegangan v_d dan v_q tetap konstan terhadap waktu seperti sumber tegangan dc (*direct current*).

Rumus tegangan pada sumbu abc:

$$V_{as} = R_s \cdot i_{as} + p \cdot \varphi_{as} \quad (2.19)$$

$$V_{bs} = R_s \cdot i_{bs} + p \cdot \varphi_{bs} \quad (2.20)$$

$$V_{cs} = R_s \cdot i_{cs} + p \cdot \varphi_{cs} \quad (2.21)$$

$$V_{ar} = R_s \cdot i_{ar} + p \cdot \varphi_{ar} \quad (2.22)$$

$$V_{br} = R_s \cdot i_{br} + p \cdot \varphi_{br} \quad (2.23)$$

$$V_{cr} = R_s \cdot i_{cr} + p \cdot \varphi_{cr} \quad (2.24)$$

Dengan menggunakan transformasi *Clarke*, tegangan diatas direduksi menjadi dua fase. Rumus transformasi *Clarke* :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

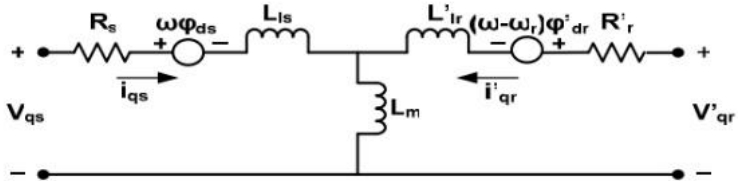
Setelah menjadi koordinat alfa beta maka ditransformasikan dengan transformasi *Park* menjadi sumbu dq. Rumus transformasi *Park* :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

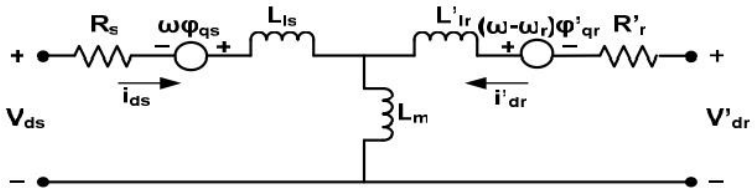
Sehingga didapatkan persamaan matriks untuk transformasi sumbu abc ke sumbu dq :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Menurut *Krause*, rangkaian ekuivalensi sumbu dq untuk motor induksi tiga fase seperti pada gambar 2.15 dan 2.16 di bawah :



Gambar 2. 16 Rangkaian Ekuivalensi Sumbu Q [4]



Gambar 2. 17 Rangkaian Ekuivalensi Sumbu D [4]

Persamaan tegangan stator dan rotor pada sumbu dq :

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \omega \varphi_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} \quad (2.28)$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} - \omega \varphi_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} \quad (2.29)$$

$$V'_{qr} = R'_r i'_{qr} + (\omega_g - \omega_r) \varphi'_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi'_{qr} \quad (2.30)$$

$$V'_{dr} = R'_r i'_{dr} - (\omega_g - \omega_r) \varphi'_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi'_{dr} \quad (2.31)$$

Persamaan fluks pada sumbu dq :

$$\varphi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + L_m \cdot i'_{qr} \quad (2.32)$$

$$\varphi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + L_m \cdot i'_{dr} \quad (2.33)$$

Dengan :

$$L_s = L_{ls} + L_M \quad (2.34)$$

$$\varphi'_{qr} = L'_r \cdot i'_{qr} + L_m \cdot i_{qs} \quad (2.35)$$

$$\varphi'_{dr} = L'_r \cdot i'_{dr} + L_m \cdot i_{ds} \quad (2.36)$$

Dengan :

$$L'_r = L'_{lr} + L_M \quad (2.37)$$

Sedangkan untuk persamaan torsi elektromagnetiknya adalah :

$$T_e = \frac{3p}{2} (\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \quad (2.38)$$

Persamaan kecepatan motor :

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{2J} (T_e - F \omega_m) \quad (2.39)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_m = \omega_m \quad (2.40)$$

Persamaan tegangan pada sumber dq menggunakan tegangan fase ke netral dapat ditulis sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2\cos\theta & (-\cos\theta + \sqrt{3}\sin\theta) & -(\cos\theta + \sqrt{3}\sin\theta) \\ 2\sin\theta & -(\sin\theta + \sqrt{3}\cos\theta) & (-\sin\theta + \sqrt{3}\cos\theta) \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2\cos\beta & (-\cos\beta + \sqrt{3}\sin\beta) & -(\cos\beta + \sqrt{3}\sin\beta) \\ 2\sin\beta & -(\sin\beta + \sqrt{3}\cos\beta) & (-\sin\beta + \sqrt{3}\cos\beta) \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

$$\begin{bmatrix} V'_{ar} \\ V'_{br} \\ V'_{cr} \end{bmatrix}$$

Sedangkan untuk persamaan arusnya :

$$\begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos\theta}{2} & \frac{\sin\theta}{2} \\ \frac{-\cos\theta + \sqrt{3}\sin\theta}{2} & \frac{-\sqrt{3}\cos\theta - \sin\theta}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

$$\begin{bmatrix} i'_{ar} \\ i'_{br} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos\beta}{2} & \frac{\sin\beta}{2} \\ \frac{-\cos\beta + \sqrt{3}\sin\beta}{2} & \frac{-\sqrt{3}\cos\beta - \sin\beta}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

$$i_{as} + i_{bs} + i_{cs} = 0 \quad (2.45)$$

$$i'_{ar} + i'_{br} + i'_{cr} = 0 \quad (2.46)$$

Tabel 2.3 Notasi dan Keterangan Parameter Pemodelan

Notasi	Keterangan
V_{as}	Tegangan fase a pada stator (volt)
V_{bs}	Tegangan fase b pada stator (volt)
V_{cs}	Tegangan fase c pada stator (volt)
V_{ar}	Tegangan fase a pada rotor (volt)
V_{br}	Tegangan fase b pada rotor (volt)
V_{cr}	Tegangan fase c pada rotor (volt)
i_{as}	Arus fase a pada stator (A)
i_{bs}	Arus fase b pada stator (A)
i_{cs}	Arus fase c pada stator (A)
i_{ar}	Arus fase a pada rotor (A)
i_{br}	Arus fase b pada rotor (A)
i_{cr}	Arus fase c pada rotor (A)
R_s	Resistansi stator (Ω)
R_r	Resistansi rotor (Ω)
p	<i>Pole</i>
φ_{as}	Fluks fase a pada stator (Wb)
φ_{bs}	Fluks fase b pada stator (Wb)
φ_{cs}	Fluks fase c pada stator (Wb)
φ_{ar}	Fluks fase a pada rotor (Wb)
φ_{br}	Fluks fase b pada rotor (Wb)
φ_{cr}	Fluks fase c pada rotor (Wb)
V_α	Tegangan fase alfa (volt)
V_β	Tegangan fase beta (volt)
V_d	Tegangan fase d (volt)
V_q	Tegangan fase q (volt)

V_a	Tegangan fase a (volt)
V_b	Tegangan fase b (volt)
V_c	Tegangan fase c (volt)
i_{ds}	Arus fase d pada stator (A)
i_{qs}	Arus fase q pada stator (A)
i_{dr}	Arus fase d pada rotor (A)
i_{qr}	Arus fase q pada rotor (A)
φ_{qs}	Fluks fase q pada stator (Wb)
φ_{ds}	Fluks fase d pada stator (Wb)
φ_{qr}	Fluks fase q pada rotor (Wb)
φ_{dr}	Fluks fase d pada rotor (Wb)
L_s	Induktansi stator (H)
L_{is}	Induktansi bocor stator (H)
L_r	Induktansi rotor (H)
L_{ir}	Induktansi bocor rotor (H)
T_e	Torsi elektromagnetik (N.m)
T_m	Torsi beban (N.m)
F	Koefisien gesekan (N.m.s)
ω_m	Kecepatan agular rotor (rad/s)
J	Momen inersia (kg.m ²)
θ_m	Perpindahan sudut rotor (rad)

2.8 Gambaran Umum Software FluxMotor

Penggunaan perangkat lunak atau biasa disebut *software* pada masa ini telah berkembang dengan pesat. berbagai informasi dan fitur telah disediakan untuk mempermudah memperoleh data maupun kemudahan yang lain. Berbagai kebutuhan baik dalam bidang industri, sosial, ekonomi dan sebagainya dapat dipenuhi dengan lebih mudah melalui bantuan dari *software.*, termasuk *Software fluxmotor.*

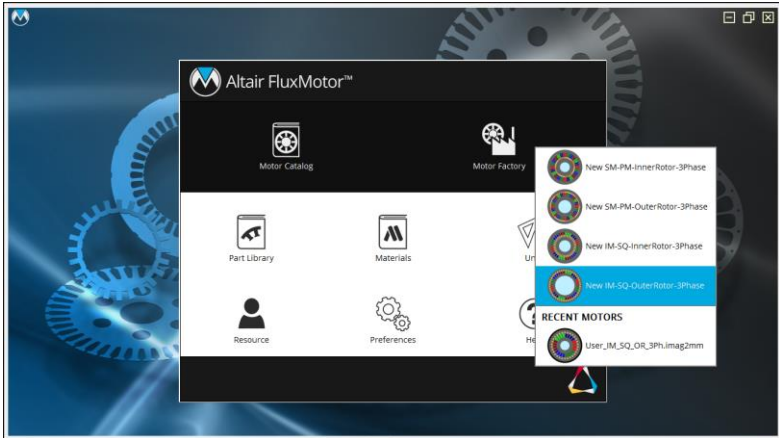
Software fluxmotor dibuat oleh perusahaan altair. *Software* ini bergerak pada bidang industri maupun teknologi. *Software* ini digunakan untuk mempermudah mendesain serta menyimulasikan salah satu mesin listrik yaitu motor listrik. Setidaknya hingga versi 2019.1, *software* ini dapat mendesain dan menyimulasikan empat bentuk motor listrik yaitu motor sinkron rotor dalam, motor sinkron rotor luar, motor induksi rotor dalam dan motor induksi rotor luar.

