PENGARUH KONFIGURASI TIPE BELITAN MOTOR INDUKSI SATU FASA TERHADAP UNJUK KERJA MOTOR

TESIS

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
MINAT SISTEM TENAGA LISTRIK

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Magister Teknik

ASFARI HARIZ SANTOSO
NIM. 156060300111022

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2018

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

LEMBAR PENGESAHAN

Pengaruh Konfigurasi Tipe Belitan Motor Induksi Satu Fasa Terhadap Unjuk Kerja Motor

Oleh :

Nama Mahasiswa : Asfari Hariz Santoso
Nim : 156060300111022
Program Magister : Teknik Elektro
Minat : Sistem Tenaga Listrik

Menyetujui
KOMISI PEMBIMBING

Ketua,	**Anggota,**
Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc	**Hadi Suyono, ST., MT., Ph.D., IPM.**
NIP. 19680122 199512 2 001	NIP. 19730520 200801 1013

Mengetahui,
Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro

Dr.Eng. Panca Mudjirahardjo, S.T., M.T.
NIP. 197003292000121001

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2018

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

RIWAYAT HIDUP

Asfari Hariz Santoso, Malang, 11 Februari 1991 anak dari ayah H. Hari Santoso dan ibu Hj. Nyami Winarti. Ia menempuh pendidikan dasar di SD Rampal Celaket I Malang, SMPN 18 Malang, dan SMAN 7 Malang. Kemudian melanjutkan pendidikan Program Sarjana (S1) Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang dan lulus pada tahun 2014.

Pengalaman kerja sebagai karyawan pabrik Semen Merah Putih (PT. Cemindo Gemilang) di departemen *electrical* sebagai *act. Team leader* tahun 2014 hingga 2015. Sebagai asisten peneliti dalam grup riset PSEEMRG tahun 2016 hingga 2017.

Malang, 25 Juli 2018

Asfari Hariz Santoso

(Penulis)

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

repository.ub.ac.id

RINGKASAN

Asfari Hariz Santoso, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juni 2018, *Pengaruh Konfigurasi Tipe Belitan Motor Induksi Satu Fasa Terhadap Unjuk Kerja Motor*, Dosen Pembimbing : Rini Nur Hasanah dan Hadi Suyono.

Motor induksi banyak digunakan karena dengan kapasitas yang sama dapat diandalkan dibandingkan dengan motor listrik jenis lain. Motor kapasitor adalah salah satu jenis motor induksi satu fasa. Daya keluaran motor induksi satu fasa berasal dari kedua kumparannya, yaitu kumparan utama dan kumparan bantu. Daya yang dihasilkan masing-masing kumparan tersebut sesuai dengan jumlah kumparan statornya.

Pada penelitian ini dilakukan modifikasi belitan motor induksi satu fasa 1000 W, 220 V, kutub enam dengan dua tipe belitan. Tipe belitan yang digunakan yaitu terbagi-skrup (Mesin A) dan terpusat terdistribusi (Mesin B). Untuk mendapatkan daya yang sama besarnya masing-masing kumparan utama dan kumparan bantu menempati jumlah alur stator yang sama. Perbedaan fasa antara arus kumparan utama dan kumparan bantu sebesar 90° menghasilkan torsi yang maksimal. Hal tersebut dapat dicapai dengan sudut impedansi kumparan yang ideal masing-masing 45°. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh konfigurasi belitan dari kedua terhadap unjuk kerja motor, agar didapatkan motor untuk aplikasi kendaraan listrik yang mempunyai torsi awal tinggi.

Hasil simulasi, perhitungan parameter, dan pengujian didapatkan bahwa Mesin B memiliki keunggulan pada daya keluaran dan torsi dibanding Mesin A. Hal ini dikarenakan Mesin B memiliki memiliki distribusi kumparan yang lebih merata dibanding Mesin A. Selain itu pada Mesin A terdapat enam alur yang ditempati dua sisi kumparan dengan arus yang berlawanan sehingga fluksinya saling menghilangkan, akibatnya distribusi medan pada Mesin A kurang merata.

Kata kunci : motor induksi satu fasa, tipe belitan, daya keluaran, torsi

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

repository.ub.ac.id

SUMMARY

Asfari Hariz Santoso, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Brawijaya University, June 2018, *Influence Configuration Winding Type of Single-phase Motors Inductor Motors on Motor Performance*, Supervisor: Rini Nur Hasanah and Hadi Suyono.

Induction motors are widely used because of the same reliable capacity compared to other types of electric motors. Motor capacitor is one type of single phase induction motors. The output power of a single phase induction motor comes from both windings, the main winding and the auxiliary winding. The resulting power of each winding is in accordance with the number of stator coils.

In this study modification of single phase induction motor winding 1000 W, 220 V, six poles with two types of winding. The type of winding used is split-*screw* (Machine A) and concentrated-distributed (Machine B). To get the same power each of the main winding and auxiliary winding occupy the same number of stator slots. The phase difference between the main winding and the auxiliary winding currents of 90° produces maximum torque. This can be achieved with an ideal winding impedance angle of 45° each. This study aims to determine the effect of winding configuration of both to the performance of the motor, in order to obtain a motor for electric vehicle applications that have high initial torque.

The results of simulation, parameter calculation, and test shows that Machine B has superiority on output power and torque compared to Machine A. Because Machine B has a winding distribution which is more evenly than Machine A. In addition to Machine A, there are six plots occupied by two side of the coil with the opposite current so that the flux is mutually eliminating, consequently the field distribution on Machine A is less evenly distributed.

Keywords: single phase induction motor, winding type, power output, torque

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
Universitas Brawijaya

PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah Tuhan Yang Maha Esa atas curahan rahmat dan hidayahNya sehingga penulis dapat menyelesaikan buku laporan tesis yang berjudul: "Pengaruh Konfigurasi Tipe Belitan Motor Induksi Satu Fasa Terhadap Unjuk Kerja Motor".

Penulis menyadari banyak pihak yang terlibat dalam memberikan dukungan dan bantuan yang sangat bermanfaat. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis menyampaikan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada yang terhormat:

1. Dr. Eng. Panca Mudjirahardjo, S.T., M.T. sebagai Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro dan Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc. pembimbing 1 serta Hadi Suyono S.T., M.T., Ph.D. IPM. sebagai pembimbing 2 yang telah memberikan dorongan, bimbingan, saran dan masukan selama penulis menyelesaikan tesis ini.
2. Tim penguji ujian seminar proposal dan ujian tesis Program Magister Teknik Elektro: Ir. Wijono, MT., Ph.D. sebagai penguji I dan Dr. Ir. Bambang Siswojo, MT. sebagai pembimbing II atas segala koreksi, usulan dan saran perbaikan.
3. Hadi Suyono ST., MT., Ph.D. IPM. sebagai Ketua Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya yang telah memberikan dorongan dan bantuan menyelesaikan pendidikan S2.
4. Ir. Hery Purnomo, MT., sebagai kepala Laboratorium Mesin Elektrik Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya atas ijin tempat dan bantuan pinjaman peralatan sehingga penelitian dapat berjalan dengan lancar dan baik.
5. Indra Setyawan, S.ST. sebagai tenaga pranata Laboratorium Mesin Elektrik Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya yang telah membantu pelaksanaan penelitian dari awal hingga selesai.
6. Bapak Dr. Ir. Hari Santoso, M.Sc. dan Ibu Nyami Winarti sebagai kedua orang tua penulis atas semua jasa-jasanya yang tak terhingga dengan memberikan dukungan dalam bentuk materi maupun moril selama penulis menempuh pendidikan S2.
7. Riski Januar Tri Harsari yang senantiasa memberikan semangat dan doa tanpa henti kepada penulis selama menempuh pendidikan S2.
8. Bapak Alimin dan Bapak Priyo yang telah membantu mempersiapkan mesin-mesin beserta perlengkapannya sebagai bahan penelitian sehingga penelitian berjalan lancar.

9. Teman-teman seperjuangan mahasiswa Program Magister Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya angkatan 2015 (Adi, Agung, Bang Udin, Sam Ones, dan Kino) atas kerja sama yang baik selama menempuh pendidikan S2.
10. Nawak-nawak AMPERE ’09 (Arga, Makmur, Budi, Bambi, dan Kipot) yang sangat banyak jasa-jasanya dalam membantu penulis selama penelitian berlangsung.
11. Semua pihak yang namanya tidak dapat saya tulis satu persatu yang telah membantu dalam penyelesaian tesis ini.

Pepatah menyatakan tidak ada gading yang tak retak, penulis menyadari kemampuan yang terbatas, maka pasti ada kekurangan pada tesis ini. Untuk itu kritik dan saran yang sifatnya membangun sangat penulis harapkan.

DAFTAR ISI

Pengantar……i
Daftar Isi……iii
Daftar Tabel ……vii
Daftar Gambar ……viii
BAB I. PENDAHULUAN……1
1.1. Latar Belakang……1
1.2. Rumusan Masalah……2
1.3. Ruang Lingkup……3
1.4. Tujuan……3
1.5. Manfaat……3
BAB II. LANDASAN TEORI……4
2.1. Tinjauan Pustaka……4
2.2. Dasar Teori……4
2.2.1. Motor Induksi……4
2.2.2. Motor Induksi 1 Fasa……5
A. Bagian-bagian Motor Induksi 1 Fasa……5
B. Medan Bolak – Balik……5
C. Rangkaian Pengganti Motor Induksi Satu Fasa……8
2.2.3. Kumparan Stator……9
2.2.4. Rangkaian Dasar Motor Induksi 1 Fasa……10
2.2.5. Rangkaian Ekivalen Motor Induksi……11
2.2.6. Motor Induksi pada Keadaan Mantap……13
2.2.7. Effisiensi Motor Induksi……14
2.2.8. Torsi Motor……15

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

2.2.9. Konduktor Stator……16
2.2.10. Alur Stator……17
2.2.11. Penentuan Nilai Kapasitor……18
2.2.12. Analisis Fourier untuk Bentuk Gelombang……18
2.2.13. Perhitungan medan magnet dengan *Finite Element*……20
BAB III. KERANGKA KONSEP PENELITIAN ……22
3.1. Kerangka Penelitian……22
3.2. Variabel Penelitian……24
3.3. Hipotesis……24
BAB IV. METODOLOGI PENELITIAN……25
4.1. Metodologi Penelitian……25
4.2. Konfigurasi Konduktor dan Belitan……26
4.2.1. Perancangan Bentuk Belitan……26
4.2.2. Penentuan Luas Penampang konduktor……27
4.3. Pengujian……28
4.4. Penentuan Nilai Kapasitor……28
4.5. Alat dan Bahan……28
BAB V. TIPE BELITAN DAN KAPASITAS MESIN……29
5.1. Modifikasi……29
5.1.1. Kapasitas Motor Induksi……30
5.1.2. Bentuk Kumparan……31
5.1.3. Penentuan Jumlah Lilit……33
5.1.4. Ukuran Konduktor Modifikasi Kumparan Motor Induksi……34
5.2. Faktor Permukaan (*Filling Factor*) ……36
5.2.1. Luas Dimensi Alur Stator……36

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

5.2.2. Luas konduktor……38
5.2.3. Jumlah Konduktor dalam Alur……38
5.2.4. Faktor permukaan (f_{slot}) ……39
5.3. Faktor Distribusi Kumparan……39
5.4. Analisis Medan Magnet Menggunakan Metode Elemen Berhinga……41
BAB VI. ANALISIS DAN PEMBAHASAN……46
6.1. Data Hasil Pengujian……46
6.2. Parameter Motor Induksi……47
6.3. Hasil Pengujian Berbeban……48
6.4. Analisa Perbandingan Unjuk Kerja Motor……49
6.4.1. MMF Kumparan……49
6.4.2. Analisa gelombang arus……55
6.4.3. Performa motor induksi……56
6.4.4. Perbandingan Motor Hasil Modifikasi dengan Motor Induksi Standart……58
BAB VII. KESIMPULAN DAN SARAN……60
7.1. Kesimpulan……60
7.2. Saran……60
DAFTAR PUSTAKA……61
LAMPIRAN……63
Lampiran 1 : Pengujian Motor Induksi……64
Penentuan Parameter Motor Induksi Satu Fasa……64
1. Pengujian Tanpa Beban……64
2. Pengujian Tahanan DC Stator……65
3. Pengujian Rotor Ditahan……66
4. Pengujian Unjuk Kerja Motor……68
Lampiran 2 : Tabel hasil pengujian berbeban……70

Lampiran 3: Listing Program Analisis Deret Fourier MMF Kumparan.....71

DAFTAR TABEL

Tabel 5.1. Efisiensi dan Faktor Daya.....30
Tabel 6.1. Hasil pengujian mesin A dan mesin B.....46
Tabel 6.2. Nilai parameter mesin A dan mesin B.....47
Tabel 6.3. Daya *output* dan torsi motor.....48
Tabel 6.4. Hasil Perhitungan koefisien MMF fundamental kumparan Mesin A dan Mesin B.....64

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Konstruksi Motor Induksi (a) stator dan (b) rotor....4
Gambar 2.2. Medan Bolak – Balik Motor Induksi Satu Fasa....6
Gambar 2.3. Flux Total $ø_t$ Dilukis Sebagai Fungsi dari Sudut θ....7
Gambar 2.4. Lengkung Kopel-Putaran Motor Induksi Satu Fasa....7
Gambar 2.5. Rangkaian Pengganti Motor Induksi Satu Fasa....8
Gambar 2.6. Bentuk Belitan Stator....9
Gambar 2.7. Rangkaian Dasar Motor Induksi 1 Fasa (*Split Phase Starting Motor*) 10
Gambar 2.8. Rangkaian Pengganti Stator Motor Induksi pada Keadaan Diam....11
Gambar 2.9. Rangkaian Pengganti Stator Motor Induksi pada Keadaan Berputar....12
Gambar 2.10. Rangkaian Ekivalen Motor Induksi pada Keadaan Mantap....13
Gambar 2.11. Aliran Daya Motor Induksi....15
Gambar 2.12. Rangkaian Pengujian *Prony Brake*....16
Gambar 2.13. Bentuk Alur....17
Gambar 2.14. Segitiga Impedansi....18
Gambar 3.1. Kerangka Konsep Penelitian....22
Gambar 4.1. Diagram Alir Metodologi Penelitian....25
Gambar 4.2. Diagram Alir Penentuan Bentuk Belitan....26
Gambar 4.3. Diagram Alir Penentuan Luas Konduktor yang Digunakan....27
Gambar 5.1. Bentuk belitan motor induksi sebelum dimodifikasi....29
Gambar 5.2. Bentuk belitan terbagi-skew....31
Gambar 5.3. Bentuk belitan terpusat-terdistribusi....32
Gambar 5.4. Susunan belitan terbagi-*screw*....32
Gambar 5.5. Susunan belitan terpusat-terdistribusi....33
Gambar 5.6. Bentuk alur stator....36

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Gambar 5.7. Dimensi alur beserta lapisannya.....37
Gambar 5.8. Tiga bagian luasan alur.....37
Gambar 5.9. Konfigurasi konduktor A dalam ruang alur.....39
Gambar 5.10. Bentuk konfigurasi kumparan Mesin A.....40
Gambar 5.11. Bentuk konfigurasi kumparan Mesin B.....40
Gambar 5.2. Kurva magnetik karakteristik material M-19 *Steel*.....41
Gambar 5.13. Distribusi medan magnet Mesin A.....42
Gambar 5.14. Distribusi medan magnet Mesin B.....43
Gambar 5.15. Fluktuasi kerapatan fluks magnet pada celah udara Mesin A.....43
Gambar 5.16. Fluktuasi kerapatan fluks magnet pada celah udara Mesin B.....44
Gambar 6.1. Motor induksi yang dibebani dengan generator DC.....48
Gambar 6.2. Bentuk MMF dari tipe belitan terbagi (skew) mesin A.....49
Gambar 6.3. Bentuk MMF dari tipe belitan terpusat (terdistribusi) mesin B.....49
Gambar 6.4. Distribusi MMF kumparan Mesin A.....50
Gambar 6.5. Distribusi MMF kumparan Mesin B.....51
Gambar 6.6. Penjumlahan 700 suku pertama dari fungsi f(t) Mesin A.....52
Gambar 6.7. Penjumlahan 700 suku pertama dari fungsi f(t) Mesin B.....53
Gambar 6.8. Perbandingan nilai torsi mesin A dan B.....54
Gambar 6.9. Bentuk gelombang arus kumparan utama mesin A.....55
Gambar 6.10. Bentuk gelombang arus kumparan utama mesin B.....55
Gambar 6.11. Gelombang arus kumparan utama dan bantu Mesin A (tanpa beban) 56
Gambar 6.12. Gelombang arus kumparan utama dan bantu Mesin B (tanpa beban) 56
Gambar 6.13. Gelombang arus kumparan utama dan bantu Mesin A (mendekati beban nominal) 57
Gambar 6.14. Gelombang arus kumparan utama dan bantu Mesin B (mendekati beban nominal) 57
Gambar 6.15. Grafik perbandingan daya keluaran dan efisiensi.....58
Gambar 6.16. Distribusi Medan Magnet Motor standart 4 kutub.....59

BAB I
PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Motor induksi merupakan jenis motor listrik yang banyak diaplikasikan dalam kehidupan sehari-hari, baik untuk peralatan rumah tangga maupun bidang industri. Motor induksi mempunyai kelebihan konstruksi yang sederhana serta kokoh, mudah dalam perawatan, dan harga produksi yang cukup murah dibandingkan motor listrik lain (Tekgun Burak, 2016).

Konstruksi motor induksi secara garis besar terdiri dari dua bagian utama, yaitu bagian yang statis dan bagian yang berputar. Bagian yang diam atau statis merupakan stator dan bagian yang berputar merupakan rotor. Rotor motor induksi dapat berputar bila ada medan putar pada stator. Kecepatan putar rotor bergantung pada nilai frekuensi sumber dan jumlah kutub yang ada pada stator. Kutub motor induksi ditentukan dari bentuk kumparan yang ada dalam alur stator (Santoso H., 2018).

Motor induksi merupakan salah satu motor listrik yang dapat dimanfaatkan untuk kendaraan listrik, dengan kapasitas yang sama dapat diandalkan dibandingkan dengan motor listrik jenis lain (Phal Abhisek, 2016). Keunggulan kendaraan listrik jika dibandingkan dengan kendaraan berbahan bakar minyak adalah bebas emisi. Kendaraan listrik saat ini dibutuhkan karena lebih dari 90% polusi di perkotaan dihasilkan polusi emisi kendaraan (Singh Kumar A., 2014). Kendaraan dalam perkotaan kecepatan yang diijinkan antara 30 hingga 50 km/jam tergantung medan yang dilalui. Hal tersebut mengacu pada peraturan yang ditetapkan oleh Kementerian Perhubungan pasal 3 ayat 4 pint c dan d tahun 2015.

Motor induksi sebagai penggerak kendaraan listrik yang digunakan pada jalan perkotaan, kecepatan linier maksimalnya sekitar 50 km/jam sesuai rentang kecepatan yang diatur oleh kementerian perhubungan Republik Indonesia. Untuk mencapai kecepatan 50 km/jam roda berdiameter sekitar 0,5 m terhubung langsung dengan poros motor, putaran sinkron motor induksi yang dibutuhkan 1000 rpm dengan slip torsi maksimum 50%. Motor induksi yang banyak di pasaran adalah motor induksi dengan putaran tinggi (di atas 1000 rpm). Oleh karena itu jika diperlukan untuk aplikasi putaran rendah perlu menggunakan transmisi penurun putaran (*gear-ratio*).