Menggunakan *software* fluxmotor untuk mendesain motor akan terasa lebih mudah. *Software* fluxmotor sengaja didesain untuk mempermudah penggunaan terhadap pengguna (*human interface*). Mendesain motor menggunakan *software* ini cukup dengan memasukkan parameter-parameternya saja tanpa perlu menggambarinya terlebih dahulu sehingga memudahkan kita untuk mendesain motor terutama bagi teknisi maupun pengguna yang tidak ada latar belakang dalam hal mendesain. Gambar 2.18 berikut adalah contoh tampilan pada *software* fluxmotor



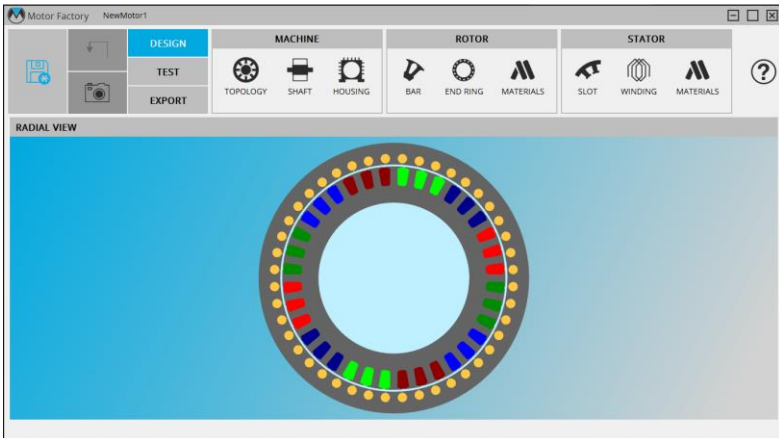
Gambar 2. 18 Halaman Depan FluxMotor

Untuk memulai mendesain, Anda dapat mengklik tombol *motor factory* dan akan muncul dilayar seperti pada gambar 2.16 di bawah



Gambar 2. 19 Motor Factory FluxMotor

Karena pada tugas akhir ini akan dibuat desain dari motor induksi rotor luar, maka akan di klik gambar dengan tulisan *New IM-SQ-OuterRotor-3Phase*. Selanjutnya, akan muncul dilayar seperti pada gambar 2.17. di bawah dan anda bisa mendesain motor tersebut.



Gambar 2. 20 Rotor Luar FluxMotor

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

PERANCANGAN DESAIN MOTOR

Pada bab ini akan dibahas tentang bagaimana merancang desain motor induksi rotor luar dengan menggunakan *software* fluxmotor. *software* tersebut menggunakan metode *Finite Element Methode* (FEM) untuk analisisnya.

3.1 Finite Element Methode (FEM)

Finite element method atau Metode elemen hingga merupakan salah satu metode numerik yang dapat digunakan untuk menyelesaikan persamaan integral dan diferensial. metode ini sering digunakan untuk menyelesaikan permasalahan elektromagnetik sehingga dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan motor induksi.

Konsep dasar dari FEM adalah menyelesaikan permasalahan dengan membagi objek ke dalam bentuk mesh (kumpulan elemen) menjadi bagian-bagian kecil yang terhingga. Bagian-bagian kecil ini akan dianalisa sesuai dengan permasalahannya dan hasilnya akan dikumpulkan kembali untuk menyelesaikan persamaannya.

Jenis masalah yang hendak diselesaikan menggunakan metode FEM dibagi menjadi dua, yaitu analisis struktur dan analisis non-struktur. Pada motor induksi, analisis yang digunakan adalah analisis non-struktur. Analisis tersebut digunakan untuk menganalisa potensial medan magnet dan medan listrik.

Metode FEM dapat digunakan pada bentuk yang tidak teratur dan mudah dianalisa. Metode ini juga dapat digunakan pada permasalahan yang memiliki berbagai macam syarat batas dalam jumlah yang banyak.

3.2 Desain Konstruksi

Menurut KBBI (Kamus Besar Bahasa Indonesia) arti kata konstruksi yang tepat pada pembahasan ini adalah susunan (model, tata letak) suatu bangunan (jembatan, rumah dan sebagainya). Konstruksi motor induksi rotor luar berarti susunan (model) dari motor induksi dengan menepatkan rotor di luar stator. mendesain konstruksi motor induksi berarti mendesain parameter-parameter fisiknya seperti stator, rotor dan sebagainya.

3.2.1 Desain Ukuran Mesin

Hal pertama yang diperhatikan adalah berapa ukuran dari mesin yang akan dibuat, berapa ukuran stator, ukuran rotor, celah udaranya dan

sebagainya. Hal ini akan mempengaruhi performa dari motor. Desain akan dibuat melalui *software* fluxmotor. Untuk ukuran mesin akan disesuaikan untuk penggunaan motor sebagai penggerak mobil listrik yang bertempat di dalam roda (*in-wheel*). Berikut adalah tabel nilai dari beberapa parameter yang digunakan pada jurnal referensi nomor 3.

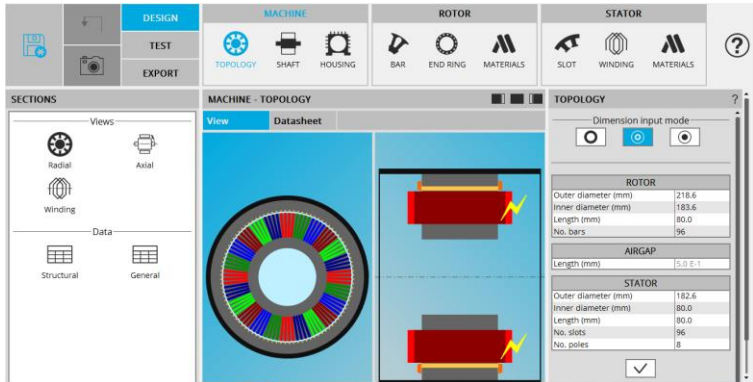
Tabel 3.1 Ukuran Parameter Mesin Motor

Keterangan	nilai
Lebar motor	80 mm
Diameter dalam stator	80 mm
Diameter luar stator	182,6 mm
Diameter dalam rotor	183,6 mm
Diameter luar rotor	218,6 mm
Diameter <i>housing</i>	228,6 mm
Diameter kabel	2 mm
Tebal isolasi kabel	0,053 mm
Tebal Prespan	0,12 mm

Parameter di atas telah memenuhi dan dapat digunakan sebagai penggerak mobil listrik. Diameter dalam stator berukuran 80 mm cocok sebagai poros roda. Karena ban mobil hanya disangga satu sisi maka ukuran poros besar. Ukuran 80Mmm sudah banyak terdapat pada mobil yang beredar. Untuk ukuran rotor semakin tipis rotor akan semakin jauh dari pusat motor maka semakin tinggi torsi yang dibangkitkan namun semakin sedikit fluks dari medan putar yang terinduksi pada rotor. Jumlah slot pada rotor dan stator harus dengan kelipatan dari jumlah kutub.

Diameter dari *housing* sebesar 228.6 mm disesuaikan dengan diameter standar tromol mobil. Ukuran air gap ditas adalah 0,5 mm yang mana ukuran tersebut sudah kecil. Panjang sirkuit magnetik juga berupa panjang dari motor. Panjang motor sebesar 80 mm dapat digunakan sebagai penggerak mobil yang berada di dalam roda. Diameter kabel sebesar 2 mm karena bila lebih kecil maka arus maksimal yang ditampung juga mengecil dan bila lebih besar maka bila menggulungnya dapat mematahkan isolasi kabel tersebut. Untuk ukuran parameter yang lainnya akan dinyatakan baik berdasarkan simulasi dan analisa maupun

spesifikasi pada mobil listrik yang telah ada. Berikut adalah gambar tampilan dari *software* dan cara memasukkan nilai dari parameter ukuran mesin.



Gambar 3. 1 Halaman Topologi Software FluxMotor

Untuk memasukkan nilai dari parameter-parameternya dapat ditulis pada tabel bagian bawah dan kanan pada gambar.

ROTOR	
Outer diameter (mm)	218.6
Inner diameter (mm)	183.6
Length (mm)	80.0
No. bars	96

AIRGAP	
Length (mm)	5.0 E-1

STATOR	
Outer diameter (mm)	182.6
Inner diameter (mm)	80.0
Length (mm)	80.0
No. slots	96
No. poles	8

Gambar 3. 2 Masukan Parameter Mesin FluxMotor

Untuk ukuran *housing* sesuai dengan parameter referensi di atas. diameter housing sebesar 228,6 mm dikurangi diameter luar rotor sebesar 218.6

mm menjadi 10 mm. 10 mm untuk sisi atas dan bawah maka untuk satu sisi dibagi dua menjadi 5 mm. Letak *housing* diasumsikan di tengah dengan ketebalan 0,5 mm

INPUTS	
Thickness (mm)	5.0
C.S. extension (mm)	45.0
C.S. thickness (mm)	0.6
O.C.S. extension (mm)	45.0
O.C.S. thickness (mm)	0.6

Gambar 3. 3 Masukan Parameter Housing *Software FluxMotor*

3.2.2 Desain Rotor

Mendesain Rotor berarti mendesain bentuk dan ukuran dari batang rotor, cincin dan material dari rotor. Menurut NEMA (*National Electrical Manufacture Association*), terdapat empat tipe motor induksi yang dibedakan berdasarkan konstruksi batang rotornya

a. Kelas A

Motor jenis ini mempunyai batang rotor yang lebar dan rapat (jarak antar batang dekat). Mempunyai karakteristik torsi *starting* yang normal, arus yang tinggi dan slip kerja yang rendah. Motor jenis ini dapat digunakan pada peralatan listrik yang membutuhkan torsi *starting* rendah seperti pompa atau kipas angin agar kecepatan penuh dapat segera tercapai dan Arus *start* yang tinggi yang menimbulkan panas berlebih dapat diatasi.



Gambar 3. 4 Konstruksi Jenis Rotor Kelas A [11]

b. Kelas B

Motor jenis ini mempunyai batang rotor yang panjang, lebar (lebih lebar dari kelas a), longgar (jarak antar batang jauh) dan panjang. Motor ini mempunyai karakteristik torsi *starting* yang normal, arus *start* rendah dan slip yang rendah. Torsi awal kelas ini hampir sama dengan kelas A dengan arus awal yang jauh lebih rendah akibat desain batang rotor yang dalam sehingga kebocoran reaktansi semakin besar. Kebocoran reaktansi semakin besar mengakibatkan torsi yang rendah



Gambar 3. 5 Konstruksi Jenis Rotor Kelas B [11]

c. Kelas C

Kelas ini memiliki konstruksi batang rotor *double-cage*, karena desain seperti itu maka harganya relatif lebih mahal daripada kelas yang lain.. Tipe ini memiliki torsi *starting* yang tinggi, arus *starting* rendah dan slip yang rendah. Tipe ini dapat digunakan untuk pada mesin listrik yang

membutuhkan torsi awal tinggi dan arus start rendah, seperti kompresor, penghancur, pompa, dsb.



Gambar 3. 6 Konstruksi Jenis Rotor Kelas C [11]

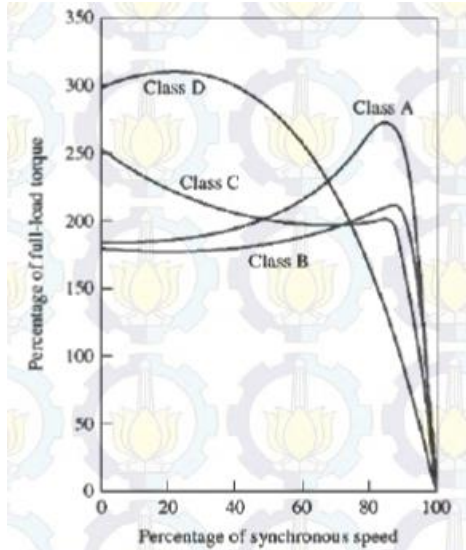
d. Kelas D

Motor jenis ini mempunyai konstruksi dengan batang rotor yang kecil dan pendek. Kelas ini mempunyai karakteristik torsi *starting* yang paling tinggi dibanding dengan kelas lainnya. Arus start pada kelas ini juga rendah dan slipnya tinggi. Slip pada beban penuh berkisar 8-15 persen. Efisiensi kelas ini rendah. Motor kelas ini cocok digunakan untuk mesin listrik yang membutuhkan akselerasi yang cepat dan beban yang besar. Cocok untuk digunakan untuk perubahan beban yang terjadi secara cepat dan mendadak seperti elevator, *crane*, mobil listrik.



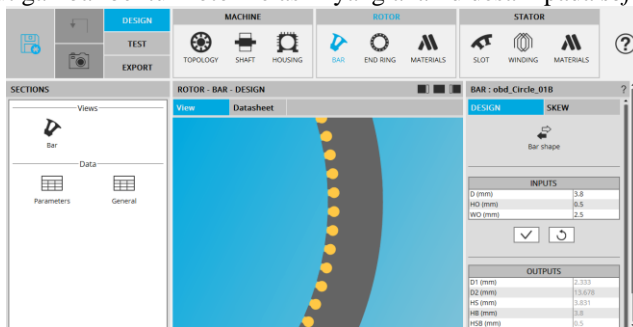
Gambar 3. 7 Konstruksi Jenis Rotor Kelas D [11]

Berikut adalah karakteristik torsi-kecepatan setiap kelas



Gambar 3. 8 Perbandingan Performa Torsi dengan Kecepatan Sinkron

Untuk aplikasi mobil listrik yang paling cocok adalah rotor kelas D karena memiliki torsi *starting* yang tinggi, akselerasi, yang cepat dan beban yang besar. Sedangkan untuk kecepatan tidak butuh terlalu cepat. Berikut gambar bentuk rotor kelas D yang akan didesain pada *software*



Gambar 3. 9 Halaman Parameter Batang Rotor FluxMotor

Untuk parameter-parameternya dapat kita masukkan pada sebelah kanan gambar.

BAR : obd_Circle_01B ?

DESIGN SKEW

Bar shape

INPUTS

D (mm)	6.5
HO (mm)	1.0
WO (mm)	1.0

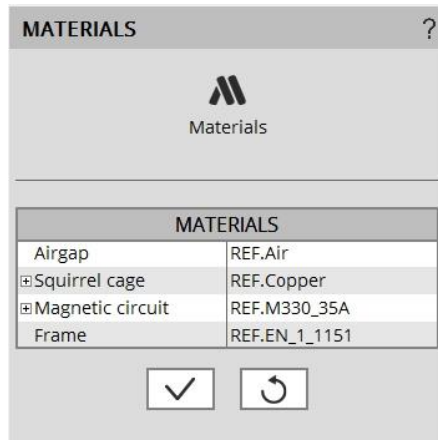
✓ ↻

OUTPUTS

D1 (mm)	5.502
D2 (mm)	8.591
HS (mm)	7.461
HB (mm)	6.5
HSB (mm)	1.0

Gambar 3. 10 Masukan Parameter Batang Rotor FluxMotor

Untuk memasukkan Parameter material dari rotor dimasukkan pada gambar seperti di bawah.



Gambar 3. 11 Masukan Parameter Material Rotor FluxMotor

3.2.3 Desain Stator

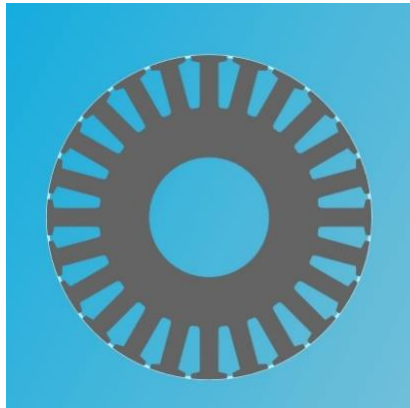
Mendesain stator berarti mendesain bagian motor induksi yang statis (diam). Sama halnya dengan rotor, mendesain stator dimulai dari memasukkan parameter-parameter fisik stator terutama rongga dari stator. Jumlah rongga stator pada awalnya dipilih 96 rongga karena jumlah tersebut adalah jumlah terbanyak yang memungkinkan untuk desain motor yang dipakai dengan kabel 2 mm. Sedangkan untuk tegangan dapat kita asumsikan dengan tegangan baterai yang tersedia diperdagangan yaitu 72 volt. Kita asumsikan nilai 72 volt karena apabila tegangan terlalu tinggi dapat membahayakan pengguna mobil.

Bentuk rongga stator juga harus diperhatikan ukurannya. Diameter kabel sebesar 2 mm, isolasi kabel sebesar 0,053 mm dan tebal prespan sebesar 0,12 mm. Sehingga bila terdapat satu kabel maka ukuran yang diperlukan berkisar 2 mm ditambah 0,053 mm dikali dua ditambah 0,12 mm dikali dua sehingga ukurannya menjadi 2,4 mm. Begitu juga bila terdapat dua tumpuk kabel maka ukuran rongga yang dibutuhkan adalah 4,5 mm dan seterusnya. Bila untuk ukuran panjang rongga stator maka ditambahkan 1 mm untuk ukurannya dikarenakan terdapat ukuran 1 mm untuk pintu dari rongga stator.

Material yang digunakan pada kabel berupa tembaga asli sedangkan material yang digunakan pada prespan dapat berupa mika.



Gambar 3. 12 Parameter Ho Pada Rongga Stator



Gambar 3. 13 Bentuk Stator

SLOT : is_Free_01B

DESIGN SKEW

Slot shape

INPUTS	
HS (mm)	35.0
WS2 (mm)	2.4
H1 (mm)	5.103 E-1
WS1 (mm)	2.4
HO (mm)	1.0
WO (mm)	2.1
R (mm)	1.0

✓ ↻

Gambar 3. 14 Masukan Parameter Rongga Stator FluxMotor

NO. CONDUCTORS	
No. turns per coil	16
No. wires in hand	1

WIRE DIMENSIONS	
Wire diameter (mm)	2.0

INSULATION THICKNESSES	
Wire (mm)	0.053
Conductor (mm)	0.0
Coil (mm)	0.0
Liner (mm)	0.0
Phase separator (mm)	0.0

Gambar 3. 15 Masukan Parameter *Winding* Stator

3.3 Perhitungan Parameter

Sebelum melakukan simulasi, terdapat beberapa parameter yang perlu dihitung dan digunakan sebagai rujukan maupun masukan simulasi nantinya.

3.3.1 Batas Arus Stator

Batas arus yang dapat dilewati oleh kabel berbeda beda tergantung dari material maupun luas penampangnya. Pada tugas akhir ini akan disimulasikan kabel berdiameter 2 mm dengan material tembaga. Luas penampang kabel berdiameter 2 mm sebesar $3,14 \text{ mm}^2$. Berikut adalah tabel yang kami dapat dari sebuah web

Tabel 3. 2 Batas Arus Kabel Tembaga

Luas Penampang (mm^2)	Batas Arus (A)	Batas Arus Pada Motor (A)
0,75	11	8,8
1	14	11,2
1,5	16	12,8
2,5	23	18,4
4	33	26,4
6	40	32

*<https://berbagaiukuran.blogspot.com>

Setelah didapat data di atas, dilakukan *plotting* dan ditemukan bahwa pada luas penampang $3,14 \text{ mm}^2$ kabel tembaga memiliki kemampuan membawa arus sebesar 22 A.