Gear-ratio juga dibutuhkan suatu kendaraan untuk mendapatkan torsi dari mesin penggerak yang disesuaikan dengan kondisi jalan yang dilalui oleh kendaraan tersebut. Ketika *gear-ratio* berada pada level yang paling rendah, torsi yang dihasilkan mesin menjadi yang paling tinggi. Level *gear ratio* berikutnya torsi yang dihasilkan mesin lebih rendah dari torsi yang dihasilkan oleh *gear ratio* sebelumnya. Kendaraan listrik yang menggunakan motor induksi satu fasa harus memperhitungkan torsi motor yang sebanding dengan daya yang dihasilkan oleh motor. Oleh karenanya dibutuhkan motor yang dapat memenuhi kebutuhan kendaraan listrik dengan torsi awal yang tinggi dan dapat diatur sesuai dengan *gear-ratio*. Pada penelitian ini dilakukan konfigurasi konduktor belitan motor induksi satu fasa 1000 W, 220 V, kutub enam dengan dua tipe belitan. Konfigurasi konduktor kumparan diusahakan semaksimal mungkin mengisi alur, agar rugi tembaga dapat diminimalisir (Raabe Nick, 2014). Tipe belitan yang digunakan yaitu terbagi-*screw* (Mesin A) dan terpusat-terdistribusi (Mesin B). Kumparan yang digunakan pada kedua mesin masing-masing memiliki jumlah alur dan lilit yang sama. Untuk mendapatkan torsi motor yang maksimal fasa arus kumparan bantu tergeser 90° dari fasa arus kumparan utama (Nasar A., 2001). Hal tersebut dapat dicapai dengan sudut impedansi kumparan yang ideal 45°. Untuk mengetahui pengaruh konfigurasi tipe belitan dari kedua mesin terhadap unjuk kerja motor dilakukan pengujian dengan tujuan mendapatkan motor yang dapat digunakan untuk penggerak kendaraan listrik.

Tipe belitan yang berbeda menghasilkan bentuk distribusi MMF yang berbeda pula. Hal ini akan berimbas pada unjuk kerja motor, baik torsi dan daya keluaran motor. Bentuk MMF kumparan terdiri dari komponen fundamental dan komponen harmonisanya. Semakin banyak komponen harmonisanya menghasilkan torsi parasit yang menyebabkan gaya pada rotor tidak terkompensasi (Kindl V., 2014). Untuk mengetahui banyaknya komponen harmonisa dilakukan analisis menggunakan deret *Fourier*. Pada penelitian ini dibahas hasil simulasi dan analisis magnetik motor induksi satu fasa dengan menggunakan metode element berhingga (*finite element method)* dengan perangkat lunak terbuka FEMM 4.2. Penelitian ini juga untuk mengetahui perbedaan nilai parameter/impedansi motor dari dua tipe belitan dengan dua kumparan yang simetri. Motor hasil konfigurasi kumparan tersebut akan diuji untuk mengetahui unjuk kerjanya.

1.2. Rumusan Masalah

1. Bagaimana bentuk konfigurasi atau tipe belitan yang mempunyai sedikit komponen harmonisa?

2. Bagaimana bentuk konfigurasi atau tipe belitan yang menghasilkan torsi yang baik?
3. Bagaimana menentukan luas konduktor yang akan digunakan agar didapatkan faktor permukaan yang baik?
4. Berapa besar nilai perbedaan parameter motor induksi dengan konfigurasi kumparan yang berbeda?

1.3. Batasan Masalah

Penyusunan tesis ini menggunakan batasan masalah sebagai berikut:.

1. Modifikasi jumlah kutub pada motor induksi dilakukan dengan merubah konfigurasi belitan stator.
2. Pengaruh konfigurasi belitan terkait pada unjuk kerja motor.
3. Tipe belitan yang digunakan hanya terbagi-*screw* dan terpusat-terdistribusi.
4. Tidak dilakukan perubahan konstruksi rotornya.

1.4. Tujuan

Tujuan penelitian ini untuk menganalisis pengaruh konfigurasi tipe belitan kumparan stator motor induksi satu fasa terhadap torsi yang dihasilkan. Motor induksi satu fasa yang digunakan mempunyai kecepatan putar 1000 rpm.

1.5. Manfaat

Hasil dari penelitian ini nantinya dimanfaatkan untuk mendapatkan rancangan kumparan stator motor induksi dengan torsi yang baik dan dapat digunakan sebagai penggerak kendaraan listrik.

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

BAB II
LANDASAN TEORI

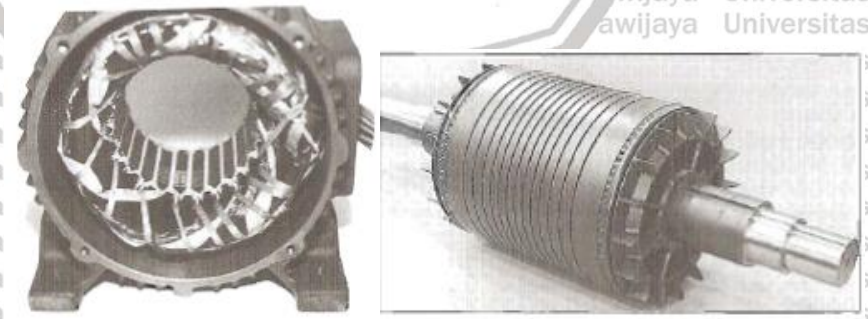
2.1. Tinjauan Pustaka

Bentuk maupun konfigurasi kumparan stator berpengaruh terhadap unjuk kerja motor. Rancangan kumparan yang mempunyai panjang *end-winding* yang lebih pendek akan mereduksi rugi tembaga stator dan meningkatkan effisiensi konversi (Kabir A. M, 2016). Mengurangi jumlah lilit dan memperbesar diameter konduktor kumparan stator dapat meningkatkan efisiensi dari 67% menjadi 73% (Sobhan Sobhani, 2013). Hal tersebut menjelaskan bahwa bentuk dan konfigurasi kumparan stator motor induksi yang optimal dapat menghasilkan nilai torsi dan efisiensi yang tinggi. Medan putar mempunyai peran penting dalam pembangkitan torsi motor induksi. Medan putar tersebut dihasilkan dari kumparan stator yang dialiri arus bolak-balik.

2.2. Dasar Teori

2.2.1. Motor Induksi

Motor induksi ditinjau dari konstruksinya terdiri atas stator bagian yang diam dan rotor bagian yang berputar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1. Menurut jenis rotornya terdapat dua jenis diantaranya rotor belitan dan rotor sangkar. Dalam penggunaannya motor induksi jenis rotor sangkar yang sering dijumpai karena kelebihannya dalam hal konstruksi yang kokoh dan perawatannya yang mudah.



(a) (b)

Gambar 2.1. Bagian Utama Konstruksi Motor Induksi (a) stator dan (b) rotor
Sumber : Stephen J. Chapman (2012:308)

2.2.2. Motor Induksi 1 Fasa

Motor induksi 1 fasa banyak dimanfaatkan pada bidang rumah tangga karena ketersediaan sumber listrik 1 fasa yang mudah didapatkan. Motor induksi 1 fasa yang dimanfaatkan tersebut memiliki kapasitas dan efisiensi yang relatif rendah dari 38% hingga 70% (Sawhney A.K., 1990). Oleh sebab itu lebih dipilih motor induksi 3 fasa dengan daya yang rendah jika tersedia di pasaran. Menurut alat bantu *starting* motor induksi satu fasa dapat dikategorikan dalam 4 (empat) macam antara lain:

1. *Split phase starting motor*
2. *Shaded pole motor*
3. *Repulsion starting motor*
4. *Capacitor motor*

A. Bagian-bagian Motor Induksi 1 Fasa

1. Stator

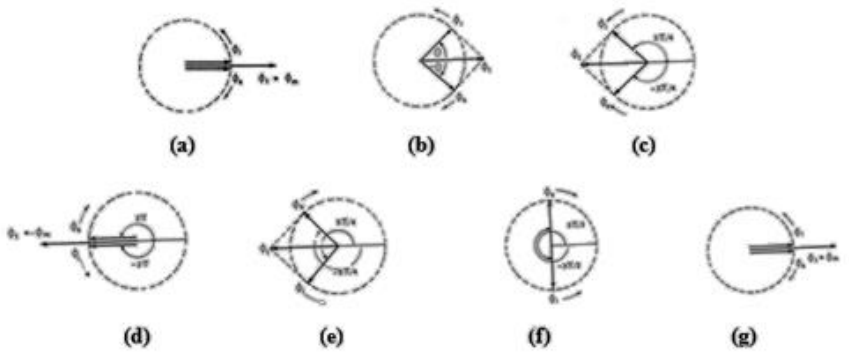
Inti stator motor induksi 1 fasa terdiri dari lapisan laminasi-laminasi plat besi yang tersusun dengan rapat. Laminasi plat besi diperlakukan sedemikian rupa agar terbentuk alur dan gigi alur stator.

2. Rotor

Rotor untuk motor induksi 1 fasa adalah rotor sangkar, sama halnya dengan rotor sangkar untuk motor induksi 3 fasa. Konduktor rotor di buat dari batangan tembaga atau aluminium atau aluminium paduan.

B. Medan Bolak – Balik

Motor induksi satu fasa mendapat suplai dari sumber bolak balik yang dicatukan pada kumparan stator. Motor induksi satu fasa tidak menghasilkan medan putar melainkan medan bolak-balik. Medan/ fluks bolak balik yang dihasilkan oleh kumparan stator satu fasa dapat diuraikan dalam dua komponen yaitu komponen sinkron ($ø_s$) yang berputar ke kanan/ maju dan komponen invers ($ø_i$) yang berputar ke kiri/ mundur seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2 (Kadir A., 1981).



Gambar 2.2. Medan Bolak – Balik Motor Induksi Satu Fasa
Sumber : Abdul Kadir (1981 : 141)

Dalam Gambar 2.2a terlihat komponen flux sinkron $ø_s$ yang berputar searah dengan jam, komponen flux invers $ø_i$ yang berputar berlawanan arah dengan jam, dan flux total $ø_t = ø_s + ø_i$ berupa penjumlahan vektor.

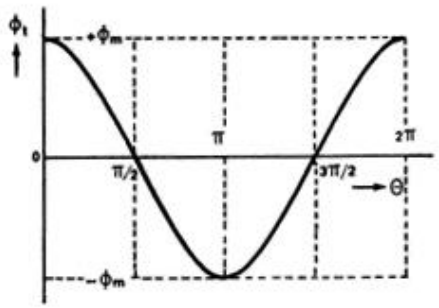
Pada Gambar 2.2a, baik $ø_s$ maupun $ø_i$ "sefasa", sehingga flux jumlah $ø_t$ nilainya maksimal, yaitu $ø_m$.

Gambar 2.2b flux $ø_i$ menunjukkan sudut θ terhadap flux total $ø_t$, dan demikian pula flux $ø_s$, menunjukkan sudut -θ terhadap flux total $ø_t$. Dalam keadaan ini $ø_t$ lebih kecil dari $ø_m$.

Pada Gambar 2.2c flux invers $ø_i$ mencapai sudut 3π/4, sedangkan flux sinkron $ø_s$ mencapai sudut -3π/4. Flux total $ø_t$ kini telah berubah arah dan pada Gambar 2.2 kembali $ø_i$ dan $ø_s$ sefasa, yaitu pada fasa masing-masing 2π dan -2π. Flux total kini bernilai maksimal negatif, yaitu $ø_t = - ø_m$.

Pada Gambar 2.2e sudut yang dicapai adalah 5π/4 untuk $ø_i$ dan -5π/4 untuk $ø_s$. Flux total mulai mengecil lagi untuk mencapai nilai 0 pada situasi menurut Gambar 2.5f dimana $ø_s$ dan $ø_i$ berlawanan arah.

Dalam Gambar 2.2g kembali dicapai situasi seperti pada Gambar 2.2a. Gambar 2.3 flux total $ø_t$ dilukis sebagai fungsi dari sudut θ. Kiranya jelas, bahwa funsi $ø_t = ø_t(θ)$ ini merupakan suatu fungsi harmonis tunggal.



Gambar 2.3. Flux Total $ø_t$ Dilukis Sebagai Fungsi dari Sudut θ
Sumber : Abdul Kadir (1981:144)

Medan ataupun fluksi yang dihasilkan stator adalah fluks bolak – balik $ø_t$, dimana $ø_t$ adalah penjumlahan pengaruh dari fluks sinkron $ø_s$ dan fluks invers $ø_i$. Dengan demikian lengkung kopel/ torsi putaran total yang diakibatkan oleh fluks total $ø_t$ juga merupakan penjumlahan dari masing – masing lengkung kopel putaran dari komponen – komponen $ø_s$ dan $ø_i$.

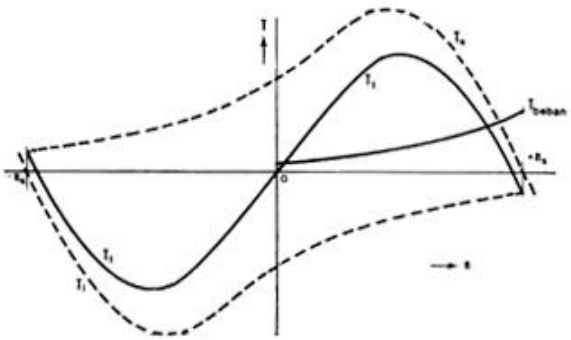
atau : $T(n) = T_s(n) + T_i(n)$

dimana,

T (n) : lengkung kopel-putaran total

T_s (n) : lengkung kopel-putaran yang disebabkan $ø_s$

T_i (n) : lengkung kopel-putaran yang disebabkan $ø_i$



Gambar 2.4. Lengkung Kopel-Putaran Motor Induksi Satu Fasa
Sumber : Sumber : Abdul Kadir (1981:145)

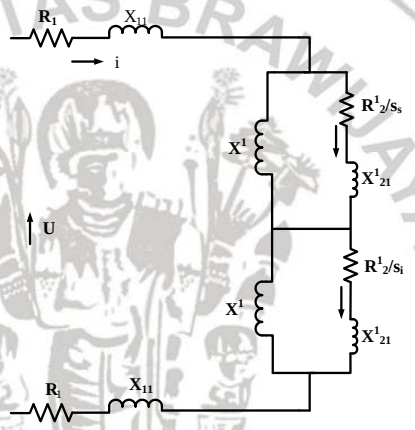
Dimana $ø_s$ merupakan suatu medan putar, maka lengkung kopel-putaran yang dihasilkan merupakan lengkung kopel putaran. Gambar 2.4 sebagai lengkung T_s yang merupakan lengkung putaran yang normal. Medan putar dari $ø_i$ mempunyai arah yang invers atau

terbalik. Oleh karena itu bentuk lengkung kopel-putaran T_i akan terbalik pula seperti yang terlihat pada Gambar 2.7. Dengan kata lain simetri radial dengan T_s terhadap titik nol.

Kopel total T = T(n) merupakan penjumlahan dari $T_s(n)$ dan $T_i(n)$ sebagaimana yang terlihat pada Gambar 2.4. Pada lengkung T = T(n) ini tidak melalui titik nol atau dengan kata lain tidak mempunyai kopel awal. Oleh karena itu, perlu dibantu untuk start, misalnya diputar secara manual atau alat bantu start yang lain untuk mengatasi torsi beban awal.

C. Rangkaian Pengganti Motor Induksi Satu Fasa

Rangkaian pengganti motor induksi satu fasa pada stator terdapat besaran – besaran R_1 dan X_1. Pada sisi rotor terdapat $R^1{}_2/s$ dan $X^1{}_2$ dimana $R^1{}_2/s$ perlu ada perbedaan antara slip untuk flux sinkron (s_s) dan slip untuk slip invers (s_i), sedangkan besaran gabungan antara stator dan rotor berupa X^1. Rangkaian pengganti motor induksi satu fasa ditunjukkan pada Gambar 2.5 di bawah dimana semua besaran "dibagi" dua.



Gambar 2.5. Rangkaian Pengganti Motor Induksi Satu Fasa
Sumber : Sumber : Abdul Kadir (1981:147)

Impedansi rangkaian pengganti motor induksi satu fasa dilihat dari terminal stator adalah (Abdul Kadir, 1981):

$$Z = 2(R_1 + jX_{11}) + \frac{jX^1(\frac{R^1{}_2}{s_s} + jX^1{}_{21})}{\frac{R^1{}_2}{s_s} + j(X^1 + X^1{}_{21})} + \frac{jX^1(\frac{R^1{}_2}{s_i} + jX^1{}_{21})}{\frac{R^1{}_2}{s_i} + j(X^1 + X^1{}_{21})} \quad (2\text{-}1)$$

$$= R + jX\ \Omega$$

dengan,

$$R = 2R_1 + h_s{}^2 \frac{R^1{}_2}{s_s} + h_i{}^2 \frac{R^1{}_2}{s_i}\ 2 \quad (2\text{-}2)$$

$$X = 2X_{11} + h^2{}_s \frac{(R^1{}_2)^2}{s^2{}_s X^1} + X^1{}_{21}(1+T) + h^2{}_i \frac{(R^1{}_2)^2}{s^2{}_i X^1} + X^1{}_{21}(1+T) \quad (2\text{-}3)$$

dimana,

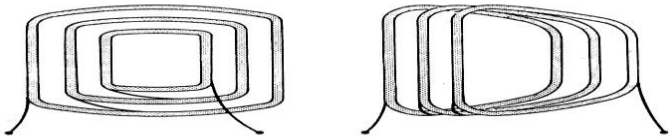
$$h^2{}_s = \frac{(X^1)^2}{(\frac{R^1{}_2}{s_s})^2 + (X^1 + X^1{}_{21})^2} \quad (2\text{-}4)$$

$$h^2{}_i = \frac{(X^1)^2}{(\frac{R^1{}_2}{s_i})^2 + (X^1 + X^1{}_{21})^2} \quad (2\text{-}5)$$

$$T = \frac{X^1{}_{21}}{X^1} \quad (2\text{-}6)$$

2.2.3. Kumparan Stator

Kumparan stator terdiri atas sejumlah belitan yang diletakkan dalam alur-alur inti stator. Dalam hal ini kumparan stator motor induksi satu fasa terdiri atas dua macam yaitu kumparan utama dan kumparan bantu. Bentuk belitan stator motor induksi secara garis besar terdiri dari 2 (dua) macam yaitu belitan terpusat-sekrup (*screw*) dan belitan terdistribusi seperti pada Gambar 2.6.



a. Belitan Terpusat-sekrup (*screw)* b. Belitan Terdistribusi

Gambar 2.6. Bentuk Belitan Stator
Sumber : Wilkinson, 1991 : 14

Jumlah lilit kumparan stator dapat ditentukan dari persamaan :

$$T_m = \frac{E}{4{,}44 \,.\, f \,.\, \emptyset_m \,.\, K_w} \quad (2\text{-}7)$$

dimana :

E : Tegangan induksi stator (volt)

f : frekuensi (Hz)

ϕ_m : Fluksi perkutub kumparan utama (weber)

K_w : faktor belitan

Untuk menentukan fluksi perkutub dihitung dengan persamaan:

$$\phi_m = Bav \,.\, \tau \,.\, L \qquad (2\text{-}8)$$

Dimana kisar kutub:

$$\tau = \frac{\pi \,.\, D_s}{p} \qquad (2\text{-}9)$$

dengan,

B_{av} : kerapatan fluksi rata-rata (T)

τ : kisar kutub (m)

D_S : diameter inti stator (m)

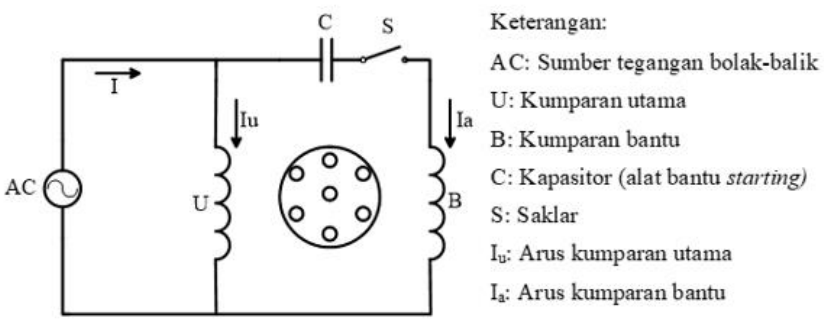
L : Panjang inti stator (m)

p : jumlah kutub

2.2.4. Rangkaian Dasar Motor Induksi Satu Fasa

Rangkaian dasar motor induksi 1 fasa secara umum ditunjukkan pada Gambar 2.7 di bawah. Kumparan stator motor induksi satu fasa terdiri atas dua jenis yaitu kumparan utama (U) dan kumparan bantu (B) dengan beda sudut 90^0 listrik. Kumparan bantu umumnya memiliki resistansi dan reaktansi lebih tinggi dibanding kumparan utama. Untuk mendapatkan pergeseran fasa arus antara kedua kumparan, kumparan bantu diseri dengan kapasitor (C) agar timbul medan putar.