3.3.2 Nilai Frekuensi Sumber

Batas Kecepatan yang digunakan untuk simulasi nantinya sebesar 25 km/jam pada saat slip sebesar 5%. Untuk diameter roda ditetapkan sebesar 0,6 m. Maka kelilingnya sebesar 1,884 m. Misal jumlah kutub sebanyak 32, Perhitungan frekuensi akan dilakukan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} v_{batas} &= v_{rated} \cdot \frac{10}{9,5} \\ &= 25 \cdot \frac{10}{9,5} \\ &= 26,316 \text{ km/jam} \\ &= 7.31 \text{ m/s} \end{aligned} \tag{3.1}$$
$$n_s = \frac{v_{batas}}{\frac{k_{roda}}{7,31}} = \frac{7,31}{1,884}$$

$$= 3.88 \text{ rps} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} f_s &= n_s \cdot p \cdot \frac{1}{2} \\ &= 3,88 \cdot 32 \cdot \frac{1}{2} \\ &= 62,08 \text{ Hz} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Frekuensi dibulatkan menjadi 62 Hz untuk jumlah kutub 32. Sehingga pada saat simulasi nantinya untuk 32 kutub diberi frekuensi sebesar 62 Hz, Untuk 16 kutub diberi frekuensi 31 Hz, 8 kutub diberi frekuensi 15,5 Hz, 4 kutub diberi frekuensi 7,75 Hz, dan untuk 2 kutub diberi frekuensi 3,875 Hz.

Tabel 3. 3 Notasi dan Keterangan Perancangan Nilai Frekuensi Sumber

Notasi	Keterangan
v_{batas}	Kecepatan pada saat slip 0% (m/s)
v_{rated}	Kecepatan pada saat slip 5% (m/s)
n_s	Kecepatan motor (rpm)
f_s	Frekuensi Sumber

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4 SIMULASI DAN ANALISA

Pada bab ini akan dilakukan simulasi untuk mencari hasil yang terbaik. Simulasi bertujuan untuk mencari jumlah kutub, ukuran dan jumlah lubang stator, ukuran dan jumlah batang rotor, jumlah lilitan, dsb. nilai frekuensi sumber disesuaikan dengan jumlah kutub sehingga menghasilkan kecepatan 25 km/jam pada saat slip sebesar 5%.

4.1 Simulasi awal

Pada tahap ini akan kita bandingkan bagaimana performansi dari perbedaan jumlah kutub, lilitan, ukuran slot stator untuk masing-masing jumlah slot. Simulasi dimulai dengan jumlah slot terbanyak yang memungkinkan yaitu sebanyak 96 slot. Jumlah ini memungkinkan untuk diisi maksimal 32 kutub. Berikut adalah gambar ukuran ws yang dimaksud pada lubang stator.



Gambar 4. 1 Ws Pada Slot Stator

4.1.1 Simulasi Slot 96/120

Simulasi slot 96/120 berarti jumlah slot stator sebanyak 96 buah dan slot rotor sebanyak 120 buah

Tabel 4. 1 Hasil Simulasi Slot 96/120

Ws (mm)	lilitan/ slip (%)	torsi			arus		efisiensi
		6	31,4	100	6	100	
2,4	32 kutub						
	23	0,69	5,61	13,72	16,34	17,97	0,18
	22	0,73	5,83	14,32	16,81	18,46	0,18
	21	0,78	6,15	15,12	17,39	19,10	0,18
	20	0,85	6,57	16,14	18,16	19,94	0,19
	19	0,95	7,10	17,45	19,17	21,01	0,19
	18	1,07	7,79	19,12	20,50	22,39	0,19
	16 kutub						

17	2,43	13,36	33,80	18,27	20,04	0,31
16	2,69	14,70	37,17	19,27	21,02	0,32
15	3,03	16,37	41,31	20,73	22,40	0,32
8 kutub						
16	2,96	15,80	42,16	13,22	15,16	0,44
15	3,37	17,86	47,33	14,24	16,41	0,44
14	3,87	20,35	53,53	15,83	18,13	0,44
13	4,48	23,39	61,00	18,20	20,45	0,44
12	5,23	27,11	70,07	21,66	23,55	0,42
4 kutub						
12	2,24	12,87	38,23	28,33	24,19	0,17
2 kutub						
24	0,06	0,54	1,81	21,06	20,87	0,01

Hasil terbaik simulasi di atas dimiliki oleh 8 kutub dengan 13 lilitan.

4.1.2 Simulasi Slot 72/90

Jumlah slot selanjutnya yaitu 72/90 karena disimulasi sebelumnya hasil terbaiknya memiliki 8 kutub. Maka kelipatan untuk 3 fase berarti 24 buah. Sehingga slot 96 dikurang 24. Sedangkan untuk slot rotor ditetapkan sesuai dengan perbandingan slot sebelumnya.

Tabel 4. 2 Hasil Simulasi Slot 72/90

		torsi			arus		efisiensi
8 kutub							
Ws (mm)	lilitan/ slip (%)	6	31,4	100	6	100	31,4
2,4	16	4,00	21,41	56,51	19,72	21,00	0,40
	15	4,54	24,14	63,34	22,40	23,32	0,39
4,5	16	3,73	20,00	55,17	30,87	28,34	0,24
4 kutub							
2,4	16	1,70	10,31	31,72	34,66	30,01	0,10
4,5	16	1,87	10,94	33,07	30,90	26,82	0,13

Hasil terbaik simulasi di atas dimiliki oleh 8 kutub dengan 16 lilitan dan ws sebesar 2,4 mm.

4.1.3 Simulasi Slot 48/60

Tabel 4. 3 Hasil Simulasi Slot 48/60

Ws (mm)	lilitan/ slip (%)	torsi			arus		efisiensi
		6	31,4	100	6	100	
8 kutub							
2,4	23	3,60	19,15	50,91	49,37	48,53	0,12
4,5	22	3,21	17,87	50,49	21,67	21,28	0,36
	20	3,84	21,22	59,68	28,51	26,71	0,31
6,6	24	2,56	14,37	41,62	29,23	27,04	0,21
4 kutub							
2,4	23	1,06	7,12	22,61	66,14	62,96	0,02
4,5	22	1,54	9,53	29,53	32,32	28,42	0,11
6,6	24	1,42	8,72	27,00	23,30	20,45	0,17
16 kutub							
4,5	26	1,70	10,60	29,53	20,78	20,99	0,27
	24	2,06	12,45	34,78	22,83	22,90	0,28

Hasil terbaik simulasi di atas dimiliki oleh 8 kutub dengan 22 lilitan dan ws sebesar 4,5 mm.

4.1.4 Simulasi Slot 24/30

Tabel 4. 4 Hasil Simulasi Slot 24/30

Ws {mm}	lilitan/ slip (%)	torsi			arus		efisiensi
		6	31,4	100	6	100	
8 kutub							
4,5	48	1,35	8,62	25,21	40,74	40,48	0,08
6,6	48	0,96	6,57	19,79	12,19	12,41	0,35
	45	1,12	7,49	22,49	14,02	14,09	0,34
	42	1,32	8,60	25,77	16,67	16,45	0,31
	39	1,56	9,97	29,76	20,50	19,79	0,28
	36	1,84	11,63	34,64	26,08	24,58	0,25
8,7	40	1,54	9,68	29,11	21,04	20,03	0,27
	36	1,90	11,78	35,34	29,26	27,19	0,21
10,8	40	1,55	9,64	29,24	27,34	25,62	0,19
	45	1,22	7,74	23,55	19,36	18,45	0,24
12,9	48	1,06	6,74	20,68	23,28	22,11	0,16

4 kutub							
6,6	39	0,71	5,69	18,63	45,65	42,42	0,04

Hasil terbaik simulasi di atas dimiliki oleh 8 kutub dengan 39 lilitan dan ws sebesar 6,6 mm.

4.1.5 Slot Terbaik

Hasil terbaik dari masing-masing slot akan dibandingkan dan dipilih yang terbaik yang nantinya akan digunakan untuk simulasi selanjutnya dan akan dicari parameter terbaik lainnya.

Tabel 4. 5 Hasil Perbandingan Slot

8 kutub								
			torsi			arus		Efisi ensi
slot (S/ R)	Ws (mm)	lilitan/ slip (%)	6	31,4	100	6	100	31,4
96/ 120	2,4	13	4,48	23,39	61,00	18,20	20,45	0,44
72/ 90	2,4	16	4,00	21,41	56,51	19,72	21,00	0,40
48/ 60	4,5	22	3,21	17,87	50,49	21,67	21,28	0,36
24/ 30	6,6	39	1,56	9,97	29,76	20,50	19,79	0,28

Dari hasil perbandingan di atas, diketahui bahwa slot 96/120 dengan ws sebesar 2,4 mm, lilitan sebanyak 13 lilitan dan jumlah kutub sebanyak 8 adalah hasil terbaik dari simulasi awal yang nantinya akan dipakai untuk simulasi lanjutan.

4.2 Simulasi Lanjutan

Simulasi berikutnya akan disimulasikan parameter seperti *air gap*, ukuran rotor, jumlah batang rotor, dan jumlah lilitan stator untuk dicari desain terbaik yang bisa digunakan sebagai motor *in-wheel* untuk mobil listrik.

4.2.1 Simulasi *Air Gap*

Tabel 4. 6 Hasil Simulasi *Air Gap*

	torsi			arus		efisiensi
<i>Air gap</i> /slip (%)	6	31,4	100	6	100	31,4
0,5 mm	4,48	23,39	61,00	18,20	20,45	0,44
1 mm	4,12	21,71	57,50	23,03	23,48	0,35

Karena hasil *air gap* 0,5 mm dan 1 mm berbeda lumayan jauh, maka *air gap* akan dipilih 0,5 mm. Kita asumsikan 0,5 mm sudah menjadi batas ukuran *air gap* terkecil.

4.2.2 Simulasi Diameter Batang Rotor

Pada tahap ini akan dicari jumlah serta ukuran batang rotor terbaik. Pertama akan digunakan jumlah batang rotor sebesar 96 dahulu.

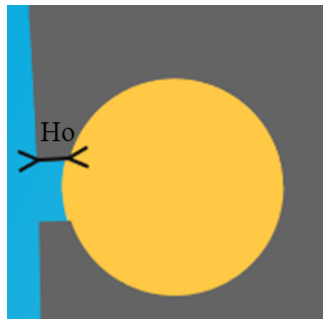
4.2.2.1 Simulasi Diameter Batang Rotor

Tabel 4. 7 Hasil Simulasi Diameter Batang Rotor

	torsi			arus		efisiensi
diameter/slip (%)	6	31,4	100	6	100	31,4
2 mm	3,74	19,98	54,16	18,19	19,17	0,41
3 mm	6,99	34,29	79,03	17,95	24,94	0,49
4 mm	9,58	44,79	91,03	18,63	29,88	0,51
5 mm	10,42	47,19	92,98	22,75	33,65	0,47
4,5 mm	10,25	47,37	93,58	20,23	31,82	0,50
3,5 mm	8,46	40,21	86,26	17,91	27,61	0,51
4,1 mm	9,75	45,46	91,74	18,88	30,29	0,51
3,9 mm	9,39	44,04	90,23	18,41	29,46	0,51
3,8 mm	9,19	43,21	89,36	18,22	29,02	0,51
3,7 mm	8,96	42,28	88,42	18,07	28,57	0,51

Dikarenakan banyaknya parameter yang berkaitan maka untuk batas arus sebesar 22 A akan kita abaikan dahulu dan akan diperhitungkan selanjutnya. Diameter rotor terbaik untuk jumlah batang rotor sebanyak 96 sementara adalah 3,8 mm

4.2.2.2 Simulasi Ukuran Ho Batang Rotor



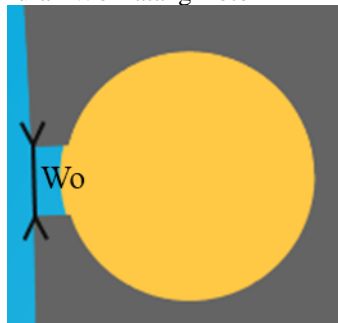
Gambar 4. 2 Parameter Ho Pada Batang Rotor

Tabel 4. 8 Hasil Simulasi Parameter Ho Pada Batang Rotor

Ho/slip (%)	torsi			arus		efisiensi
	6	31,4	100	6	100	31,4
0,5 mm	9,19	43,21	89,36	18,22	29,02	0,51
1 mm	9,15	42,96	87,09	18,19	29,05	0,51

Dipilih ukuran Ho sebesar 0,5 mm.

4.2.2.3 Simulasi Ukuran Wo Batang Rotor



Gambar 4. 3 Parameter Wo Pada Batang Rotor

Tabel 4. 9 Hasil Simulasi Parameter Wo Pada Batang Rotor

Wo/slip (%)	torsi			arus		efisiensi
	6	31,4	100	6	100	31,4
Wo/slip (%)	6	31,4	100	6	100	31,4

1 mm	9,19	43,32	90,83	18,27	28,97	0,5121
1,5 mm	9,18	43,30	91,47	18,36	28,96	0,5116
1.1 mm	9,19	43,32	91,01	18,28	28,97	0,5121

Dipilih ukuran W_o sebesar 1,1 mm Karena efisiensi yang lebih besar dari 1,5 mm dan torsi akhir yang lebih besar untuk arus dan efisiensi yang sama dengan ukuran 1 mm.

4.2.2.4 Simulasi Diameter dan Jumlah Batang Rotor

Tabel 4. 10 Hasil Simulasi Diameter dan Jumlah Batang Rotor

Slot Rotor	Wo/slip (%)	torsi			arus		efisiensi
		6	31,4	100	6	100	31,4
120	3 mm	7,93	38,23	84,75	18,44	26,85	0,498
	2,9 mm	7,63	36,98	83,16	18,32	26,25	0,4954
	3.1 mm	8,21	39,39	86,21	18,62	27,42	0,4993
	3,2 mm	8,46	40,44	87,51	18,84	27,98	0,4994
	3,3 mm	8,70	41,40	88,65	19,11	28,53	0,4985
104	3,8 mm	9,34	43,88	90,66	19,10	29,69	0,5033
	3,7 mm	9,14	43,11	83,81	18,84	29,23	0,5047
	3,6 mm	8,93	42,26	88,86	18,62	28,76	0,5054
	3,5 mm	8,70	41,32	87,80	18,44	28,28	0,5051
96	3,8 mm	9,19	43,32	91,01	18,28	28,97	0,5121

Dipilih slot rotor sebanyak 96 karena efisiensinya paling tinggi.

4.2.2.4.1 Simulasi Ukuran W_o Dengan Jumlah Lilitan Stator

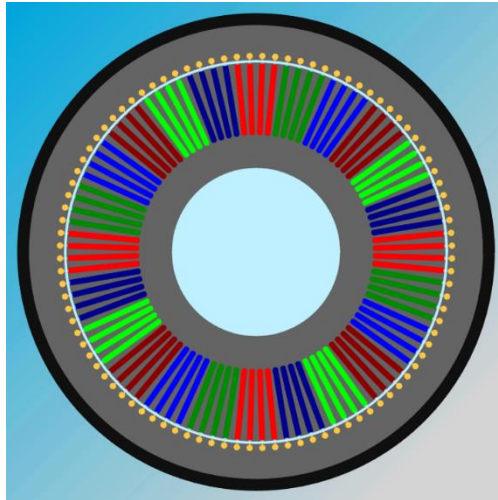
Lilitan	Wo/slip (%)	torsi			arus		efisiensi
		6	31,4	100	6	100	31,4
15	0,5 mm	7,02	33,37	70,24	14,02	23,16	0,52
	1,5 mm	7,00	33,43	72,13	14,13	23,09	0,52
	2 mm	6,98	33,35	72,35	14,25	23,09	0,52
	0,9 mm	7,02	33,44	71,41	14,04	23,11	0,52
16	0,9 mm	6,19	29,71	63,93	13,03	21,11	0,52
	1 mm	6,19	29,72	64,09	13,04	21,10	0,52
	1,1 mm	6,19	29,72	64,23	13,05	21,09	0,52
	1,5 mm	6,18	29,70	64,60	13,11	21,08	0,52
	2 mm	6,16	29,63	64,81	13,22	21,08	0,51
	2,5 mm	6,12	29,49	64,82	13,41	21,11	0,51

Dipilih jumlah lilitan 16 dan panjang W_o sebesar 2,5 mm karena menghasilkan torsi awal yang paling tinggi dengan efisiensi yang tidak jauh berbeda.

4.3 Desain Final

Setelah serangkaian simulasi yang telah dikerjakan, desain final atau desain akhir juga didapatkan. Desain final merupakan desain terbaik yang didapat selama proses simulasi.

4.3.1 Desain Mesin Secara Umum



Gambar 4. 4 Desain Motor Secara Umum

Tabel 4. 11 Parameter Umum Motor

Keterangan	Nilai
Lebar Motor	80 mm
Diameter Dalam Stator	80 mm
Diameter Luar Stator	182,6 mm
Diameter Dalam Rotor	183,6 mm
Diameter Luar Rotor	218,6 mm
Diameter Housing	228,6 mm

Diameter Kabel	2 mm
Tebal Isolasi	0,053 mm
Tebal Prespan	0,12 mm
Jumlah kutub	8
Jumlah lilitan	16
Jumlah Slot Stator	96
Jumlah Slot Rotor	96
Air gap	0,5 mm

4.3.2 Desain Parameter Rongga Stator



Gambar 4. 5 Desain Rongga Stator

Tabel 4. 12 Parameter Rongga Stator

Keterangan	Nilai
Panjang slot (H_s)	35 mm
Lebar slot 1 (w_{s1})	2,4 mm
Lebar slot 2 (w_{s2})	2,4 mm
Tinggi kemiringan pintu slot (H_0)	1 mm
Jari-jari kelengkungan di ujung (R)	1 mm
Panjang garis miring setelah pintu (H_1)	0,5 mm

4.3.3 Desain Parameter Lubang Rotor



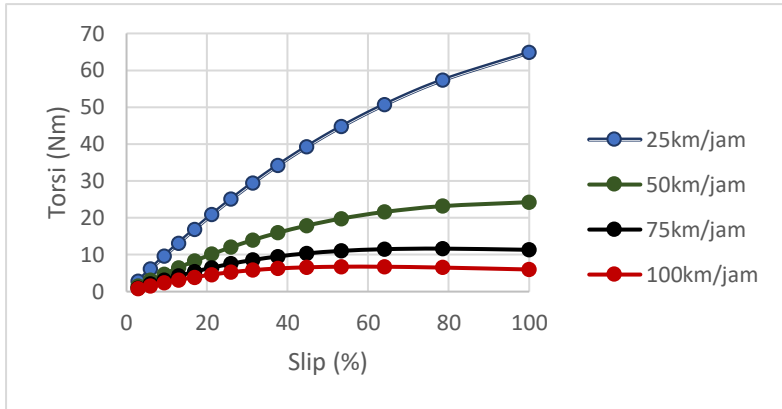
Gambar 4. 6 Desain Lubang Rotor

Tabel 4. 13 Parameter Lubang Rotor

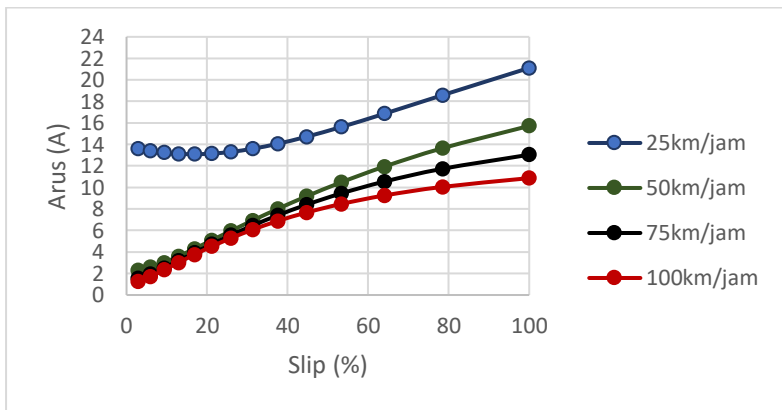
Keterangan	Nilai
Diameter batang rotor	3.8 mm
Panjang pintu	0,5 mm
Lebar pintu	2.5 mm