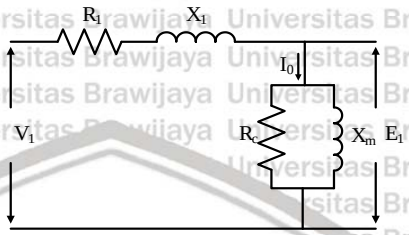
Pada kecepatan putaran rotor mencapai 75% kecepatan sinkron, maka kumparan bantu akan terputus hubungannya karena saklar sentrifugal (S) akibat adanya gaya sentrifugal pada rotor.



Gambar 2.7. Rangkaian Dasar Motor Induksi 1 Fasa (*Split Phase Starting Motor*)
Sumber : Zuhal, 1993 : 128

2.2.5. Rangkaian Pengganti Motor Induksi

Rangkaian pengganti motor induksi satu fasa hampir sama dengan rangkaian pengganti pada transformator, stator merupakan kumparan primer dan rotor merupakan kumparan sisi sekunder. Rangkaian pengganti ini sangat dibutuhkan untuk mempermudah analisis parameter motor. Ketika rotor tidak berputar rangkaian pengganti motor induksi ditunjukkan seperti pada Gambar 2.8. Kemudian bila terhubung dengan sumber bolak-balik rangkaian pada bagian rotor menjadi rangkaian tertutup.



Gambar 2.8. Rangkaian Pengganti Stator Motor Induksi pada Keadaan Diam
Sumber : Zuhal, 1992 : 108

Medan magnet stator berputar dengan kecepatan:

$$n_s = \frac{60.f_1}{p} rpm$$

$$f_1 = \frac{p.n_s}{60} Hz \qquad (2\text{-}10)$$

dengan, p : jumlah pasang kutub

1. Tegangan induksi rotor

Pada keadaan rotor tidak berputar maka n = 0 atau s = 1

$$E_2 = 4{,}44\, f_2\, N_2\, K_{w2}\, \phi_m \qquad (2\text{-}11)$$

Dimana $f_2 = f_1$ maka,

$$E_2 = 4{,}44 f_1 N_2 K_{w2} \phi_m \qquad (2\text{-}12)$$

dengan ,

N_1 : jumlah lilitan kumparan stator

N_2 : jumlah lilitan/konduktor rotor

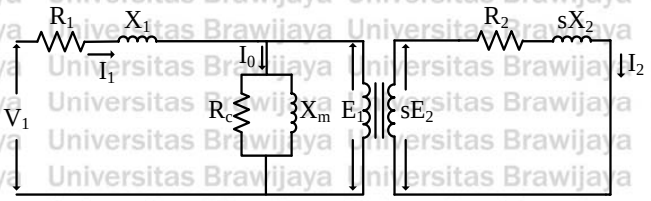
K_{w1} : faktor kumparan pada stator

K_{w2} : faktor kumparan pada rotor

Nilai tegangan induksi rotor bergantung dari rasio jumlah lilitan stator dengan jumlah lilit/konduktor rotor, dimana sesuai dengan persamaan berikut:

$$E_2 = \frac{N_1}{N_2} . E_1 \qquad (2\text{-}13)$$

Pada keadaan rotor berputar motor induksi merupakan transformator yang dapat mentransformasikan tegangan, arus, dan energi. Rangkaian motor induksi dengan rotor berputar sama seperti transformator yang sisi sekundernya dihubung singkat, seperti pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9. Rangkaian Pengganti Stator Motor Induksi pada Keadaan Berputar
Sumber : Zuhal, 1992 : 108

Putaran rotor motor induksi selalu berada di bawah putaran sinkronnya. Pada kondisi tidak dibebani nilai putaran rotornya sedikit di bawah putaran sinkronnya. Semakin besar beban yang dipikul motor semakin besar selisih putaran rotor dengan putaran sinkronnya. Selisih antara nilai putaran sinkron dengan putaran rotor dinamakan slip (s) (Zuhal, 1992 : 105)

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \text{x}100\% \qquad (2\text{-}14)$$

dengan, s : slip (%)

n_s : nilai putaran sinkron (kecepatan medan putar stator) *(rpm)*

n : nilai putaran rotor (*rpm*)

Besaran – besaran yang berbeda pada rangkaian ekivalen motor induksi pada keadaan diam dan berputar yaitu frekuensi dan tegangan terinduksinya yang dipengaruhi oleh slip.

Pada keadaan rotor berputar

$$f_2 = f_1 s$$

$$E_{2S} = 4{,}44 f_2 N_2 K_{W2} \phi_m$$

$$E_{2S} = 4{,}44 s f_1 N_2 K_{W2} \phi_m$$

$$= sE_2$$

jadi $E_{2S} = s\,E_2$ (2-15)

dengan E_{2S} : Tegangan induksi rotor ketika berputar dengan slip (s)

E_2 : Tegangan induksi rotor ketika tidak berputar

Tegangan terinduksi tiap fasa pada rotor sebanding dengan slip dimana dari persamaan (2-15) didapatkan.

$$E_{2S} = (N_2/N_1)\, s\, E_1 \qquad (2\text{-}16)$$

2. Reaktansi bocor rotor

Pada keadaan rotor tidak berputar *(s = 1)*

$X_2 = \omega . L_2$

$X_2 = 2.\pi . f_2 . L_2$

$X_2 = 2.\pi . f_1 . L_2$

Pada keadaan motor beroperasi

$X_{2s} = \omega . L_2$

$X_{2s} = 2.\pi . f_2 . L_2$

$X_{2s} = 2.\pi . f_1 . L_2$

$X_{2s} = s . X_2$

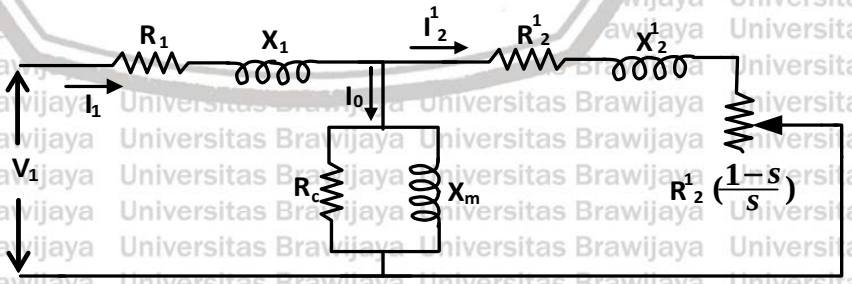
(2-17)

dengan X_{2S} : reaktansi pada kondisi motor beroperasi

X_2 : reaktansi ketika rotor tidak berputar

2.2.6. Motor Induksi pada Keadaan Mantap

Resistansi rotor untuk rotor belitan maupun rotor sangkar saat diam maupun berputar besarnya tidak terpengaruh terhadap perubahan slip (Zuhal, 1993). Jika bagian stator dijadikan acuan, rangkaian ekivalen motor induksi pada keadaan mantap ditunjukkan pada Gambar 2.10 di bawah.



Gambar 2.10. Rangkaian ekivalen motor induksi pada kondisi mantap

dengan, I^1_2 : arus rotor yang mengacu pada sisi stator

R^1_2 : tahanan rotor yang mengacu pada stator

s : slip

Rangkaian pengganti motor induksi pada Gambar 2.9 daya yang ditransfer melalui celah udara adalah :

$$P_{em} = (I^1{}_2)^2 \frac{R^1{}_2}{s} \text{ watt} \quad (2\text{-}18)$$

Rugi tahanan rotor (P_{cu2}) adalah :

$$P_{cu} = (I^1{}_2)^2 R^1{}_2 \text{ watt} \quad (2\text{-}19)$$

Daya mekanik yang dikeluarkan oleh rotor :

$$P_{mek} = (I^1{}_2)^2 \frac{R^1{}_2(1-s)}{s} \text{ watt} \quad (2\text{-}20)$$

Kecepatan sudut putaran rotor (ω_r) dalam radian per *second* adalah

$$\omega_r = (1\text{-}s)\ \omega_s \quad (2\text{-}21)$$

Torsi elektromagnetik dapat dihitung dari :

$$\tau_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_s}$$

ω_s: kecepatan sudut medan putar

dengan $\omega_s = 2\pi n_s$

Kecepatan sinkron motor adalah ω_s maka torsi elektromagnet (τ_{em}) adalah

$$\tau_{em} = \frac{(I_2^1)^2 (R_2 / s)}{\omega_s} N - m \quad (2\text{-}22)$$

$$I^1{}_2 = \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + R^1{}_2 / s)^2 + (X_1 + X^1{}_2)^2}} A \quad (2\text{-}23)$$

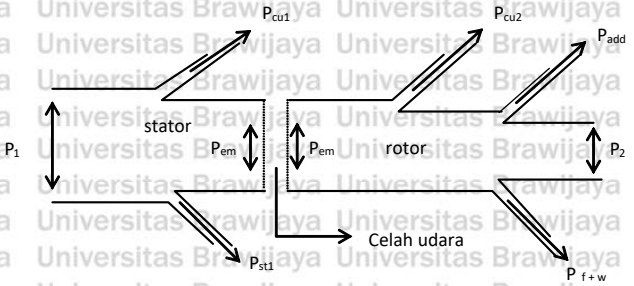
$$\tau_{em} = \frac{V_1{}^2 (R^1{}_2 / s)}{\omega_s (R_1 + R^1{}_2 / s)^2 (X_1 + X^1{}_2)^2} N - m \quad (2\text{-}24)$$

dimana,

$$X = X_{BR} = (X_1 + X^1{}_2) \quad (2\text{-}25)$$

2.2.7. Effisiensi Motor Induksi

Aliran daya motor induksi seperti terlihat pada Gambar 2.11. Daya masukan pada motor induksi tidak semua digunakan untuk memutar rotor akan tetapi sebagian terbuang dalam bentuk rugi-rugi daya motor.



Gambar 2.11. Aliran Daya Motor Induksi

dimana,

P_{in} : daya masukan

P_{cul} : rugi tembaga stator

P_{st1} : rugi inti pada stator

P_{em} : daya elektromagnetik yang dipindahkan dari stator ke rotor melalui celah udara

P_{cu2} : rugi tembaga pada belitan rotor

P_{add} : rugi tambahan (misal : rugi adanya ditorsi dari bentuk gelombang input)

P_{f+w} : rugi mekanis rotor (rugi gesekan dan rugi angin)

P_2 : daya keluaran motor

$$P_{em} = P_1 - P_{cu1} - P_{st1} \tag{2-26}$$

Daya elektromagnetik P_{em} ditransfer dari stator ke rotor melalui celah udara apabila rugi-rugi pada rotor dianggap nol maka seluruh daya masuk diubah menjadi daya mekanis, tetapi karena pada rotor timbul aliran arus maka pada rotor juga terdapat rugi-rugi dan daya output rotor menjadi (P_2)

$$P_2 = P_{em} - P_{cu2} - P_{f+w} - P_{add} \tag{2-27}$$

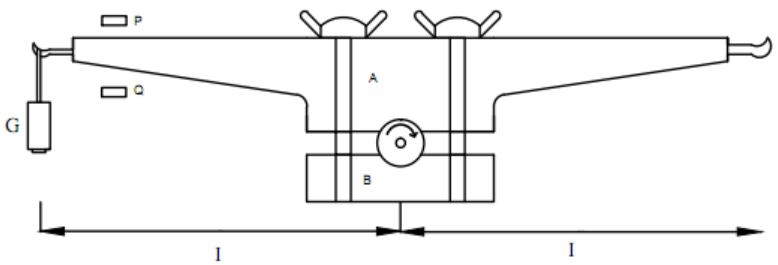
Efisiensi dari motor induksi adalah perbandingan daya keluaran mekanik (P_2) dibagi daya masukan yang dinyatakan:

$$\eta = \frac{Pout}{Pin} = \frac{\text{daya keluaran}}{\text{daya masukan}}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \sum \text{rugi} - \text{rugi}} \tag{2-28}$$

2.2.8. Torsi Motor

Besar torsi motor dapat diketahui melalui pengujian. Pengujian tersebut dapat diperoleh dari motor yang dikopelkan langsung pada sistem rem, hal ini biasa disebut dengan pengujian *Prony Brake*. Prinsip dari pengujian *Prony Brake* adalah pengereman poros *output* motor digambarkan pada Gambar 2.12 di bawah.



Gambar 2.12. Rangkaian pengujian berbeban dengan metode *Prony Brake*
Sumber : Sujud, 1953 : 191

Rangkaian pengujian menunjukkan bahwa poros motor dipasang roda pengerem yang diliputi dua lengan rem A dan B. Dengan bantuan dua baut yang ada mur sayapnya sehingga tekanan lengan rem dapat diatur. Lengan A dapat bergerak ke atas dan ke bawah antara titik P dan Q. Di ujung lengan digantungkan sebuah pemberat sehingga ketika motor itu berhenti kedua lengan tersebut setimbang. Jika motor berputar menurut arah anak panah dan rem terbawa oleh arah putar motor sehingga lengan sebelah kiri tertekan pada penampang P. Makin keras mur bersayap tersebut dikencangkan atau semakin kuat pengereman, maka semakin besar pula arus yang terpakai. Gaya lengan rem sedemikian rupa sehingga besar arus yang mengalir pada motor nilainya berubah. Lengan rem dipasang sebuah timbangan G. Nilai torsi yang didapatkan adalah :

$$\tau_m = F.l \text{ (N-m)} \qquad (2 - 29)$$

dimana,

τ_m: Torsi motor (N-m)

F: Gaya yang bekerja saat pengereman (N)

l: Panjang lengan dari poros motor sampai ujung lengan (m)

2.2.9. Konduktor Stator

Kerapatan arus pada konduktor stator pada kondisi normal, yaitu untuk mesin standar berkisar antara 3 sampai 4 A/mm^2 (Sawhney, 1970 : 694),

Arus pada stator adalah :

$$Is = \frac{P_{out}}{V.\eta.\cos\varphi} \qquad (2\text{-}30)$$

luas penampang konduktor kumparan stator dapat dihitung dengan:

$$a_s = \frac{I_s}{\delta_s}\ mm^2 \qquad (2\text{-}31)$$

dimana, δ_S : kerapatan arus (A/m^2)

2.2.10. Alur Stator

Alur stator motor induksi ada dua jenis, yaitu jenis setengah tertutup dan jenis terbuka. Alur jenis setengah tertutup digunakan pada motor-motor berkapasitas rendah dan sedang, sedangkan alur jenis terbuka untuk motor-motor dengan kapasitas sedang sampai besar. Secara umum untuk menentukan jumlah alur stator, ditentukan oleh jumlah alur per kutub / fasa. Sedangkan kisar alur untuk permukaan celah udara untuk jenis alur terbuka antara 15 sampai 25 mm dan untuk jenis setengah tertutup bisa lebih kecil dari 15 mm (Sawhney, 1970 : 604).

Besarnya kisar alur dihitung dengan rumus :

$$Y_{SS} = \frac{\pi \cdot D}{S_S} \qquad (2\text{-}32)$$

dimana, S_S : jumlah alur stator

Sedangkan jumlah konduktor stator untuk motor induksi satu fasa :

$$Z_{ss} = \frac{2T_m}{S_s} \qquad (2\text{-}33)$$

penampang alur dapat dihitung :

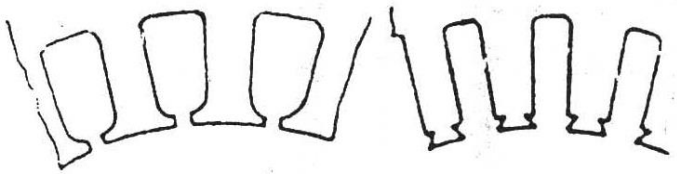
$$\frac{Z_{SS} \cdot a_S}{S_f} \qquad (2\text{-}34)$$

dimana, Z_{SS} : penampang konduktor peralur

a_s : luas penampang konduktor (mm^2)

S_f : faktor permukaan (antara 0,6 sampai 0,75).