4.4 Simulasi Kecepatan

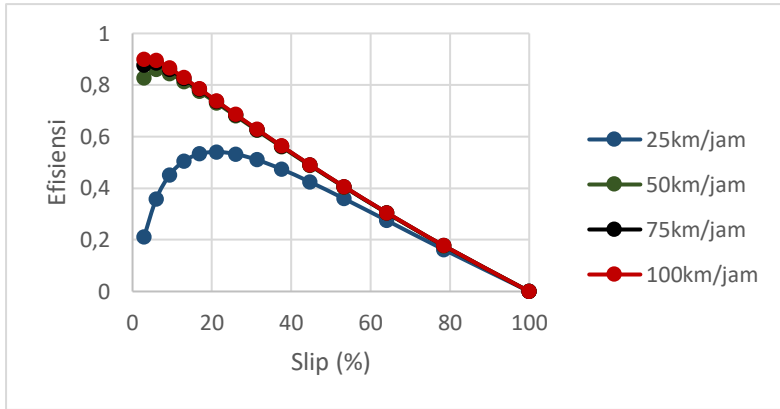
Pada tahap ini akan dilihat bagaimana respons motor apabila diberi tegangan ber frekuensi lainnya. terdapat 4 kecepatan maksimal yang akan diuji yaitu 25 km/jam, 50 km/jam, 75 km/jam, 100 km/jam. Untuk 25 km/jam sama seperti respon pada simulasi sebelumnya. Bila frekuensi sumber sebesar 15,5 Hz maka kecepatan pada saat titik kerja sebesar 25 km/jam. Maka untuk kecepatan 50 km/jam frekuensi sumber yang diberi sebesar 31 Hz. Untuk kecepatan 75 km/jam frekuensi sumber sebesar 46,5 Hz. Untuk kecepatan 100 km/jam frekuensi sumber sebesar 62 Hz.



Gambar 4. 7 Respons Torsi Tiap Batas Kecepatan



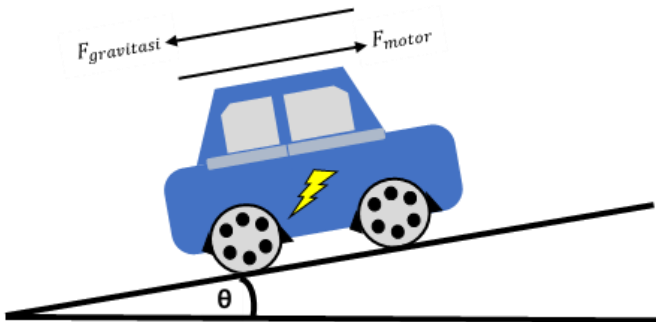
Gambar 4. 8 Respons Arus Tiap Batas Kecepatan



Gambar 4. 9 Respons Efisiensi Tiap Batas Kecepatan

Bila batas kecepatan rendah maka frekuensi sumber yang diberi juga rendah sehingga arus dan torsi lebih tinggi namun efisiensi cenderung lebih rendah. Begitu juga bila batas kecepatan tinggi maka arus dan torsi lebih rendah dan efisiensi cenderung lebih tinggi

4.5 Perhitungan Pada Wilayah Tanjakan



Gambar 4. 10 Kondisi Mobil Pada Saat Tanjakan

Pada saat tanjakan, terdapat gaya gravitasi yang mendorong mobil sehingga perhitungan percepatan maupun kecepatan tidak sama pada saat mobil melaju pada bidang lurus. Dengan desain final yang telah didapatkan, pada tahap ini akan dihitung seberapa besar sudut kemiringan

yang dapat ditempuh oleh mobil bila menggunakan desain final motor dengan mengabaikan gaya gesek pada mobi dan percepatan gravitasi sebesar $9,81 \text{ m/s}^2$. asumsi berat mobil beserta penumpang sebesar 600 kg.

$$\begin{aligned}
 F_{gravitasi} &= m \cdot g \cdot \sin \theta \\
 &= 600 \cdot 9,81 \cdot \sin \theta \\
 &= 5886 \cdot \sin \theta \text{ N}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

$$\begin{aligned}
 F_{roda} &= \frac{\tau}{r} \\
 &= \frac{64,818}{0,2186} \\
 &= 296,514 \text{ N}
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

$$\begin{aligned}
 F_{motor} &= F_{roda} \cdot 4 \\
 &= 1186,056 \text{ N} \\
 &= 1186 \text{ N}
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

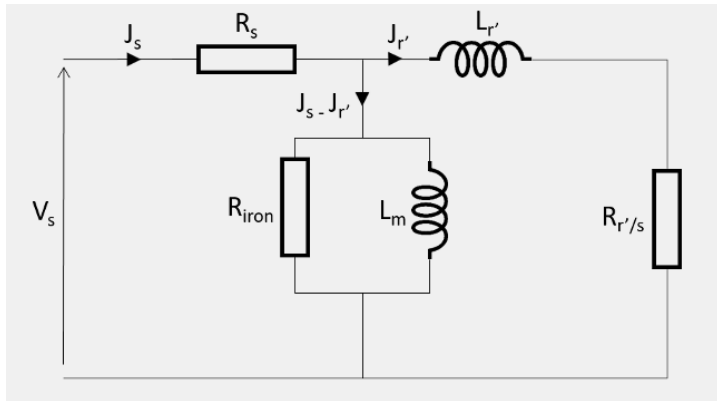
untuk mendapatkan sudut kemiringan maksimum yang dapat ditempuh mobil maka percepatan minimal sebesar nol yang berarti mobil melaju naik secara konstan.

$$\begin{aligned}
 \Sigma F &= m \cdot a \\
 F_{motor} - F_{gravitasi} &= m \cdot a \\
 &= 0 \\
 1186 \text{ N} - 5886 \cdot \sin \theta \text{ N} &= 0 \\
 1186 \text{ N} &= 5886 \cdot \sin \theta \text{ N} \\
 \frac{1186}{5886} &= \sin \theta \\
 0,201 &= \sin \theta \\
 \theta &= \arcsin(0,201) \\
 &= 11,59^\circ
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

secara perhitungan kasar mobil dapat melaju pada tanjakan dengan kemiringan sebesar $11,59^\circ$ namun untuk lebih amannya batas kemiringan dapat diasumsikan 10°

4.6 Pemodelan

Pada tahap ini, hasil final desain akan dibandingkan dengan pemodelan motor induksi secara matematis. *Software* yang dijalankan juga menghasilkan nilai dari pemodelan.

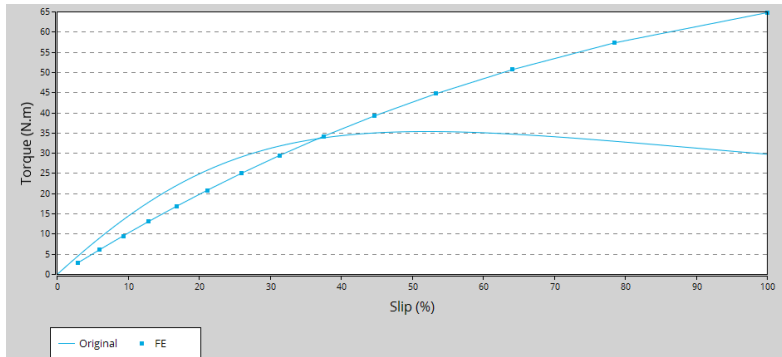


Gambar 4. 11 Rangkaian Ekuivalensi Motor Induksi

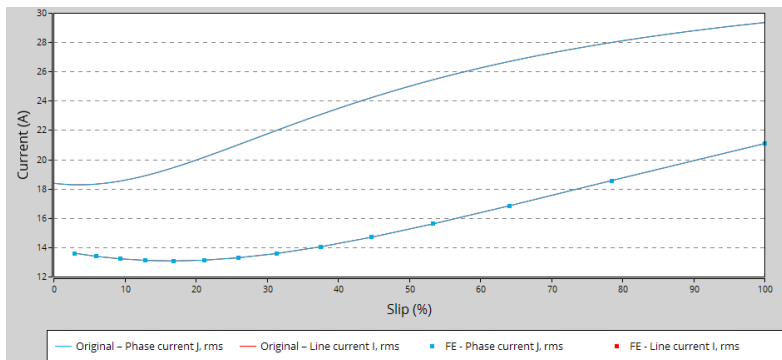
Tabel 4. 14 Parameter Induktansi dan Resistansi Motor

Keterangan	Nilai
<i>Magnetizing Inductance (H)</i>	2,355 E-2
<i>Iron Loss Resistance (Ω)</i>	16
<i>Leakage inductance Totaled in Rotor (H)</i>	2,393 E-2
<i>Rotor Joule Loss Resistance (Ω)</i>	1,281

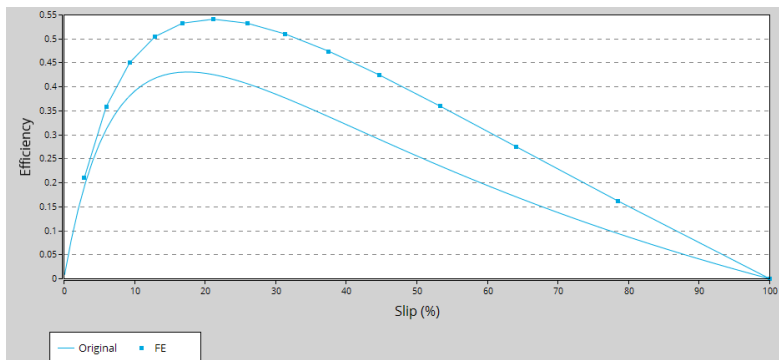
parameter di atas didapatkan dari perhitungan dari *software* dan akan dijalankan perhitungan sesuai rumus pemodelan yang nantinya digunakan untuk melihat respons perhitungan pemodelan. Berikut adalah hasil perbandingan perhitungan menggunakan pemodelan dan menggunakan metode FEM.