Lebar alur harus diperhitungkan, karena kerapatan fluksi digigi alur antara 0,9 sampai 1,4 Wb/m^2 (Sawhney, 1990). Bentuk alur stator umumnya digambarkan yang sesuai pada Gambar 2.13 di bawah.



a. Alur Setengah Tertutup b. Alur Terbuka

Gambar 2.13. Bentuk Alur

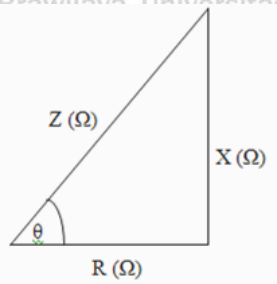
Sumber : Sawhney, 1990 : 604

Panjang kumparan utama (Sawhney, 1970 : 698) :

$$L_{ml} = \{8{,}4 \frac{D + dss}{Ss} \; x \; slot \; spanned\} + 2L \qquad (2\text{-}35)$$

2.2.11. Penentuan Nilai Kapasitor

Motor induksi satu fasa memerlukan alat bantu sebagai penggeser fasa arus. Adapun salah satu penggeser fasa dapat menggunakan kapasitor untuk mendapatkan beda fasa sebesar 90°. Kapasitor tersebut diseri dengan kumparan bantu. Untuk mendapatkan nilai kapasitor yang dibutuhkan dapat ditentukan dengan menggunakan segitiga impedansi yang dilukiskan pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14. Segitiga Impedansi
Sumber : Budiono, 1995 :155

$$\theta = \arctan (X/R) \quad (2\text{-}36)$$

Agar didapatkan perbedaan sudut 90° maka,

$$\theta' = 90° - \theta \quad (2\text{-}37)$$

Untuk mendapatkan reaktansi baru (X') maka,

$$X' = (\tan \theta') R \quad (2\text{-}38)$$

Maka nilai X_C yaitu :

$$X_C = X + X' \quad (2\text{-}39)$$

Nilai kapasitor yang dibutuhkan :

$$C = \frac{1}{2.\pi.f.X_C} \text{ (F)} \quad (2\text{-}40)$$

2.2.12. Analisis Bentuk Gelombang Menggunakan Deret Fourier

Setiap fungsi yang berulang mempunyai persamaan f(t)=f(t+T) dan dapat dinyatakan dengan deret Fourier bila memenuhi persyaratan *Dirichlet* sebagai berikut:

a) Bila gelombang tidak bersinambungan, dengan jumlah ketidaksinambungan yang terbatas dalam satu periode T.

b) Gelombang memiliki nilai rata-rata yang terbatas serta memiliki nilai maksimum dan minimum dalam periode T

Bila syarat-syarat di atas terpenuhi, deret Fourier dapat dinyatakan dengan persamaan: (Mismail B., 1997:181)

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty}(a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (2\text{-}41)$$

Suatu besaran tegangan maupun arus yang terdapat komponen harmonisanya dapat diuraikan dalam deret Fourier sebagai berikut:

$$v(t) = \sum_{h=1}^{\infty} a_h \cos(n\omega_o + \emptyset_h) \quad (2\text{-}42)$$

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} b_h \cos(n\omega_o + \theta_h) \quad (2\text{-}43)$$

Dimana:

$$a_o = \frac{1}{T}\int_0^T f(t)dt \quad (2\text{-}44)$$

$$a_n = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\cos n\omega t\, dt \quad (2\text{-}45)$$

$$b_n = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\sin n\omega t\, dt \quad (2\text{-}46)$$

Orde harmonisa (n) yang merupakan bilangan bulat 1,2,3,4,.. dan seterusnya. Pada bidang elektro kebanyakan orde yang dominan adalah orde ganjil (1,3,5,) dimana komponen fundamentalnya dinyatakan pada n=1. Suku a_o menyatakan nilai rata-rata dari gelombang, dimana komponen ini tidak muncul dalam sistem arus bolak-balik. Gelombang yang cacat memiliki koefisien-koefisien dengan indeks n. Amplitudo harmonisa dinyatakan sebagai:

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad , n \geq 1 \quad (2\text{-}47)$$

Nilai-nilai c sebagai fungsi n sering digambarkan dalam suatu barchart yang disebut dengan "spektrum frekuensi" gelombang. Perhitungan koefisien setiap harmonisa dapat dilakukan menurut langkah-langkah prosedur pendekatan numerik berikut (A.R. Margunadi, 1994:311):

a) Perhitungan suatu integrasi secara numerik selang antara batas-batas integrasi diturunkan menjadi k bagian yang sama. Bila f_1, f_2, f_3, f_4…,f_k menyatakan ordinat f(t) pada batas-batas bagian selang waktu tersebut, sedangkan a dan b menunjukkan batas-batas integrasi maka

$$\int_a^b f(t)dt = \frac{b-a}{k}(f_1 + f_2 + f_3 + \cdots + f_k) \quad (2\text{-}48)$$

b) Formulasi untuk memperoleh koefisien tiap komponen harmonisa adalah sebagai berikut:

$$a_0 = \frac{2}{k}\int_{i=1}^{k} fi \quad (2\text{-}49)$$

$$a_h = \frac{2}{k}\sum_{i=1}^{k} fi \cos(h\frac{i2\pi}{k}) \quad (2\text{-}50)$$

$$b_h = \frac{2}{k}\sum_{i=1}^{k} fi \sin(h\frac{i2\pi}{k}) \quad (2\text{-}51)$$

c) Formula untuk sudut fasa adalah (Sudaryatno Sudirham, 2010:93):

$$\varphi_h = tan^{-1}\left(\frac{b_h}{a_h}\right) \quad (2\text{-}52)$$

d) Amplitudo dari setiap komponen harmonisa adalah

$$A = \sqrt{a_h^2 + b_h^2} \tag{2-53}$$

sehingga persamaannya,

$$f(t) = a_o + \sum_{h=1}^{\infty}[\sqrt{a_h^2 + b_h^2}\cos(h\,\omega_0 t - \varphi_h)] \tag{2-54}$$

2.2.13. Perhitungan Medan Magnet dengan *Finite Element*

Mesin-mesin listrik yang tersusun atas laminasi inti dengan frekuensi operasi yang relatif rendah arus eddy dalam laminasi inti dan perubahan kerapatan arusnya dapat diabaikan sehingga persamaan medan magnetostatiknya dapat diuraikan (Meeker D., 2008) Menurut persamaan Maxwell dan hukum ampere, kerapatan arus yang digunakan sebagai masukan untuk menghitung medan magnet yang besarnya (Mahalingam G., 2000):

$$\nabla \times H = J \tag{2-55}$$

$$\nabla \cdot B = 0 \tag{2-56}$$

Dimana,

H(x,y,z): Medan magnet (A/m)

B(x,y,z): Kerapatan fluks magnet (T)

J(x,y,z): kerapatan arus (A/m^2)

Hubungan antara kerapatan fluks magnet dan medan magnet dapat dihitung dengan persamaan:

$$B = \mu_0\,\mu_r\,H = \nabla \times A \tag{2-57}$$

Dengan,

μ_r (x,y,z): permeabilitas relatif

μ_o: permeabilitas udara = $4\pi 10^{-7}$.

Pada kasus dua dimensi (bidang datar):

$$J = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ j\,(x,y) \end{bmatrix} \tag{2-58}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ A_z\,(x,y) \end{bmatrix} \tag{2-59}$$

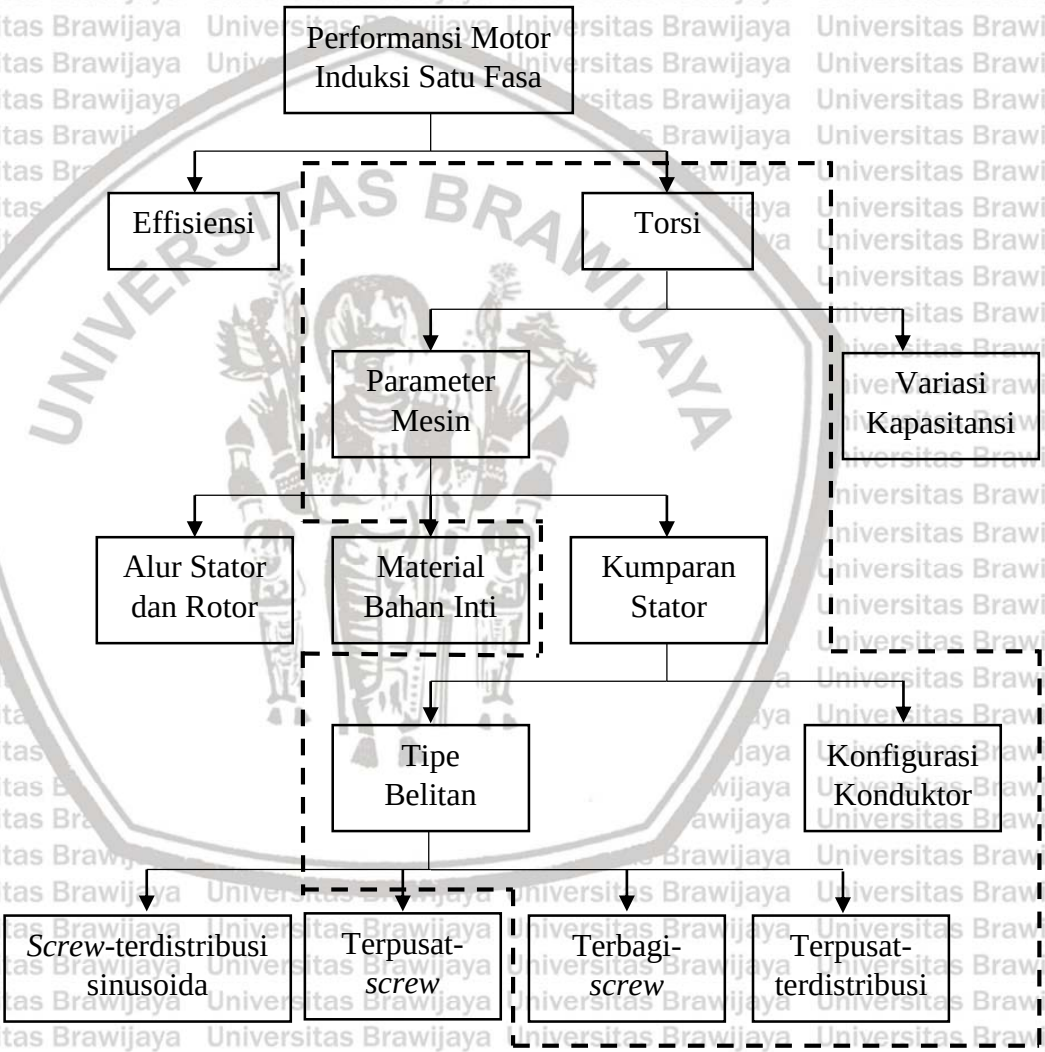
$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial A_z}{\partial y} \\ -\frac{\partial A_z}{\partial x} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2\text{-}60)$$

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

BAB III
KERANGKA KONSEP PENELITIAN

3.1. Kerangka Penelitian

Penelitian Pengaruh Konfigurasi Tipe Belitan Mesin Induksi Satu Fasa Terhadap Unjuk Kerja Motor, dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Kerangka Konsep Penelitian (Motor Induksi)

Motor induksi satu fasa merupakan motor yang banyak diaplikasikan pada kehidupan sehari-hari, baik pada peralatan rumah tangga maupun industri. Pada perkembangannya dibutuhkan motor induksi yang mempunyai efisiensi dan torsi yang tinggi.

Performansi efisiensi dan torsi adalah masalah yang kompleks. Salah satu contoh adalah kebutuhan motor induksi dengan torsi tinggi yang digunakan sebagai penggerak kendaraan listrik. Untuk mendapatkan torsi yang baik spada motor induksi satu fasa telah dilakukan beberapa penelitian. Antara lain dengan variasi kapasitansi dan penggunaan parameter mesin yang baik. Adapun parameter mesin tersebut meliputi bentuk alur stator dan rotor, material bahan inti, serta kumparan stator. Kumparan stator motor induksi satu fasa ada dua jenis antara lain kumparan utama dan kumparan bantu, dimana keduanya menghasilkan daya yang nilainya bergantung dari jumlah belitan yang menyusunnya. Konduktor kumparan stator mempengaruhi besarnya rugi tembaga, semakin banyak jumlah lilit semakin rendah rugi tembaganya (Raabe Nick, 2014). Oleh karena itu konfigurasi konduktor yang mengisi alur stator diusahakan seoptimal mungkin sesuai dengan luas alur dan konduktor yang ditentukan. Kedua kumparan stator memiliki tipe belitan yang disesuaikan dengan konstruksi stator.

Pada penelitian ini digunakan dua jenis tipe belitan, yaitu tipe belitan terbagi-*screw* (Mesin A) dan terpusat-terdistribusi merata (Mesin B). Setiap tipe belitan menghasilkan MMF kumparan yang sesuai dengan konfigurasi konduktor kumparan. Bentuk MMF pada celah udara dapat diuraikan menjadi komponen dasar (fundamental) dan komponen harmonisanya. Semakin banyak komponen harmonisa yang terdapat MMF kumparan akan berdampak penurunan unjuk kerja mesin. Sebagai konsekuensinya akan meningkatkan rugi inti, torsi *harmonic* yang merugikan, dan *noise* yang berlebihan (Cathey J., 2001). Hal ini akan mengurangi besar torsi motor yang dihasilkan. Ketika besar torsi yang dihasilkan rendah maka daya *output* motor juga rendah. Rendahnya nilai daya *output* menjadikan efisiensi motor rendah. Pada penelitian ini juga dilakukan simulasi dan analisis *finite element* dengan perangkat lunak terbuka FEMM 4.2. Hal ini bertujuan untuk mengetahui distribusi medan magnet dan kapasitas motor.

Penelitian dan penyusunan tesis ini dilakukan dengan membuat kumparan utama dan kumparan bantu dibuat simetri agar daya yang dihasilkan kedua kumparan sama besarnya. Kondisi kumparan yang simetri tersebut dibuat dengan menempatkan masing-masing kumparan pada setengah bagian alur stator sehingga masing-masing kumparan menempati 18 alur stator dari total 36 alur stator. Hal ini bertujuan untuk mendapatkan impedansi masing-masing kumparan sama besarnya. Untuk menjadikan perbedaan fasa 90° dilakukan dengan mengkombinasikan kapasitansi agar fasa kumparan bantu tergeser. Sudut impedansi kumparan diusahakan sebesar 45° agar ketika kondisi mantap arus pada kedua kumparan menjadi setimbang. Disamping itu torsi maksimum motor induksi satu fasa dihasilkan ketika

fasa arus kumparan bantu bergeser sebesar 90° dari arus kumparan utama (Michaelides dan Nicolaou 2017).

Penelitian ini diawali dengan melakukan identifikasi data motor induksi rotor sangkar yang akan digunakan. Data motor induksi tersebut adalah data pada *name-plate* dan konstruksi stator. Konstruksi stator tersebut antara lain dimensi (diameter dan panjang), jumlah alur stator, dan luas alur stator. Setelah data tersebut didapatkan maka dapat ditentukan jumlah kutubnya. Dalam penelitian ini ditentukan jumlah kutub sebanyak 6 buah. Jumlah kutub tersebut digunakan sebagai acuan untuk menentukan bentuk belitan, penentuan jumlah lilit, dan ukuran diameter konduktor yang digunakan.

Data dari hasil perhitungan dilakukan simulasi dengan bantuan *software* FEMM 4.2, untuk mengetahui parameter kumparan pada kedua jenis tipe belitan. Kemudian data hasil perhitungan belitan yang telah divalidasi melalui program FEMM 4.2 diterapkan pada konstruksi stator yang telah didapatkan sebelumnya. Untuk mengetahui parameter dan nilai torsi motor induksi yang telah dibuat dilakukan beberapa pengujian. Pengujian tersebut meliputi pengujian DC, *block rotor*, tanpa beban, dan berbeban.

3.2. Variabel Penelitian

Variabel penelitian dalam penyusunan penelitian ini antara lain:

a. Tipe belitan terbagi-*screw*
b. Tipe belitan terpusat-terdistribusi
c. Resistansi kumparan
d. Reaktansi kumparan

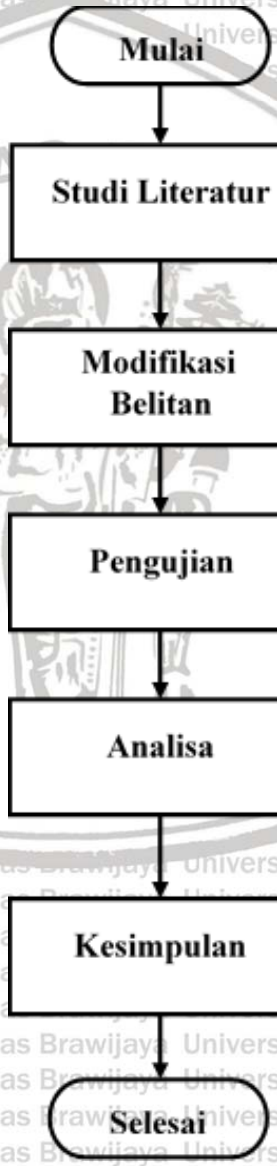
3.3. Hipotesis

Hipotesis yang disusun dari penelitian ini adalah tipe belitan dan konfigurasi konduktor kumparan stator yang masing-masing yang dapat mempunyai sudut impedansi 45°. Hal ini akan mudah untuk mendapatkan perbedaan fasa arus kumparan utama dan bantu yang ideal sebesar 90°. Beda sudut fasa arus kumparan utama dan bantu yang ideal menghasilkan torsi yang optimum dan arus yang mengalir pada kedua kumparan menjadi setimbang.

BAB IV
METODOLOGI PENELITIAN

4.1. Metodologi Penelitian

Tahapan penyususan penelitian yang dilakukan mengikuti langkah-langkah seperti pada diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 berikut,



Gambar 4.1. Diagram Alir Metodologi Penelitian

Langkah pertama dalam penelitian ini diawali dengan mengkaji literatur-literatur dengan melakukan studi melalui sumber-sumber ilmiah yang terkait baik buku maupun jurnal. Modifikasi belitan yang meliputi penentuan luas konduktor yang digunakan, perancangan bentuk kumparan, dan penentuan nilai kapasitor yang digunakan. Untuk mendapatkan nilai parameter dan unjuk kerja motor hasil modifikasi dilakukan pengujian. Dari hasil pengujian dilakukan analisis dan membandingkan hasil perhitungan dengan perancangan menggunakan metode element hingga (*finite element method)*. Hasil dari analisis dapat dilakukan penarikan kesimpulan.

4.2. Konfigurasi Konduktor dan Belitan

4.2.1. Perancangan Bentuk Belitan

Diagram alir perancangan bentuk belitan dalam penelitian ditunjukkan pada Gambar 4.2 berikut.

Gambar 4.2. Diagram Alir Penentuan Bentuk Belitan

4.2.2. Penentuan Luas Penampang konduktor

Diagram alir penentuan luas penampang konduktor yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4.3 di bawah.

Gambar 4.3. Diagram Alir Penentuan Luas Konduktor yang Digunakan

Konduktor kumparan yang didapat melalui perhitungan perancangan bentuk belitan (K_a) sering kali sulit dalam pelilitan sehingga menghasilkan faktor permukaan yang tidak optimal. Untuk mendapatkan faktor permukaan yang optimal digunakan konduktor dengan penampang yang lebih kecil (K_b). Langkah yang digunakan adalah dengan merangkap dua buah konduktor K_b tiap lilit. Algoritma perhitungan dilakukan seperti pada Gambar 4.3 di atas. Perhitungan tersebut untuk mendapatkan luas total penampang dua konduktor B (A_{Kb}) sebesar luas satu konduktor A (A_{Ka}). Toleransi perbandingan luas satu K_a dan dua K_b tidak lebih dari dua persen. Selain menggunakan konduktor rangkap dua dengan diameter yang sama ada beberapa konfigurasi lain yang bisa digunakan. Konfigurasi lain tersebut antara lain :

a. Dua konduktor dengan diameter yang berbeda dengan luas total sama dengan luas konduktor tunggal
b. Empat buah konduktor dengan diameter setengah dari diameter konduktor tunggal

4.3. Pengujian

Pada tahap ini dilakukan beberapa pengujian, diantaranya pengujian untuk mendapatkan parameter motor induksi. Pengujian tersebut meliputi pengujian DC, block rotor, dan tanpa beban. Hasil pengujian tersebut didapatkan nilai R_1, X_1, R_c, X_m, R'_2, dan X'_2. Sedangkan untuk mengetahui peforma motor induksi, diantaranya adalah daya keluaran (P_{out}) dan torsi motor (τ_m). Metode yang digunakan untuk mengetahui besar torsi motor yaitu dengan rem mekanik yang sesuai dengan metode *Prony Brake*.

4.4. Penentuan Nilai Kapasitor

Untuk menentukan nilai kapasitor yang digunakan sebagai alat penggeser fasa dan alat bantu starting, dilakukan perhitungan dengan data parameter motor induksi. Dengan perhitungan nilai sudut impedansi ekuivalen kumparan utama (θ_{KU}). Untuk mendapatkan perbedaan fasa sebesar 90°, antara kumparan utama dan kumparan bantu, nilai sudut impedansi kumparan bantu (θ_{KB}) harus digeser sebesar :

$$\theta_{KB} = -(90 - \theta_{KU})°$$

Dari pnilai θ_{KB}, dilakukan perhitungan nilai kapasitor sehingga didapatkan perbedaan fasa sebesar 90° diantara kedua kumparan.

4.5. Alat dan Bahan

Dalam penelitian ini menggunakan bermacam-macam alat dan bahan yang sesuai pada fungsinya baik perangkat keras maupun perangkat lunak, antara lain :

a. Motor Induksi
b. Kapasitor
c. Kawat konduktor (imail)
d. Volt meter
e. Ampere meter
f. Watt meter
g. Tacho meter
h. Saklar
i. Timbangan
j. Kabel penghubung
k. Program FEMM
l. Program AutoCad

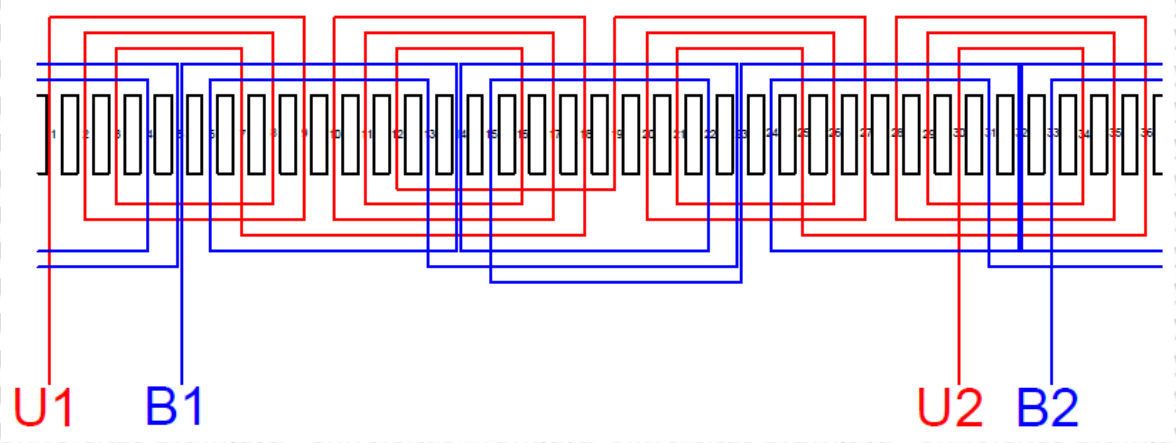
repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

BAB V
TIPE BELITAN DAN KAPASITAS MESIN

5.1. Dasar Perancangan

Perancangan sebuah motor induksi yang harus ditentukan terlebih dahulu adalah daya dari motor. Dalam perancangan ini, bagian belitan stator motor induksi 1 fasa yang dimodifikasi dengan tujuan mengubah jumlah kutub motor dari 4 kutub menjadi 6 kutub, tanpa mengubah dimensi stator maupun rotornya. Berikut ini data yang digunakan untuk modifikasi motor induksi satu fasa 6 kutub. Susunan belitan motor induksi sebelum dimodifikasi seperti ditunjukkan pada Gambar 5.1.

- Daya keluaran P: 1,5 kW
- Tegangan V: 380 V
- Arus nominal I: 3,2 A
- Frekuensi f: 50 Hz
- Putaran n: 1420 rpm
- Diameter inti stator D: 105 mm
- Panjang inti stator L: 85,1 mm
- Jumlah alur stator S: 36
- Jumlah kutub p: 4
- Merek : MEIDEN



Gambar 5.1. Bentuk belitan motor induksi sebelum dimodifikasi

5.1.1. Kapasitas Motor Induksi

Motor yang dirancang adalah motor induksi satu fasa kutub 6 dengan menurunkan nilai putaran sinkronnya tanpa merubah dimensi mesin dan fluks magnet. Nilai daya keluaran mesin akan turun sebanding dengan turunnya nilai putaran sinkron (Sahwney, 1990). Perubahan jumlah kutub dari kutub 4 menjadi 6 kutub yang dapat merubah nilai daya keluarannya menjadi dua pertiga kali dari nilai sebelumnya sebesar:

P_{out} Motor Induksi 1 fasa = 1000 watt

Mengacu dari tabel efisiensi dan faktor daya (Sawhney, 1990 : 602), motor induksi 1 fasa rotor sangkar kutub 6 yang diuraikan pada Tabel 5.1 di bawah.

Tabel 5.1. Efisiensi dan Faktor Daya Motor Induksi 1 Fasa

No	P_{out} (kW)	Efisiensi (η)	Cos φ
1	2,2	0,75	0,66
2	3,7	0,81	0,69

Sumber : Sawhney, 1990 : 602

Dengan metode interpolasi, maka efisiensi dan cos φ untuk daya output 1000 watt adalah

$\eta = 0{,}7$ dan $\cos\varphi = 0{,}64$

Daya *input* motor induksi yang termodifikasi masing-masing kumparan adalah :

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta} = \frac{500}{0{,}7} = 714{,}28 \text{ watt}$$

Sedangkan untuk motor induksi 1 fasa, arus yang mengalir pada setiap kumparan stator adalah:

$$I = \frac{P_{in}}{V \times \cos\varphi} = \frac{714{,}28}{220 \times 0{,}64} = 5{,}073A$$

Pada modifikasi jumlah kutub ini nilai *Bav*, *ac*, dan δ pada motor induksi 1 fasa rotor sangkar dengan nilai diameter stator (D) 105 mm adalah :

Bav = 0,53 Wb/m^2

ac = 37000 A/m

δ = 3,2 A/mm^2

Nilai Bav yang ditentukan diatas tetap memenuhi syarat karena nilai kerapatan fluksi maksimal tidak lebih dari 1,2 weber/cm^2.

5.1.2. Bentuk Kumparan

Belitan yang digunakan untuk penelitian ini memanfaatkan konstruksi stator yang telah diidentifikasi pada sub bab sebelumnya. Ada dua jenis tipe belitan yang digunakan antara lain tipe belitan terpusat dan terbagi. Untuk melakukan modifikasi belitan faktor-faktor yang perlu diperhitungkan terlebih dahulu antara lain:

- Jumlah kutub
- Jumlah alur stator
- Kisar alur
- Luas penampang alur
- Jumlah kumparan individu
- Luas penampang konduktor

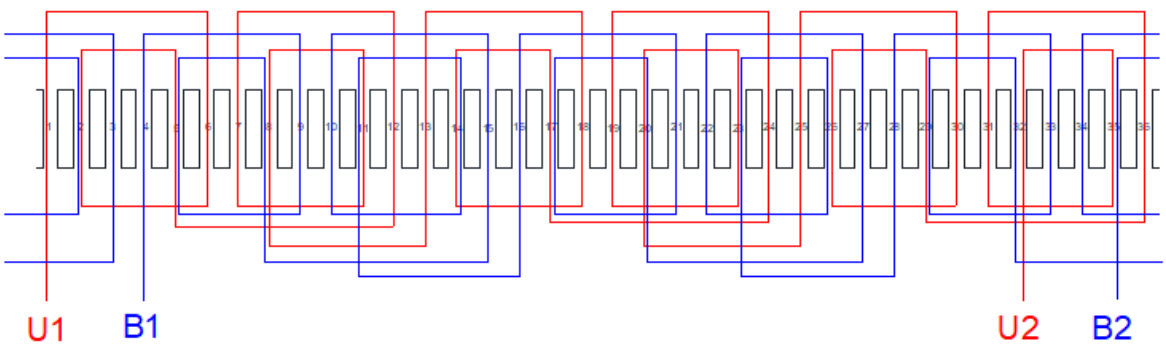
Sesuai dengan tabel pemilihan alur stator (Cathey J., 2001) stator dengan alur sebanyak 36 buah dapat digunakan untuk kutub sebanyak 2,4, dan 6. Pada penelitian ini ditentukan jumlah kutub sebanyak 6 buah. Dengan menggunakan 6 kutub (3 pasang kutub) pada 36 alur stator didapatkan kisar alur (y_θ) sebesar:

$$y_\theta = p\ x\ \frac{360°}{S_s}$$

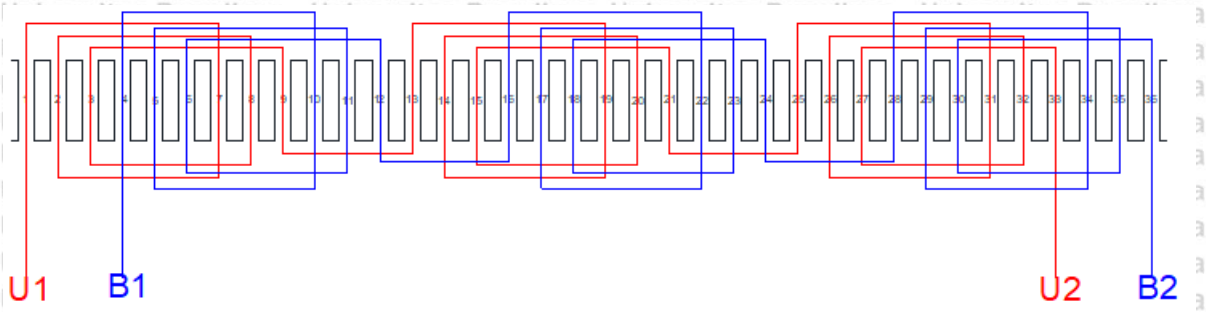
$$y_\theta = 3\ x\ \frac{360°}{36}$$

$$y_\theta = 30°$$

Kisar alur sebesar 30° telah memenuhi persyaratan untuk melakukan modifikasi belitan agar kisar fasa antara kumparan utama dan kumparan bantu sebesar 90° dan kisar kutub sebesar 180°. Dua tipe belitan terbagi-*skrew* (Mesin A) dan terpusat-terdistribusi (Mesin B) dapat diterapkan. Berikut merupakan hasil modifikasi belitannya dengan kumparan utama digambar dengan warna merah dan kumparan bantu dengan warna biru seperti yang ditunjukkan Gambar 5.2 dan 5.3 di bawah.



Gambar 5.2. Bentuk belitan terbagi-*skrew*



Gambar 5.3. Bentuk belitan terpusat-terdistribusi

Keterangan :

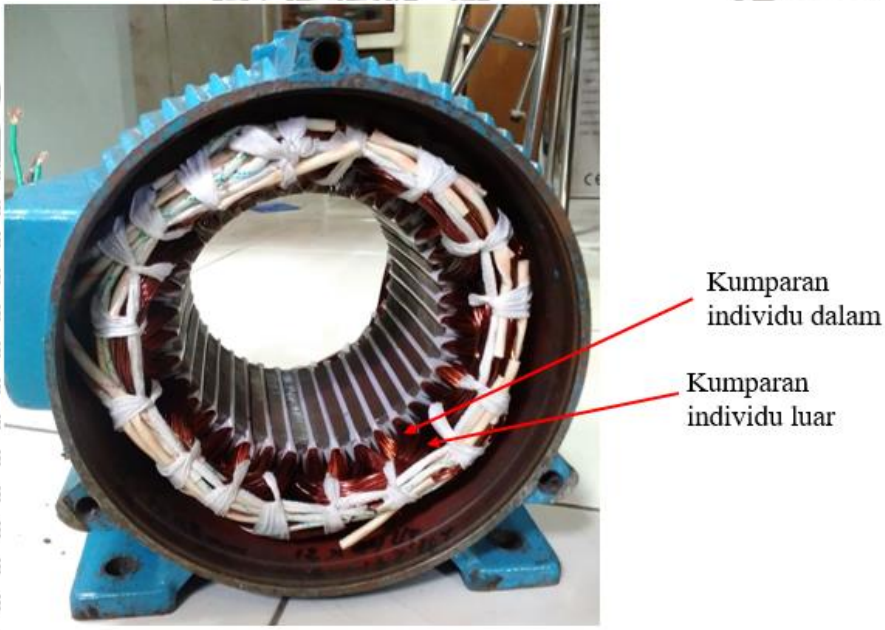
U1 : Ujung awal kumparan utama

U2 : Ujung akhir kumparan utama

B1 : Ujung awal kumparan bantu

B2 : Ujung akhir kumparan bantu

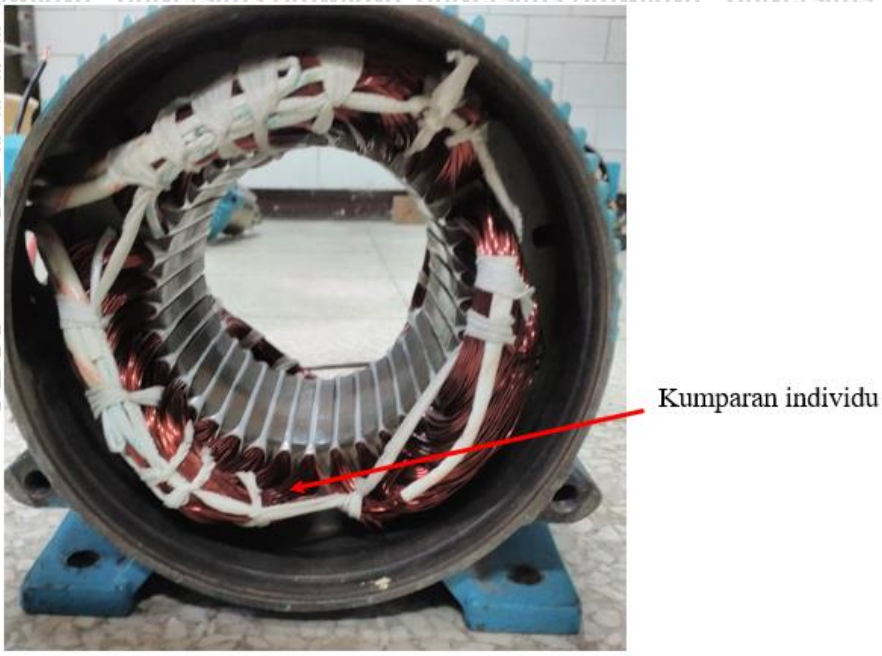
Belitan tipe terbagi-*skrew* (Mesin A) terdapat dua kumparan inividu untuk setiap kutubnya dan mempunyai 12 kumparan individu pada masing-masing fasanya. Dua kumparan individu tersebut antara lain kumparan individu luar dan kumparan individu dalam yang mempunyai lebar kumparan yang berbeda. Dimana kumparan individu luar mempunyai lebar kumparan yang lebih besar dibanding kumparan individu dalam seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.4.



Gambar 5.4. Susunan belitan terbagi-*screw*

Pada Mesin A terdapat dua belas alur yang terisi dua kumparan yang berbeda dimana enam diantaranya arus yang mengalir pada masing-masing kumparan arahnya berlawanan. Dua jenis kumparan berbeda yang mengisi alur sama jumlah lilit masing-masing kumparan setengah dari jumlah lilit yang ditentukan.

Tipe belitan terpusat-terdistribusi (Mesin B) terdapat satu kumparan individu untuk setiap pasang kutubnya dan 9 kumparan individu untuk setiap fasanya. Semua kumparan individu tersebut mempunyai lebar kumparan yang sama dengan jumah lilit sama banyaknya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.5 berikut.



Gambar 5.5. Susunan belitan terpusat-terdistribusi

5.1.3. Jumlah Lilit Kumparan Stator

Tegangan induksi stator (E) bernilai 95% dari tegangan yang diterapkan, sehingga :

$E = 0{,}95\ x\ 220$

$E = 209\ V$

Nilai fluksi perkutub sebanding dengan dimensi utama mesin baik diameter (D) maupun panjang (L) inti stator. Oleh karena itu fluksi perkutub dapat dihitung sebagai:

$$\phi_m = B_{av} . \frac{\pi . D . L}{p}$$

$$\phi_m = 0{,}53 . \frac{3{,}14\ .\ 0{,}105\ .\ 0{,}0851}{6}$$

$$\phi_m = 2{,}47\ .\ 10^{-3} weber$$

jumlah lilit kumparan utama (T_m) dapat dihtung dengan:

$$T_m = \frac{E}{4{,}44\,.\,f\,.\,\phi_m\,.\,K_{wm}}$$

$$T_m = \frac{209}{4{,}44\,.\,50.\,0{,}00247\,.\,0{,}955}$$

$$T_m = 397{,}82 \approx 398\ lilit$$

Lilitan kumparan stator yang terhubung seri (T_{pm}) tiap kutubnya adalah :

$$T_{pm} = \frac{T_m}{p}$$

$$T_{pm} = \frac{398}{6}$$

$$T_{pm} = 66{,}33 \approx 67\ lilit$$

Pada penelitian ini ditentukan jumlah lilit kumparan stator yang terhubung seri (T_{pm}) sebanyak 67 lilit untuk memaksimalkan ruang alur stator.

Total jumlah lilit kumparan utama (T_m) adalah :

$$T_m = T_{pm}.\,p$$

$$T_m = 67\,.\,6$$

$$T_m = 402\ lilit$$

Jumlah konduktor yang dapat menempati satu alur dapat dihitung dengan:

$$Z_{ss} = \frac{2T_m}{S_s}$$

$$= \frac{2x402}{18}$$

$$= 44{,}67 \approx 45 \text{ konduktor/alur}$$

5.1.4. Ukuran Konduktor Modifikasi Kumparan Motor Induksi

Pada motor induksi ini terdapat dua kumparan yang bekerja secara bersamaan. Arus konduktor pada masing–masing kumparannya adalah:

$$Is = \frac{P}{V\ \ \eta\ \ \cos\varphi}$$

$$= \frac{500}{220\ \ 0{,}7\ \ 0{,}64}$$

$$= 5{,}07 \text{ A}$$

Luas penampang konduktor stator :

$a_m = \frac{Is}{\delta}$

$= \frac{5{,}07}{3{,}95}$

$= 1{,}28\ mm^2$

Diameter konduktor,

$a_m = \frac{1}{4}\pi \quad d^2$

maka,

$$d = \sqrt{\frac{4\,.\,a_m}{\pi}}$$

$$d = 1{,}277\ mm$$

Perhitungan diameter konduktor didapatkan sebesar 1,277 mm, dengan menyesuaikan konduktor yang ada di pasaran maka digunakan konduktor dengan diameter 1,2 mm.

Luas penampang konduktor kumparan utama dapat dihitung dengan :

$$a_m = \frac{3{,}14\,.\,1{,}2^2}{4}$$

$$a_m = 1{,}1304\ mm^2$$

Kerapatan arus yang mengalir pada konduktor kumparan:

$$\delta = \frac{I_s}{a_m}$$

$$\delta = \frac{5{,}07}{1{,}1304}$$

$$\delta = 4{,}485\ A/mm^2$$

Panjang rata-rata lilitan stator dapat dihitung dengan:

$$L_{mtS} = 2\,.\,L + 2{,}3\,.\,\tau + 0{,}24$$

yang mana kisar kutub :

$$\tau = \frac{\pi\,.\,D}{p}$$

$$\tau = \frac{314\,.\,0{,}105}{6}$$

$$\tau = 0{,}05495\ m$$

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Sehingga,

$L_{mts} = 2 \,.\, 0{,}0851 + 2{,}3 \,.\, 005495 + 0{,}24$

$L_{mts} = 0{,}536585\ m$

5.2. Faktor Permukaan (*Filling Factor*)

Jumlah total konduktor dalam satu alur juga diperhitungkan nilai faktor permukaannya. Sebagaimana yang telah dirumuskan nilai faktor permukaan (f_{slot}) dengan:

$$f_{slot} = \frac{N_w . A_w}{A_{slot}}$$

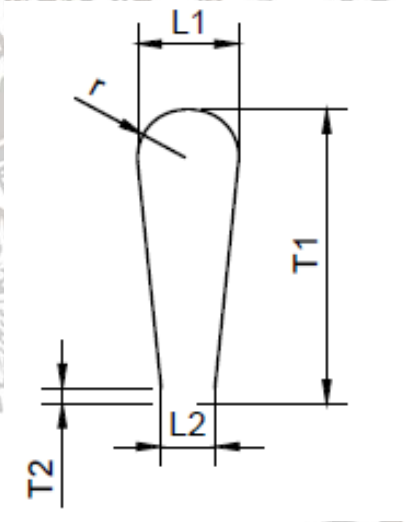
dimana,

N_w : Jumlah konduktor yang dapat menempati ruang alur

A_w : Luas konduktor (mm^2)

A_{slot} : Luas dimensi alur stator (mm^2)

5.2.1. Luas Dimensi Alur Stator



Gambar 5.6. Bentuk Alur Stator

Gambar 5.6 di atas merupakan bentuk alur stator, yang mana panjang sisi-sisinya sebagai berikut,

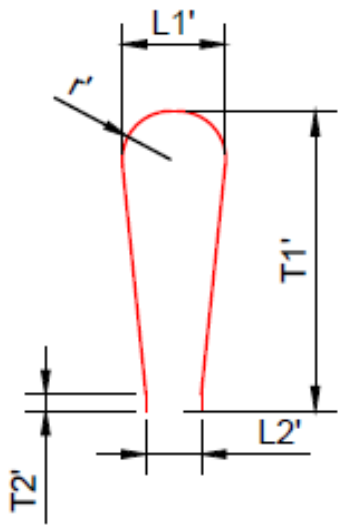
T_1 = 18,58 mm

T_2 = 1 mm

L_1 = 7,05 mm

L_2 = 3,4 mm

r = 3 mm



Gambar 5.7. Dimensi alur beserta lapisannya

Pada praktiknya luas alur yang digunakan sebagai tempat kumparan dikurangi dengan lapisan alurnya, sehingga luas alur yang dapat digunakan sebagai tempat konduktor dikurangi dengan tebal lapisan alur. Tebal lapisan alur yang digunakan sebesar 0,4 mm. Maka bentuk alur beserta lapisannya ditunjukkan seperti pada gambar 5.7.