Gambar 4. 12 Perbandingan Nilai Torsi Metode FEM dan Pemodelan



Gambar 4. 13 Perbandingan Nilai Arus Metode FEM dan Pemodelan



Gambar 4. 14 Perbandingan Nilai Efisiensi Metode FEM dan Pemodelan

Tabel 4. 15 Perbandingan Respons Motor Metode FEM dan Pemodelan

	torsi			arus		efisiensi
Metode/slip (%)	6	31,4	100	6	100	31,4
Pemodelan	9	32	30	18,4	29,2	0,377
FEM	6,12	29,49	64,82	13,41	21,11	0,5102

Hasil Pemodelan pada tabel diasumsikan dengan melihat tabel secara seksama. Nilai yang didapat dari pemodelan cukup jauh berbeda dibandingkan dengan nilai yang didapat dari metode FEM.

Nilai yang didapatkan dari metode FEM lebih teliti dan mendekati aslinya karena pada metode pemodelan tidak memperhitungkan distribusi medan magnet dari bagian terkecil rotor maupun stator. Bagian stator maupun rotor dianggap homogen. Metode pemodelan juga tidak memperhitungkan faktor histerisis sehingga metode FEM lebih teliti dibanding metode pemodelan.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

Setelah melakukan simulasi dan analisa, terdapat kesimpulan akhir yang menjadi gagasan utama dan jawaban atas penelitian ini. Sedangkan beberapa kendala dan kekurangan akan disajikan dalam bentuk saran

5.1 Kesimpulan

Setelah Melakukan serangkaian Simulasi didapati ciri-ciri motor. Motor induksi rotor luar memiliki Torsi start yang cukup tinggi untuk keadaan lain dan grafik terhadap kecepatan akan naik pada titik tertentu lalu akan turun menuju nol.

Dalam penentuan parameter terdapat cara-cara yang dapat dilakukan untuk menaikkan torsi yang akan menaikkan arus dan menurunkan efisiensi maupun menurunkan arus yang sekaligus menurunkan torsi dan meningkatkan efisiensi. Salah satu caranya yaitu dengan pengaturan jumlah lilitan pada kumparan beserta diameter kabel. Mengurangi jumlah lilitan serta menambah diameter kabel akan membuat kabel menjadi pendek. Akibatnya resistansi akan turun sehingga arus meningkat. Peningkatan arus mengakibatkan peningkatan torsi juga serta menambah rugi-rugi daya yang mengakibatkan efisiensi menurun . Begitu juga bila menambah jumlah lilitan serta mengurangi diameter kabel akan membuat, resistansi meningkat dan arus akan turun. Turunnya arus mengakibatkan nilai torsi turun dan rugi-rugi daya berkurang sehingga efisiensi meningkat.

Desain terbaik yang dimiliki memiliki jumlah kutub 8 dengan jumlah slot stator/rotor sebesar 96/96. Hal ini masuk akal dikarenakan bila terlalu banyak kutub jarak antar kutub yang sama akan berdekatan sehingga saling meniadakan fluks dan bila terlalu kecil maka rongga stator pada 1 kutub dapat saling meniadakan fluks karena jarak yang dapat menjadikan fluks bertumpukan karena berlawanan arah. Kemiringan medan yang dapat dilalui oleh mobil yang menggunakan motor ini sebesar $11,59^\circ$

5.2 Saran

Untuk penelitian selanjutnya agar dapat berkembang menjadi lebih baik, terdapat beberapa hal yang dapat diperhatikan, antara lain:

- a. terdapat beberapa kabel untuk motor dengan diameter 2 mm ke atas yang telah diisolasi lalu digulung untuk motor dan dilihat diameter maksimal yang dapat digulung tanpa memecah isolasi kabel tersebut. Bila kabel yang digunakan bisa lebih dari 2 mm maka batas arus akan meningkat sehingga torsi awal juga ikut meningkat
- b. Mencari nilai yang tepat dan terdapat referensi maupun alasan yang kuat (tidak menggunakan asumsi semata) untuk beberapa parameter seperti: ukuran motor, diameter rotor, diameter stator
- c. Mempelajari material yang digunakan dan ciri khasnya

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kim. S., “Electric Motor Control”, Elsevier, 2017.
- [2] Chapman, S. J., “Electric Machinery Fundamentals: Fifth Edition”, McGraw-Hill, Inc, 2012.
- [3] Virlan, B.; Benelghali, S.; Simion, A.; Livadaru, L.; Outbib, R.; Munteanu, A., “Induction Motor With Outer Rotor and Ring Stator Winding for Multispeed Applications”, IEEE Transactions on energy conversion, 2013.
- [4] Jie, S., “Pemodelan dan Pengendalian Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa”, Program Pasca Sarjana, Universitas Hasanuddin, Makassar, 2009.
- [5] Ghazaly, R. A., “Metode Perhitungan Motor Induksi yang Sedang Beroperasi”, Skripsi, Universitas Indonesia, Depok, 2011.
- [6] Watanabe, N.; Hirotsuka, I.; Nakamura, M.; Hidehisa. S., “Trial Fixed Outer Rotor Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motor and Its Basic Characteristics”, *21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Korea, 2018.
- [7] Cha, H. R.; Jeong, W. T. B.; Won, Im, Y. D.; Shin, J. K.; Seo, J. Y., “Design of Outer Rotor type Induction Motor Having High Power Density for In-Wheel System”, Automotive Components Research Group, Honam Regional Division, Korea Institute of Industrial Technology; Suncheon First College, Department of Electrical Control; SRC Ltd. Co. Dep. Of Technical Research Center, Korea.
- [8] Purba, J., “Simulasi Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Phasa dengan Direct Torque Control dengan Menggunakan Matlab 7.0.1”, Tugas Akhir, Universitas Sumatera Utara, Medan, 2009.

[9] Zuhail, “Dasar Tenaga Listrik dan Elektronika Daya”, PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 2000.

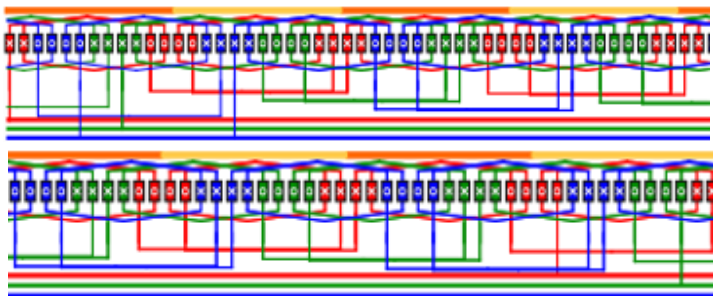
[10] Haryanto, H., Munarto, R., Fatmawati, I., “Analisis Karakteristik Motor Induksi Tiga Fasa XYZ Standar NEMA”, Universitas Sultan Agung Tirtayasa, Cilegon, 2014.

[11] Rabbani, I., “Deteksi Kerusakan Batang Rotor Pada Motor Induksi Tiga-Fasa Menggunakan Analisis Bi-Spectrum”, Tugas Akhir, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2016.

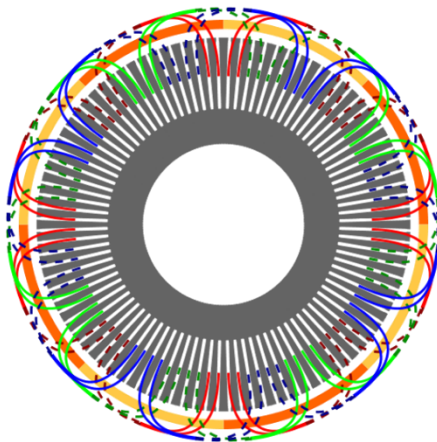
LAMPIRAN

Final Desain

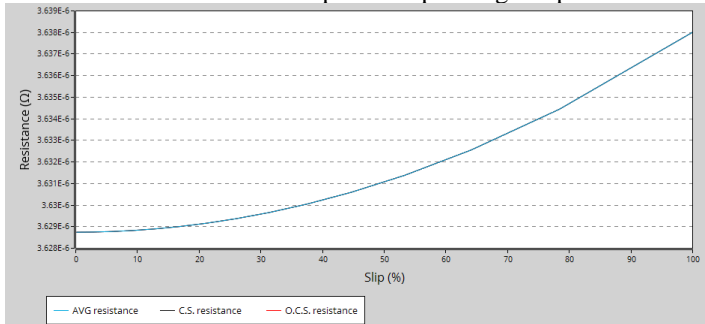
A1. Winding view



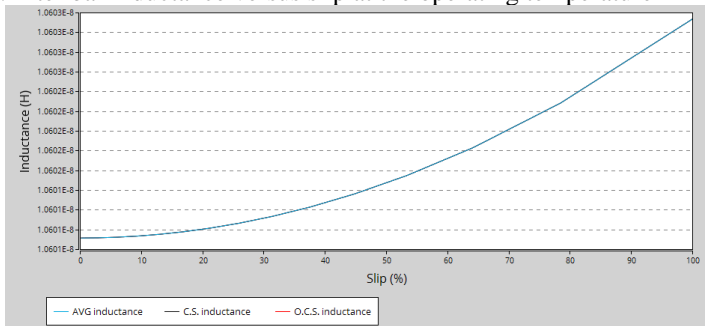
A2. Radial view



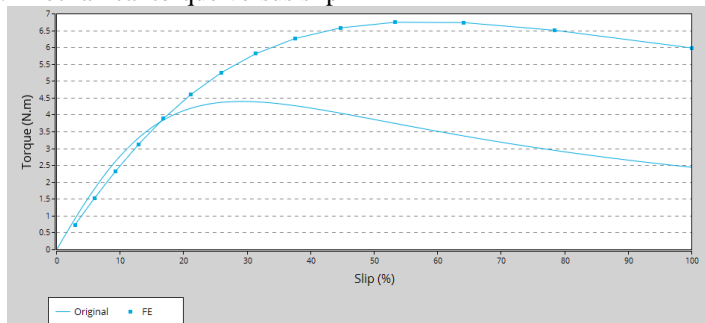
B1. Inter bar resistance versus slip at the operating temperature