Panjang dimensi sisi-sisi alur setelah dikurangi dengan tebal lapisan alur menjadi,

T'_1 = 17,58 mm

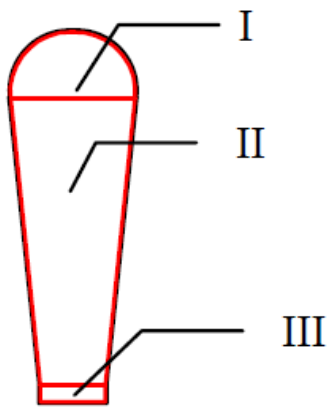
T_2' = 0,5 mm

L_1' = 6,05 mm

L_2' = 2,4 mm

r' = 2,5 mm

Perhitungan luas alur yang digunakan dilakukan dengan membagi dimensi alur menjadi tiga bagian, dimana ditunjukkan pada gambar 5.8 berikut.



Gambar 5.8. Tiga bagian luasan alur

Perhitungan luas masing-masing bagian alur, dapat dilakukan sebagai berikut,

$$A_I = \frac{1}{2}\, x\, (\pi\, .\, r'^2)$$

$$= \frac{1}{2}\, x\, (3{,}14\, .\, 2{,}5^2)$$

$$= 9{,}81 \text{ mm}^2$$

$$A_{II} = \frac{14{,}58}{2}\, x\, (6{,}05 + 2{,}4)$$

$$= 61{,}6005 \text{ mm}^2$$

$$A_{III} = 2{,}4\, x\, 0{,}5$$

$$= 1{,}2 \text{ mm}^2$$

Luas alur keseluruhannya adalah,

$$A_{slot} = A_I + A_{II} + A_{III}$$

$$= 9{,}81 + 61{,}6005 + 1{,}2$$

$$= 72{,}6105 \text{ mm}^2$$

5.2.2. Luas konduktor

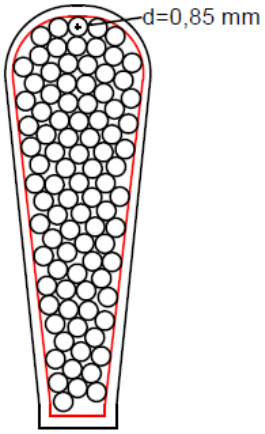
Diameter konduktor yang telah didapatkan dari perhitungan perancangan yaitu 1,277 mm. Untuk memudahkan pelilitan dan memaksimalkan ruang alur digunakan konduktor yang lebih kecil dimensinya, maka digunakan konduktor dengan diameter 0,85 mm yang dirangkap dua. Luas masing-masing konduktor sebesar A_w= 0,567 mm^2 .

5.2.3. Jumlah Konduktor dalam Alur

Untuk memperkirakan jumlah konduktor yang menempati ruang alur dalam penelitian ini menggunakan alat bantu perangkat lunak *AutoCad*. Pada pelaksanaannya selain luas konduktor dan luas alur juga diperhitungkan jarak antar konduktor dan jarak antara konduktor dengan lapisan alur (t_w). Lapisan alur menggunakan mika, sebagai kunci kumparan stator. Pada penelitian ini nilai t_w ditentukan sebesar 0,2 mm. Data tersebut dapat digunakan untuk menghitung nilai faktor permukaan masing-masing konfigurasi konduktor.

5.2.4. Faktor permukaan (f_{slot})

Jumlah total konduktor yang menempati alur berdasar perhitungan jumlah lilit sebanyak 92 dengan diameter 0,85 mm dimana seperti yang dilukiskan pada Gambar 5.9 berikut.



Gambar 5.9. Konfigurasi konduktor dalam ruang alur

Perhitungan nilai faktor permukaan konfigurasi konduktor A adalah sebagai berikut,

$$f_{slot} = \frac{N_w . A_w}{A_{slot}}$$

$$f_{slot} = \frac{92 \,.\, 0{,}567}{72{,}6105}$$

$$f_{slot} = 0{,}718$$

Pada konfigurasi ini diterapkan pada mesin dengan tipe belitan terbagi (Mesin A) dan terpusat terdistribusi (Mesin B).

5.3. Faktor distribusi kumparan

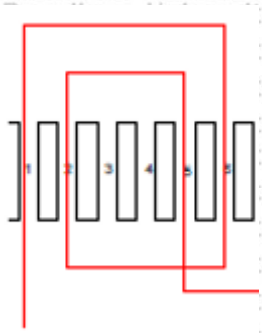
Faktor distribusi kumparan merupakan perkalian antara faktor kisar kumparan per kutub dengan jumlah lilit kumparan dan dibagi dengan total jumlah lilit kumparan tersebut (Sawhney,1990). Faktor distribusi kumparan kedua mesin pada Gambar 5.10 dan 5.11 di atas dapat diuraikan sebagai berikut.

a. Faktor distribusi kumparan mesin A

Kumparan mesin A mempunyai 6 alur per kutub maka faktor kisar masing-masing kumparannya adalah :

Faktor kisar kumparan (2-5) = sin (3/6) . 90° = 0,7071

Faktor kisar kumparan (1-6) = sin (5/6) . 90° = 0,9659



Gambar 5.10. Bentuk konfigurasi kumparan Mesin A

Maka nilai distribusi kumparannya,

$$K_w = \frac{(0{,}7071\,.\,T_{2-5}) + (0{,}9659\,.\,T_{1-6})}{T_{2-5} + T_{1-6}}$$

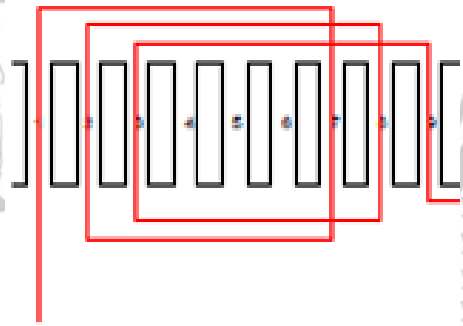
$$K_w = \frac{(0{,}7071\,.\,92) + (0{,}9659\,.\,46)}{92 + 46}$$

$$K_w = \frac{65{,}0532 + 44{,}4314}{138}$$

$$K_w = 0{,}79$$

b. Faktor distribusi kumparan mesin B

Kumparan mesin A mempunyai 6 alur per kutub maka faktor kisar masing-masing kumparannya adalah :



Gambar 5.11. Bentuk konfigurasi kumparan Mesin B

Faktor kisar kumparan (3-9) = sin (6/7) . 90° = 0,975

Faktor kisar kumparan (2-8) = sin (6/7) . 90° = 0,975

Faktor kisar kumparan (1-7) = sin (6/7) . 90° = 0,975

Maka nilai distribusi kumparannya,

$$K_w = \frac{(0{,}975\,.\,T_{3-9}) + (0{,}975\,.\,T_{2-8}) + (0{,}975\,.\,T_{1-7})}{T_{3-9} + T_{2-8} + T_{1-7}}$$

$$K_w = \frac{(0{,}975 \,.\, 92) + (0{,}975 \,.\, 92) + (0{,}975 \,.\, 92)}{92 + 92 + 92}$$

$$K_w = 0{,}975$$

5.4. Analisis Medan Magnet Menggunakan Metode Elemen Berhinga

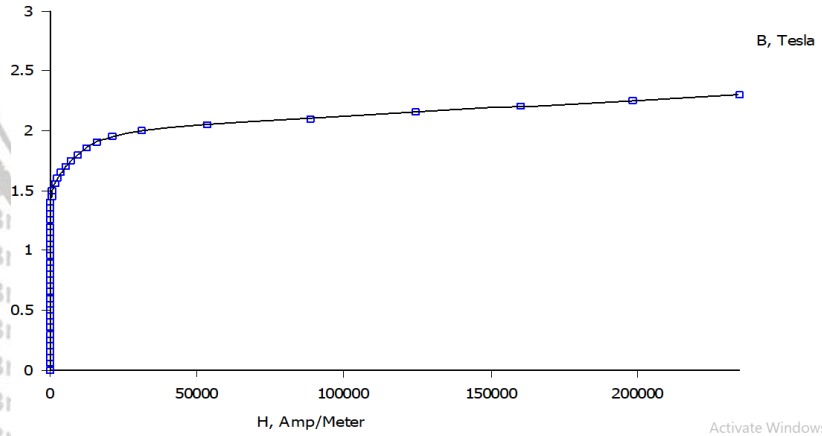
Simulasi dan analisis medan magnet menggunakan elemen berhingga bertujuan untuk mengetahui hasil unjuk kerja motor yang diteliti. Alat bantu yang digunakan adalah FEMM 4.2. Bahan material inti dan belitan, dimensi, serta kerapatan medan magnet pada celah udara menjadi variabel yang diperhitungkan untuk mengetahui besar daya motor.

a. Dimensi utama motor

Diameter (D) dan panjang (L) inti stator nilainya berhubungan dengan kapasitas motor. Pada penelitian ini besar diameter dan panjang inti stator masing-masing 105 mm dan 92 mm.

b. Bahan inti

Material laminasi inti pada motor yang disimulasikan menggunakan baja silikon. Kandungan silikon untuk menurunkan arus Eddy dan mengurangi histerisis karena volume resistivitasnya yang tinggi (Irasari Pudji, 2012). Material inti yang dipilih pada simulasi *finite element* adalah M-19 *Steel*. Karakteristik material bahan inti (M-19 *Steel*) dengan kerapatan magnet maksimal 2,3 Tesla ditunjukkan pada Gambar 5.12 di bawah.



Gambar 5.12. Kurva magnetik karakteristik material M-19 *Steel*

c. Material belitan stator

Koduktor kumparan yang mengisi ruang alur stator menggunakan bahan tembaga yang berbentuk circular. Pada simulasi menggunakan *American Wire Gauge* jenis 20 AWG yang mempunyai diameter 0,812 mm dengan jumlah lilit sebanyak 92.

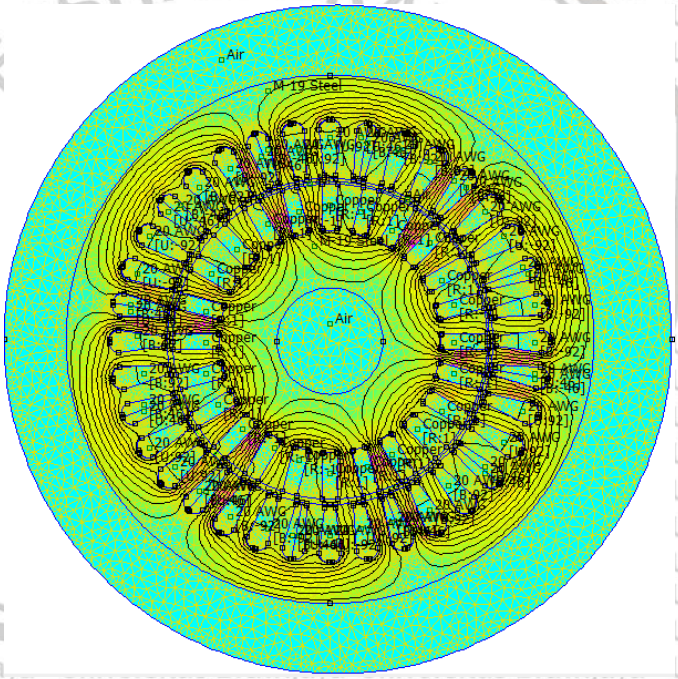
d. Material-material lain

Material yang harus ditentukan lainnya antara lain bagian celah udara dan batang konduktor rotor yang masing-masing menggunakan *Air* dan copper.

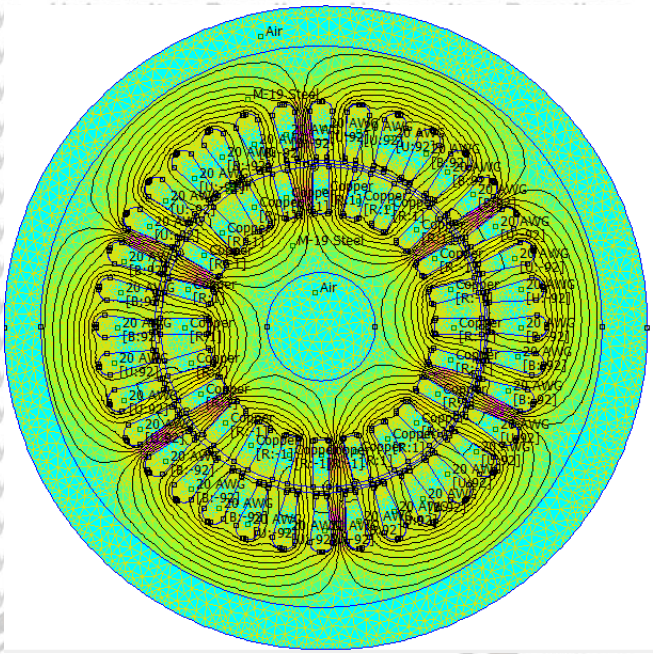
e. Arus tiap konduktor

Arus yang mengalir dalam konduktor kumparan stator yang sesuai dengan keadaan ideal ditentukan sebesar 2,5 A. Hal tersebut mengacu arus pada kondisi beban nominal.

Geometri melintang motor yang telah dibuat pada *AutoCad* di *import* pada program FEMM 4.2 kemudian diisi material yang telah ditentukan. Konfigurasi belitan yang digunakan sesuai dengan Gambar 5.2 dan 5.3. Distribusi medan magnet kedua motor yang dirancang digambarkan pada Gambar 5.13. dan 5.14 berikut.



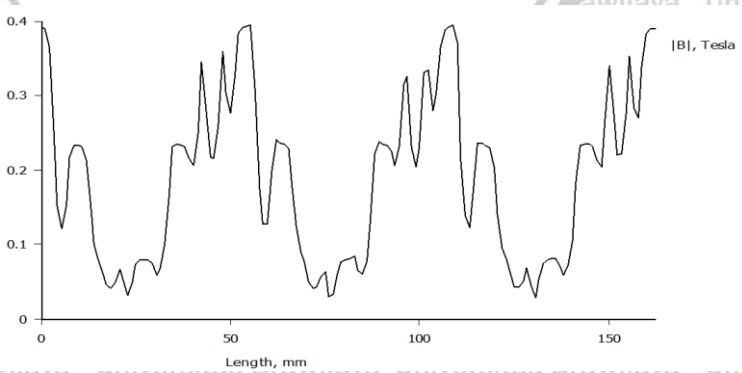
Gambar 5.13. Distribusi medan magnet Mesin A



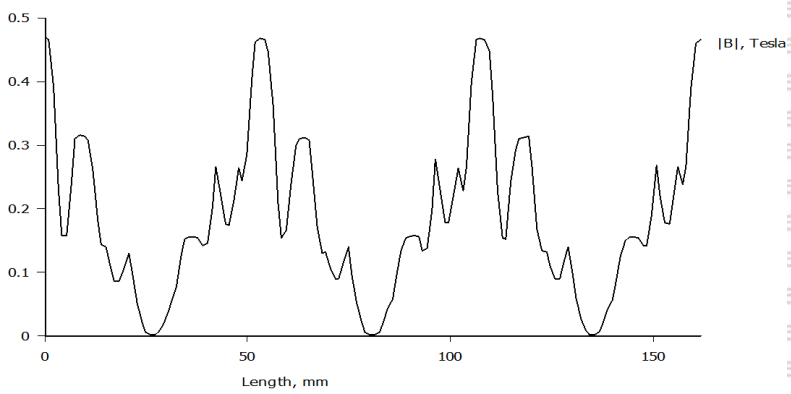
Gambar 5.14. Distribusi medan magnet Mesin B

Meshing yang dilakukan menghasilkan 87981 *Nodes* dan 175600 *Elements* pada Mesin A dan 89084 *Nodes* 177806 *Elements* pada Mesin B. Pola distribusi rapat fluks magnet yang tinggi terdapat pada sisi-sisi kutub. Selain itu kerapatan medan magnet Mesin B lebih merata dibanding Mesin A. Hal tersebut dikarenakan adanya dua kumparan yang berbeda arah arusnya dalam satu alur sehingga fluksnya saling menghilangkan.

Flukstuasi kerapatan medan magnet yang ada pada celah udara sebagai fungsi panjang kondisi batas yang ditentukan pada keadaan beban nominal ditunjukkan pada Gambar 5.15. dan 5.16. Besar nilai kerapatan medan magnet disubtitusikan pada persamaan untuk mendapatkan besar daya motor.



Gambar 5.15. Fluktuasi kerapatan fluks magnet pada celah udara Mesin A



Gambar 5.16. Fluktuasi kerapatan fluks magnet pada celah udara Mesin B

a. Kapasitas Daya Motor A

$$Q = C_0 . D^2 . L . n_s$$

$$C_0 = 11 . K_w . B_{av} . ac . 10^{-3}$$

$$ac = 2 . m . T_{ph} . I_{ph}$$

$$ac = 2 . 1 . 804 . 2{,}5$$

$$ac = 4020\ A/m$$

Faktor kumparan pada Mesin A sebesar 0,79

Nilai kerapatan fluks celah udara rata-rata B_{av} yang didapat dari FEMM 4.2 sebesar 0,21381 T.

$$C_0 = 11 . 0{,}79 . 0{,}21381 . 4020 . 10^{-3}$$

$$C_0 = 7{,}469$$

Nilai C_0 disubtitusikan ke dalam persamaan daya maka,

$$Q = C_0 . D^2 . L . n_s$$

$$Q = 7{,}469 . (0{,}105^2) . 0{,}92 . 16{,}667$$

$$Q = 1{,}262\ kVA$$

Sesuai yang terlihat pada Gambar 5.13 jumlah kutub sebanyak enam, sehingga ns = 1000 rpm atau 16,667 rps.

Daya input untuk Mesin A sebesar 1,262 kVA, dengan efisiensi dan faktor daya sebesar 0,7 dan 0,64 yang telah ditentukan sebelumnya maka daya keluaran Mesin A sebesar 565,68 W.

b. Kapasitas Daya Motor B

$$Q = C_0 . D^2 . L . n_s$$

$$C_0 = 11 . \frac{2}{\pi} . B_{av} . ac . 10^{-3}$$

$$ac = 2 . m . T_{ph} . I_{ph}$$

$$ac = 2 \,.\, 1 \,.\, 804 \,.\, 2{,}5$$

$$ac = 4020 \; A/m$$

Faktor kumparan pada Mesin B sebesar 0,975

Nilai kerapatan fluks celah udara rata-rata B_{av} yang didapat dari FEMM 4.2 sebesar 0,221493 T.

$$C_0 = 11.\, 0{,}221493 \,.\, 4020 \,.\, 0{,}975 \,.\, 10^{-3}$$

$$C_0 = 7{,}7376$$

Nilai C_0 disubtitusikan ke dalam persamaan daya maka,

$$Q = C_0 . D^2 . L \,.\, n_s$$

$$Q = 7{,}7376 \,.\, (0{,}105^2) . 0{,}92 \,.\, 16{,}667$$

$$Q = 1{,}308 \; kVA$$

Sesuai yang terlihat pada Gambar 5.14 jumlah kutub sebanyak enam, sehingga ns = 1000 rpm atau 16,667 rps.

Daya input untuk Mesin B sebesar 1,308 kVA, dengan efisiensi dan faktor daya sebesar 0,7 dan 0,64 yang telah ditentukan sebelumnya maka daya keluaran Mesin B sebesar 586,0136 W.

BAB VI
ANALISIS DAN PEMBAHASAN

6.1. Data Hasil Pengujian

Pengujian-pengujian yang dilakukan untuk mendapatkan parameter kumparan motor induksi didapat melalui pengujian tanpa beban, pengujian DC, dan pengujian rotor ditahan (*block rotor*). Motor induksi yang digunakan sebagai objek penelitian terdiri dari dua motor antara lain mesin A dan mesin B yang diuji dengan cara yang sama. Adapun hasil pengujian ditunjukkan pada tabel di bawah.

Tabel 6.1. Hasil pengujian mesin A dan mesin B

	MESIN A		MESIN B	
	Kumparan Utama	Kumparan Bantu	Kumparan Utama	Kumparan Bantu
R_{DC} (Ω)	3,08	3,12	3,1	3,14
R_{NL} (Ω)	9,61	9,61	6,8	6,88
X_{NL} (Ω)	42,05	42,05	41,64	41,83
Z_{NL} (Ω)	43,14	43,14	42,2	42,2
R_{BR} (Ω)	6	6	6	6,16
X_{BR} (Ω)	11,42	11,08	11,96	11,58
Z_{BR} (Ω)	12,9	12,6	13,38	13,12

Pada tahap pengujian sebagai jalan untuk mendapatkan nilai parameter tegangan dan arus yang diterapkan berbeda-beda sesuai dengan pengujiannya serta rangkaian pengujian yang telah diuraikan pada Lampiran I. Pengujian DC yang digunakan sebagai acuan adalah arusnya yakni hingga arus sebesar 5 ampere DC. Sebagaimana pengujian DC pengujian rotor ditahan arus yang diterapkan sebesar 5 ampere AC. Sedangkan pengujian tanpa beban yang digunakan adalah arus yang diterapkan sebesar 5 ampere AC. Alat ukur yang digunakan dalam pengujian ini, digunakan alat ukur yang mempunyai tingkat ketelitian dibawah 1%.

Alat ukur tegangan menggunakan volt-meter YOKOGAWA dengan tingkat ketelitian sebesar 0,5%. Alat ukur arus menggunakan ampere-meter YOKOGAWA dengan tingkat ketelitian sebesar 0,5%. Sedagkan alat ukur daya menggunakan watt-meter YEW dengan tingkat ketelitian sebesar 0,5%.

6.2. Parameter Motor Induksi

Pengujian-pengujian yang telah dilakukan sebelumnya digunakan untuk mendapatkan nilai parameter motor induksi yang digunakan dalam penelitian ini. Nilai-nilai parameter motor induksi didapatkan melalui perhitungan yang sebagaimana telah dituliskan pada BAB II. Nilai-nilai parameter motor induksi yang didapatkan dari penelitian dituliskan pada Tabel 6.2 di bawah.

Tabel 6.2. Nilai parameter mesin A dan mesin B

	MESIN A		MESIN B	
	Kumparan Utama	Kumparan Bantu	Kumparan Utama	Kumparan Bantu
R_1 (Ω)	3,08	3,12	3,1	3,14
X_1 (Ω)	5,71	5,54	5,98	5,79
R_C (Ω)	2,92	2,88	3,7	3,74
X_m (Ω)	36,34	36,51	35,66	36,05
R_2 (Ω)	3,91	3,82	5,04	5,04
X_2 (Ω)	5,71	5,54	5,98	5,79

Susunan belitan pada kedua mesin memberikan perbedaan nilai parameter. Hal ini dikarenakan dalam setiap satu pasang kutub pada masing-masing tipe belitan memiliki bentuk belitan yang berbeda. Perbedaan tersebut terletak pada jarak antara sisi kumparan untuk setiap kutubnya. Pada mesin A terdapat dua belitan yang mempunyai jarak sisi kumparan yang berbeda antara lain sebesar lima dan tiga alur untuk setiap kutubnya. Sedangkan pada mesin B mempunyai jarak sisi kumparan yang sama setiap belitannya yakni enam alur untuk setiap kutubnya. Jarak sisi kumparan tersebut membuat nilai induktansi kedua mesin berbeda. Karena pada mesin A satu kutubnya terdapat dua kumparan yang tersusun secara paralel dalam satu inti, sedangkan pada mesin B dalam satu kutubnya tersusun tiga kumparan yang tersusun secara seri. Oleh sebab itu nilai reaktansi pada mesin

A nilainya lebih kecil dibandingkan reaktansi mesin B. Hal ini mengakibatkan nilai sudut impedansi mesin berbeda.

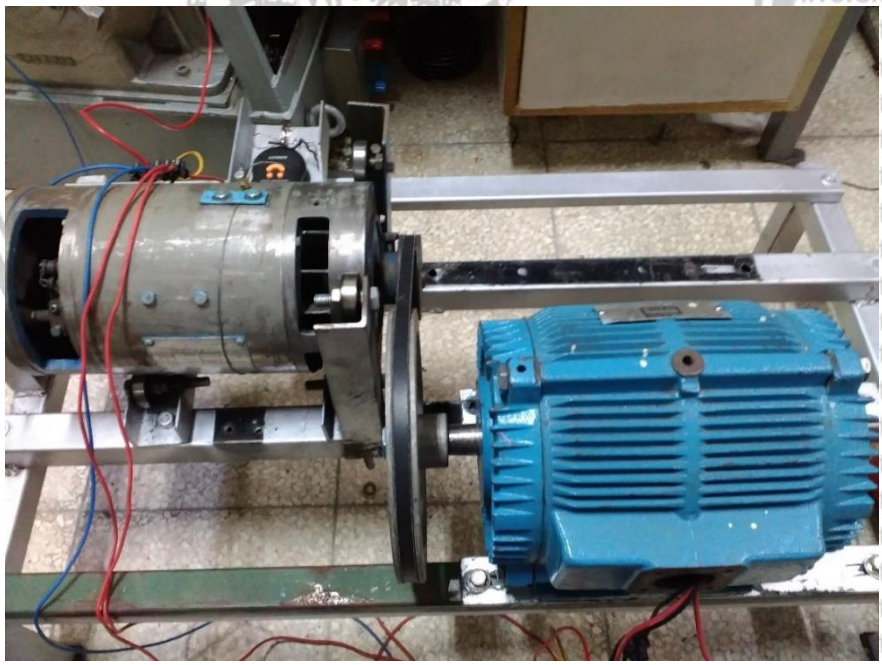
Nilai-nilai parameter motor yang ditunjukkan pada Tabel 6.2 digunakan sebagai variabel untuk mengetahui besar daya motor. Menggunakan persamaan yang telah ditulis pada BAB II maka didapatkan daya keluaran dan torsi motor yang ditulis pada Tabel 6.3 berikut,

Tabel 6.3 Daya *output* dan torsi motor

	Mesin A	Mesin B
Daya keluaran (W)	535,858	546,596
Torsi (Nm)	5,12	5,22

6.3. Hasil Pengujian Berbeban

Pengujian berbeban dilakukan untuk mengetahui unjuk kerja motor induksi setelah dilakukan modifikasi belitan. Dalam praktiknya motor induksi dibebani mekanik dengan generator DC yang dibebani dengan beban resistif. Transmisi mekanik antara motor dan generator menggunakan transmisi *pulley-belt* seperti digambarkan pada gambar 6.1 di bawah.



Gambar 6.1. Motor induksi yang dibebani dengan generator DC

Adapun langkah-langkah yang dilakukan pada pengujian berbeban yaitu menaikkan arus motor induksi secara bertahap. Hal tersebut dilakukan dengan cara menaikkan arus yang

mengalir pada beban (generator DC). Langkah tersebut dilakukan hingga motor induksi mencapai pada arus nominalnya. Kemudian nilai hasil pengujian berbeban yang terukur pada alat ukur dicatat sebagaimana dituliskan pada tabel lampiran 2.

Daya *output* mekanik dan torsi motor pada kondisi berbeban jika dibandingkan dengan hasil perhitungan nilainya cenderung lebih kecil. Hal ini disebabkan adanya rugi-rugi mekanik pada transmisi mekanik (*pulley-belt*) antara motor dengan beban.

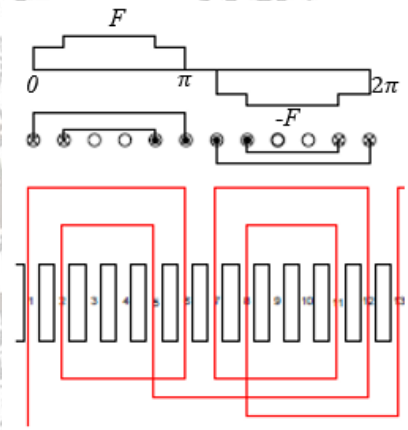
6.4. Analisa Perbandingan Unjuk Kerja Motor

6.4.1. MMF Kumparan

Distribusi MMF yang dihasilkan belitan stator motor induksi didapatkan dari perkalian antara jumlah lilit dengan arus yang mengalir dalam belitan tersebut,

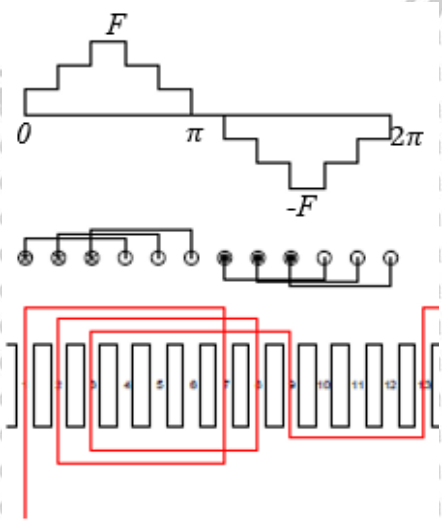
$$F = Ni$$

a. Mesin A (Tipe belitan terbagi)



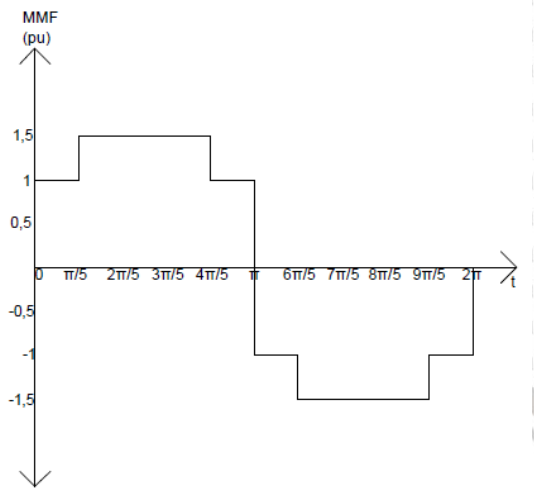
Gambar 6.2. Bentuk MMF dari tipe belitan terbagi (*screw*) mesin A

b. Mesin B (Tipe belitan terpusat terdistribusi)



Gambar 6.3. Bentuk MMF dari tipe belitan terpusat (terdistribusi) mesin B

Dari kedua bentuk distribusi MMF yang dihasilkan oleh masing-masing kumparan dapat ditunjukkan bahwa distribusi MMF kumparan mesin B lebih baik dibandingkan dengan mesin A. Dalam hal ini bentuk MMF kumparan mesin A memiliki lebih banyak komponen harmonisanya. Hal ini dibuktikan dengan analisis menggunakan deret Fourier berikut. Gambar 6.4 dan 6.5 masing-masing menunjukkan bentuk distribusi MMF kumparan Mesin A dan Mesin B.



Gambar 6.4. Distribusi MMF kumparan Mesin A

Fungsi bentuk gelombang di atas untuk selang waktu $0 \leq t \leq 2\pi$, dapat ditulis sebagai,

$$f(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq \frac{\pi}{5} \\ 1{,}5 & \frac{\pi}{5} \leq t \leq \frac{4\pi}{5} \\ 1 & \frac{4\pi}{5} \leq t \leq \pi \\ -1 & \pi \leq t \leq \frac{6\pi}{5} \\ -1{,}5 & \frac{6\pi}{5} \leq t \leq \frac{9\pi}{5} \\ -1 & \frac{9\pi}{5} \leq t \leq 2\pi \end{cases}$$

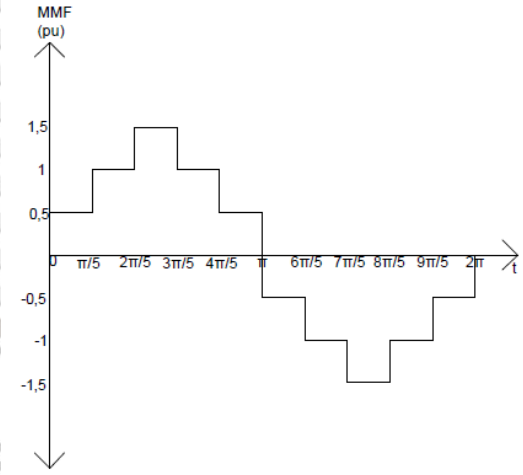
$$f(t + 2\pi) = f(t)$$

Fungsi f(t) diatas simetri terhadap terhadap titik asalnya, sehingga koefisien Fouriernya dapat dituliskan sebagai berikut,

$$b_n = \frac{2}{\pi}\int_0^{\frac{\pi}{5}} 1 \sin nt\, dt + \frac{2}{\pi}\int_{\frac{\pi}{5}}^{\frac{4\pi}{5}} 1{,}5 \sin nt\, dt + \frac{2}{\pi}\int_{\frac{4\pi}{5}}^{\pi} 1 \sin nt\, dt$$

$$b_n = \frac{(\cos\frac{n\,\pi}{5}) - (\cos\frac{4n\,\pi}{5}) - 2\cos(n\pi) + 2}{n\,\pi}$$

$$f(t) = \left(\frac{(\cos\frac{n\,\pi}{5}) - (\cos\frac{4n\,\pi}{5}) - 2\cos(n\pi) + 2}{n\,\pi}\right)\sin nt$$



Gambar 6.5. Distribusi MMF kumparan Mesin B

Fungsi bentuk gelombang di atas untuk selang waktu $0 \le t \le 2\pi$, dapat ditulis sebagai,

$$f(t) = \begin{cases} 0{,}5 & 0 \le t \le \frac{\pi}{5} \\ 1 & \frac{\pi}{5} \le t \le \frac{2\pi}{5} \\ 1{,}5 & \frac{2\pi}{5} \le t \le \frac{3\pi}{5} \\ 1 & \frac{3\pi}{5} \le t \le \frac{4\pi}{5} \\ 0{,}5 & \frac{4\pi}{5} \le t \le \pi \\ -0{,}5 & \pi \le t \le \frac{6\pi}{5} \\ -1 & \frac{6\pi}{5} \le t \le \frac{7\pi}{5} \\ -1{,}5 & \frac{7\pi}{5} \le t \le \frac{8\pi}{5} \\ -1 & \frac{8\pi}{5} \le t \le \frac{9\pi}{5} \\ -0{,}5 & \frac{9\pi}{5} \le t \le 2\pi \end{cases}$$

$$f(t + 2\pi) = f(t)$$

Fungsi f(t) di atas simetri terhadap terhadap titik asalnya, d koefisien Fouriernya dapat dituliskan sebagai berikut,

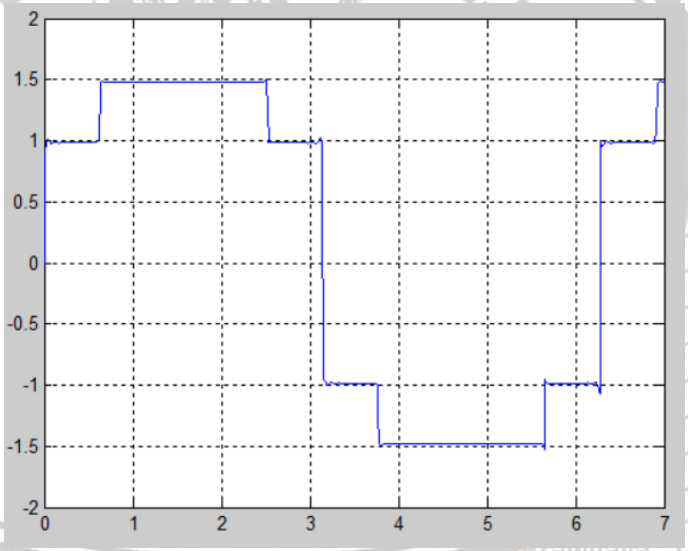
$$b_n = \frac{2}{\pi}\int_0^{\frac{\pi}{5}} 0{,}5 \sin nt\, dt + \frac{2}{\pi}\int_{\frac{\pi}{5}}^{\frac{2\pi}{5}} 1 \sin nt\, dt$$

$$+\frac{2}{\pi}\int_{\frac{2\pi}{5}}^{\frac{3\pi}{5}} 1{,}5 \sin nt\, dt + \frac{2}{\pi}\int_{\frac{3\pi}{5}}^{\frac{4\pi}{5}} 1 \sin nt\, dt + \frac{2}{\pi}\int_{\frac{4\pi}{5}}^{\pi} 0{,}5 \sin nt\, dt$$

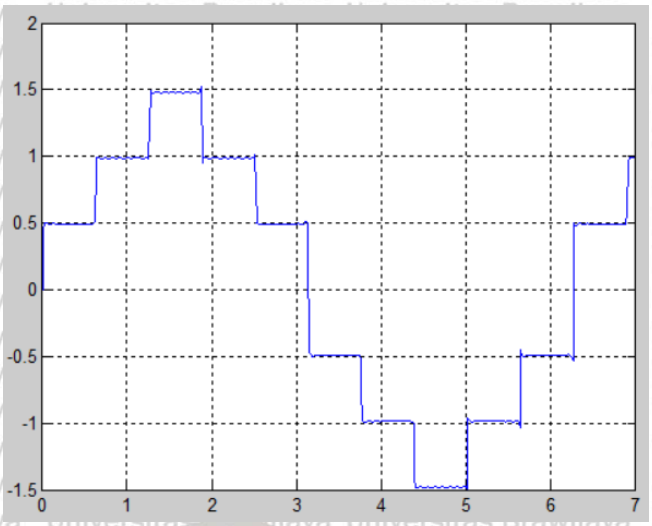
$$b_n = \frac{\cos\left(\frac{2n\pi}{5}\right) + \cos\left(\frac{n\pi}{5}\right) - \cos\left(\frac{3n\pi}{5}\right) - \cos\left(\frac{4n\pi}{5}\right) - \cos(n\pi) + 1}{n\,\pi}$$

$$f(t) = \left(\frac{\cos\left(\frac{2n\pi}{5}\right) + \cos\left(\frac{n\pi}{5}\right) - \cos\left(\frac{3n\pi}{5}\right) - \cos\left(\frac{4n\pi}{5}\right) - \cos(n\pi) + 1}{n\,\pi}\right) \sin nt$$

Koefisien Fourier Mesin A dan Mesin B diatas jika dituliskan pada program MATLAB didapatkan gambar grafik seperti ditunjukkan pada Gambar 6.6 dan 6.7 berikut.