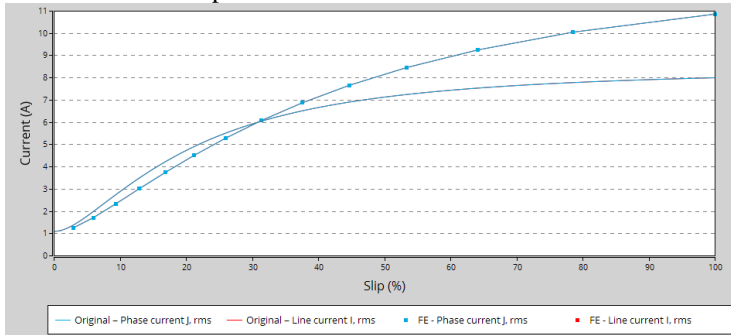
B2. Inter bar inductance versus slip at the operating temperature



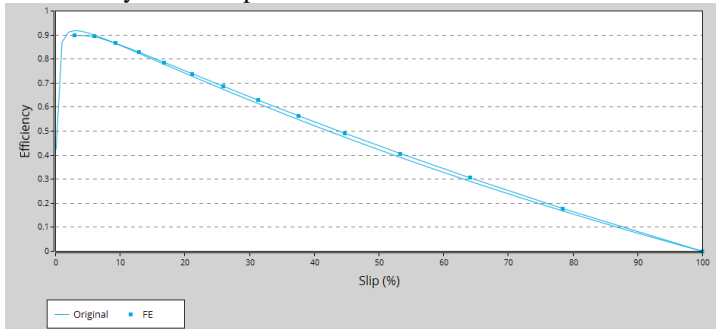
B3. Mechanical torque versus slip



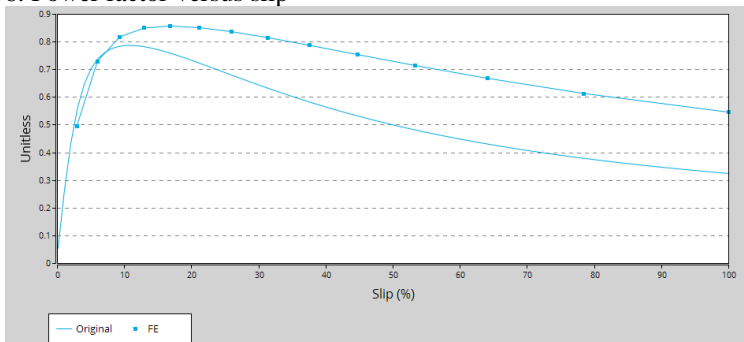
B4. Current versus slip



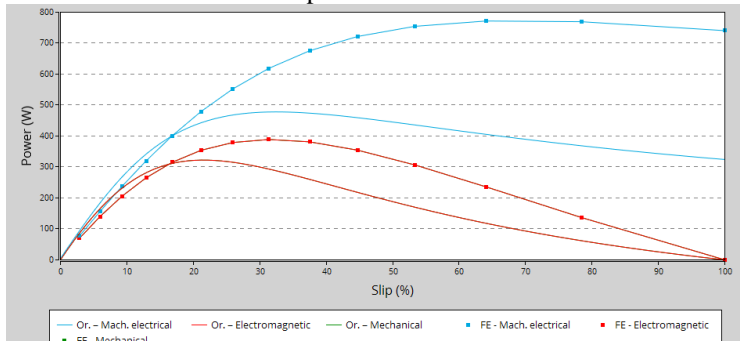
B5. Efficiency versus slip



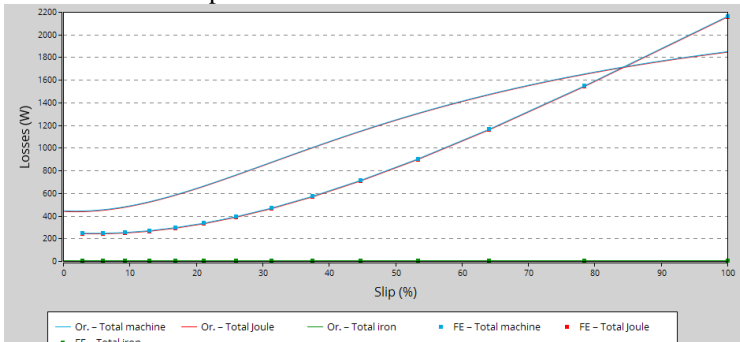
B6. Power factor versus slip



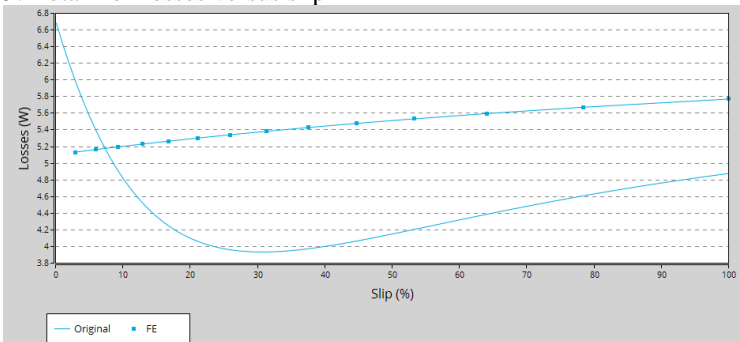
B7. Power balanced versus slip



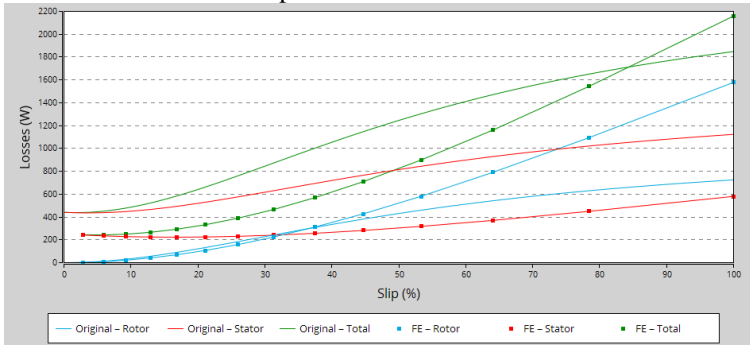
B8. Losses versus slip



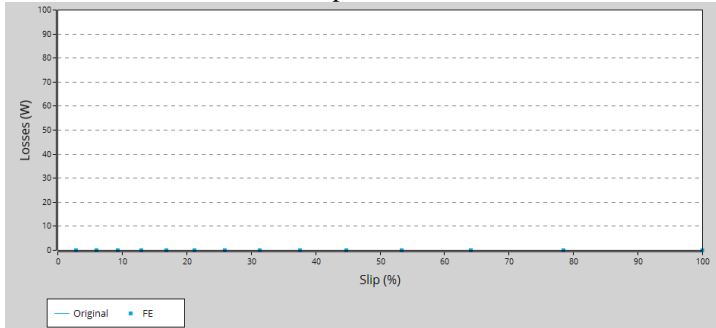
B9. Total iron losses versus slip



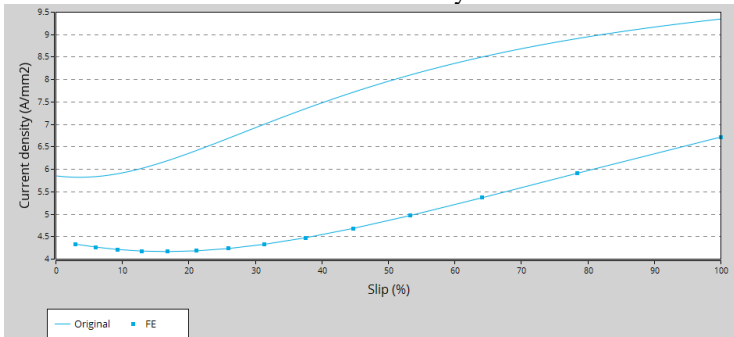
B10. Joule losses versus slip



B11. Mechanical losses versus slip



B12. Stator conductor surface current density



BIOGRAFI PENULIS



Faizal Ramadhan Putra, lahir di Sidoarjo pada tanggal 13 Januari 1998. Penulis merupakan putra kedua dari tiga bersaudara. Penulis menempuh pendidikan di SD Muhammadiyah 4 pucang Surabaya pada tahun 2004. Kemudian memasuki SMPN 6 Surabaya pada tahun 2010. Dan pada tahun 2013 penulis melanjutkan pendidikan di SMAN 9 Surabaya. Pada tahun 2016 penulis melanjutkan pendidikan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya dan mengambil jurusan Teknik Elektro.

Pada tahun 2018 penulis mengambil Program Studi Teknik Sistem Pengaturan.