Gambar 6.6. Penjumlahan 700 suku pertama dari fungsi f(t) Mesin A



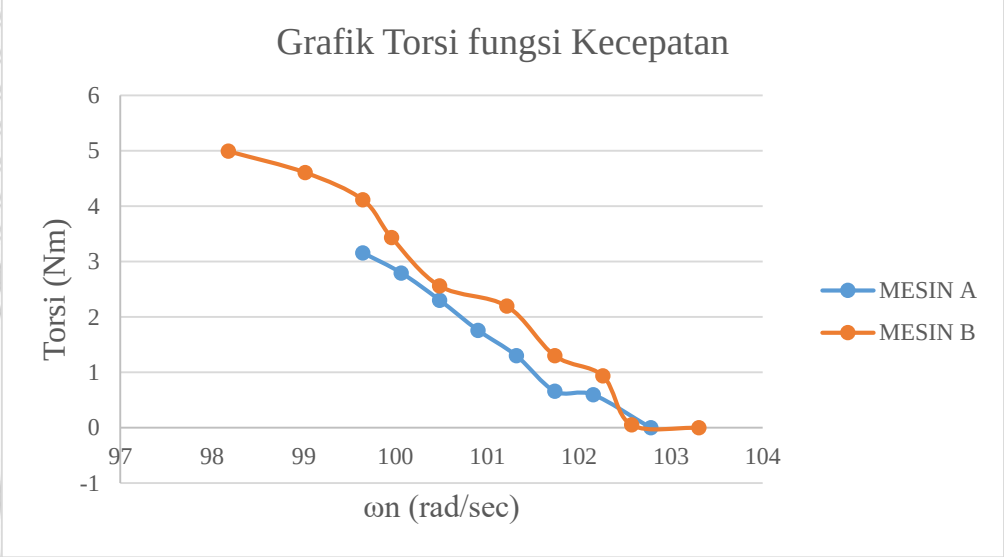
Gambar 6.7. Penjumlahan 700 suku pertama dari fungsi f(t) Mesin B

Susunan belitan pada inti stator mesin B lebih terdistribusi dibandingkan dengan susunan belitan pada mesin A. Hal ini mengakibatkan bentuk distribusi MMF belitan stator mesin B lebih baik jika dibandingkan dengan distribusi MMF belitan stator mesin A. Dikarenakan komponen harmonisa dapat turun jika belitan terdistribusi diseluruh alur (Sen P. C., 1997). Dari bentuk distribusi MMF belitan dapat diuraikan menjadi gelombang sinusoida fundamental dan komponen harmonisa. Bentuk distribusi MMF mesin A, jika digambarkan akan mempunyai lebih banyak komponen harmonisa dibanding dengan mesin B seperti yang diuraikan pada Tabel 6.4 di bawah. Dalam hal amplitudo komponen harmonisa MMF kumparan Mesin B lebih kecil dibandingkan Mesin A.

Tabel 6.4. Hasil Perhitungan koefisien MMF fundamental kumparan Mesin A dan Mesin B

b_n	MESIN A	MESIN B	b_n	MESIN A	MESIN B
b_1	1,788	1,34	b_{25}	0,025	0,025
b_3	0,358	-0,025	b_{27}	0,039	-0,0027
b_5	0,1273	0,127	b_{29}	0,061	0,046
b_7	0,1537	-0,0107	b_{31}	0,057	0,043
b_9	0,198	0,149	b_{33}	0,03	-0,0022
b_{11}	0,162	0,122	b_{35}	0,018	0,018
b_{13}	0,082	-0,0057	b_{37}	0,029	-0,002
b_{15}	0,042	0,04	b_{39}	0,045	0,034
b_{17}	0,06	-0,004	b_{41}	0,043	0,032
b_{19}	0,09	0,071	b_{43}	0,025	-0,0017
b_{21}	0,08	0,064	b_{45}	0,014	0,014
b_{23}	0,04	-0,003	b_{47}	0,022	-0,0016

Bentuk distribusi MMF kumparan stator mesin B menghasilkan torsi yang lebih baik disebabkan bentuk distribusi MMF kumparan stator mesin B memiliki komponen harmonisa yang lebih kecil dibanding distribusi MMF kumparan stator dari mesin A. Hal ini dibuktikan dengan pengujian motor berbeban, ketika kedua motor dibebani dengan beban yang sama hingga mencapai kecepatan sudut sekitar 99-100 *rad/sec* mesin B menghasilkan torsi sebesar 4,608 Nm dan mesin A menghasilkan torsi sebesar 3,37 Nm. Setelah itu ketika beban ditambah Mesin B memiliki torsi sebesar 4,992 Nm sedangkan Mesin A sudah tidak bisa bekerja optimal. Gambar 6.8. menunjukkan grafik torsi fungsi kecepatan di bawah.

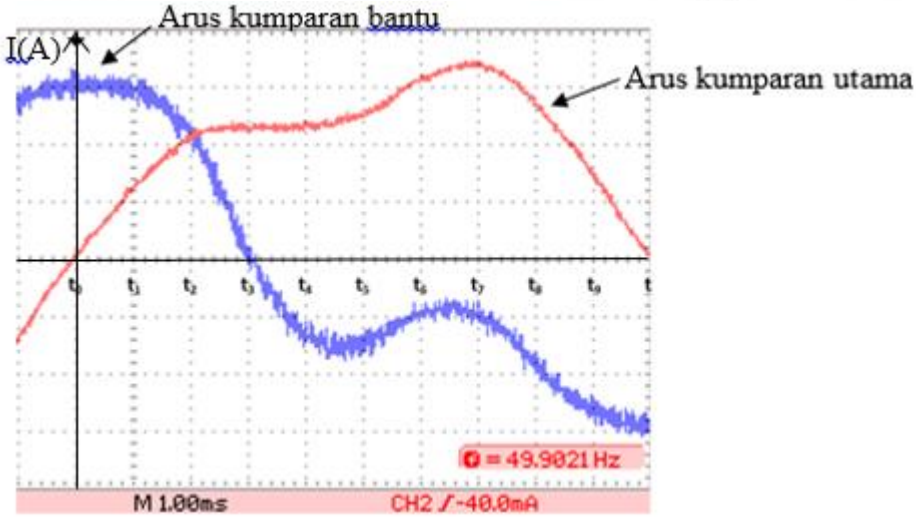


Gambar 6.8. Perbandingan nilai torsi mesin A dan B

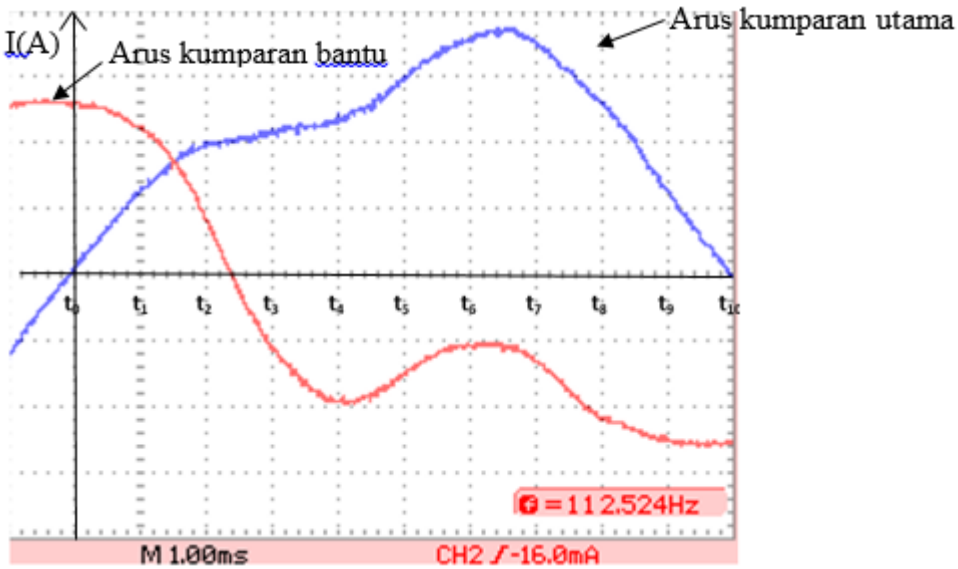
Besar torsi yang dihasilkan oleh motor juga dipengaruhi oleh banyaknya komponen harmonisa pada kerapatan fluksi magnetik pada celah udara. Komponen harmonisa fluks magnet pada celah udara menghasilkan torsi parasit yang menyebabkan gaya pada rotor tidak terkompensasi (Kindl V., 2014). Bentuk keraparatan fluks celah udara yang diambil dari simulasi FEMM 4.2 yang ditunjukkan pada gambar 5.8 dan 5.9, dimana mesin A memiliki komponen harmonisa yang lebih banyak dibanding mesin B.

Bentuk distribusi MMF/kerapatan fluks direprsentasikan dengan bentuk gelombang arus yang ditampilkan oleh osiloskop seperti yang ditunjukkan pada gambar 6.9 dan 6.10. Kerapatan fluks tersebut terletak pada celah udara yang dihasilkan oleh masing-masing belitan stator dari kedua mesin dengan nilai induktansi tetap. Bagian puncak dari gelombang arus kumparan utama mesin B lebih curam dibandingkan bentuk gelombang arus dari mesin A yang lebih landai seperti yang digambarkan pada gambar 6.7 dan 6.8 dibawah ketika t_4

hingga t_7. Hal ini dikarenakan bentuk distribusi MMF yang sesuai dengan masing-masing tipe belitan. Bentuk distribusi MMF mesin B lebih tajam dibanding mesin A. Selain itu bentuk gelombang arus juga dipengaruhi oleh komponen impedansi dari belitan masing-masing mesin yang mengakibatkan cacat gelombang.



Gambar 6.9. Bentuk gelombang arus kumparan utama mesin A

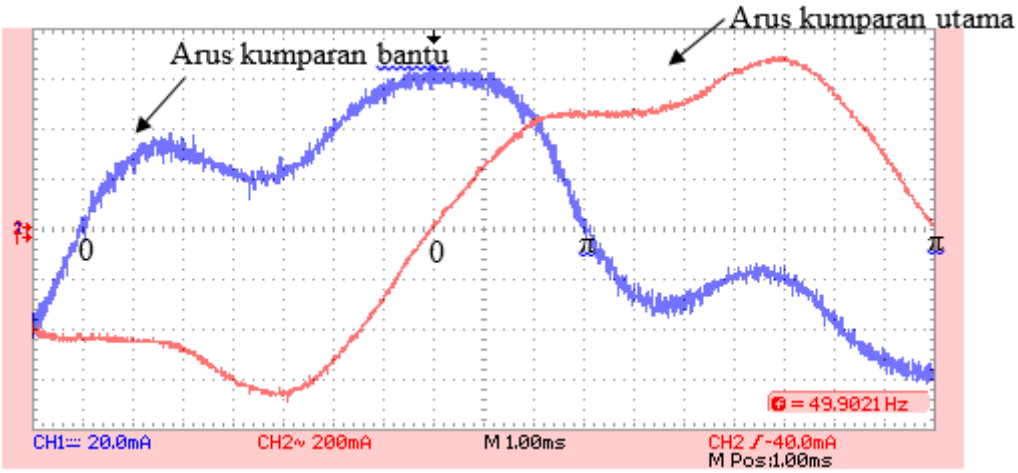


Gambar 6.10. Bentuk gelombang arus kumparan utama mesin B

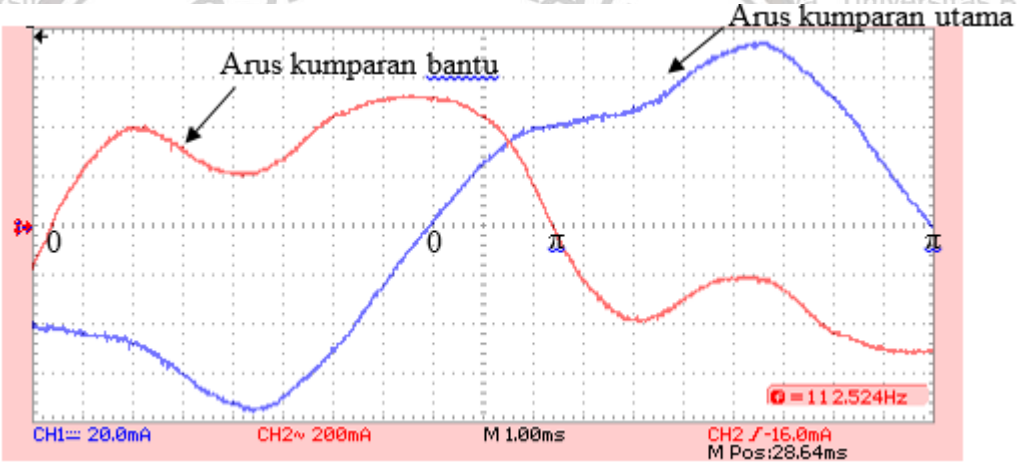
6.4.2. Analisa gelombang arus

Beda sudut fasa antara arus kumparan utama dan kumparan bantu saat kondisi tanpa beban dilukiskan pada Gambar 6.11 dan 6.12 dimana gambar tersebut merupakan perluasan

dari Gambar 6.9 dan 6.10. Perbedaan sudut fasa pada keadaan tanpa beban belum mencapai 90°.

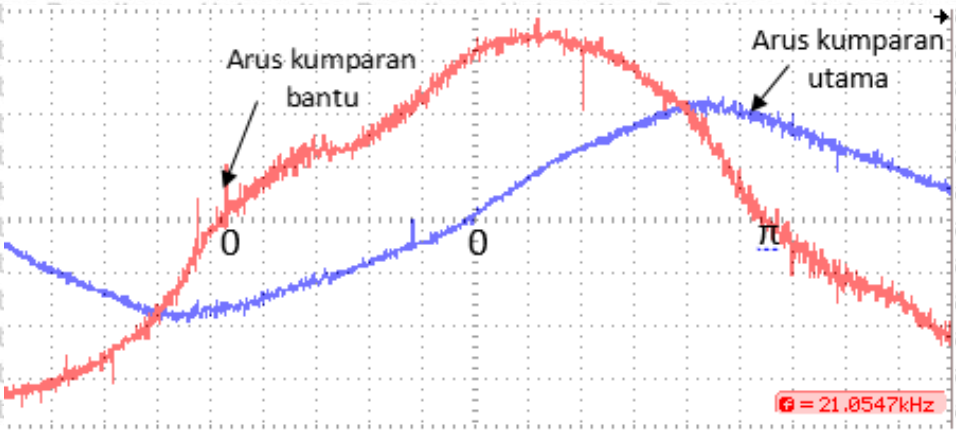


Gambar 6.11. Gelombang arus kumparan utama dan bantu Mesin A (tanpa beban)

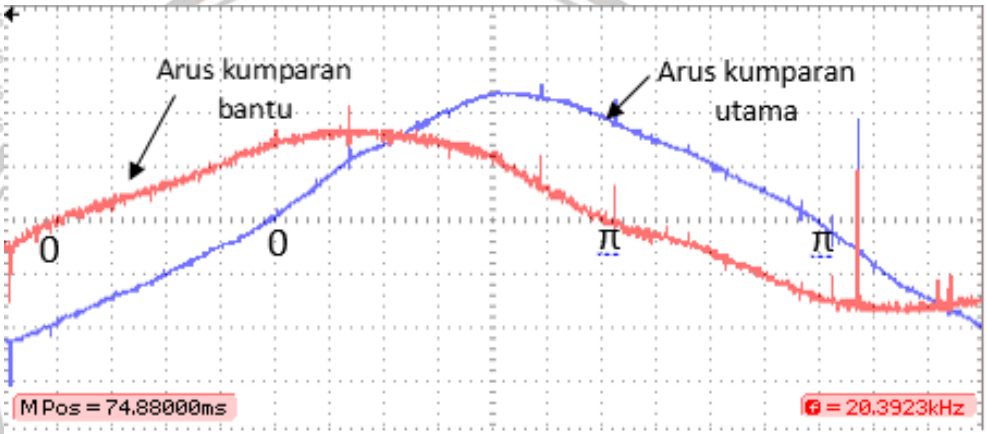


Gambar 6.12. Gelombang arus kumparan utama dan bantu Mesin B (tanpa beban)

Ketika kondisi beban mendekati nominal terlihat perbedaan pada masing-masing motor seperti yang digambarkan pada Gambar 6.13 dan 6.14. Mesin A mempunyai beda sudut fasa yang cukup baik yakni mendekati 90°, dalam hal ini terlihat pada gelombang yang direkam melalui osiloskop. Selain itu arus yang mengalir pada kedua kumparan nilainya hampir sama. Jika dibandingkan dengan mesin B, mesin A daya keluaran yang dihasilkan dari masing-masing kumparan adalah relatif sama besarnya.



Gambar 6.13. Gelombang arus kumparan utama dan bantu Mesin A (mendekati beban nominal)



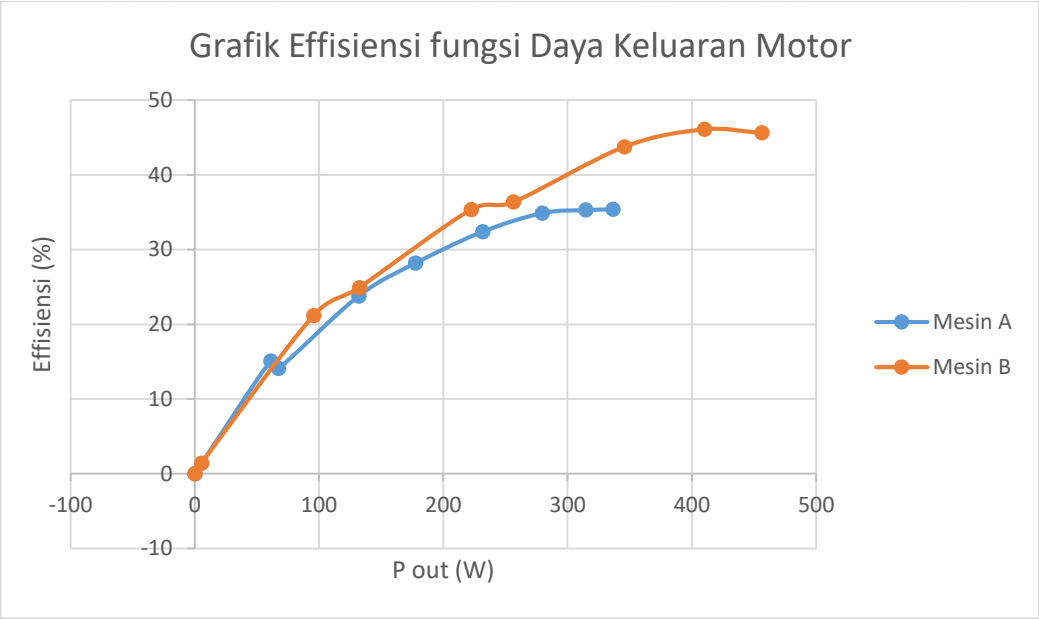
Gambar 6.14. Gelombang arus kumparan utama dan bantu Mesin B (mendekati beban nominal)

Mesin B ketika pada keadaan beban nominal torsinya relatif lebih baik dibandingkan dengan mesin A. Hal ini karena kerapatan fluks yang diinduksikan pada mesin B cukup baik. Sebagaimana terlihat pada simulasi dengan menggunakan metode elemen berhingga, kerapatan fluks pada celah udara yang dihasilkan oleh kumparan stator mesin B lebih tinggi dibandingkan dengan mesin A. Adanya alur stator yang diisi oleh dua sisi kumparan dari kumparan utama dan bantu yang mana arah arusnya berlawanan menjadi penyebab kurang baiknya nilai kerapatan fluks pada mesin A.

6.4.3. Performa Motor Induksi

Hasil dari pengujian berbeban dapat diketahui unjuk kerja dari masing-masing motor. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.15 di bawah yang merupakan perbandingan

antara daya keluaran dan efisiensi. Ketika diberikan beban yang besarnya sama hingga beban mendekati nominal, mesin B memiliki kelebihan dalam hal efisiensi. Hal ini dikarenakan bentuk tipe belitan terpusat terdistribusi pada mesin B memberikan bentuk MMF yang lebih sedikit harmonisanya dibanding mesin A yang mempengaruhi torsi dan daya keluaran motor.



Gambar 6.15. Grafik perbandingan daya keluaran dan efisiensi

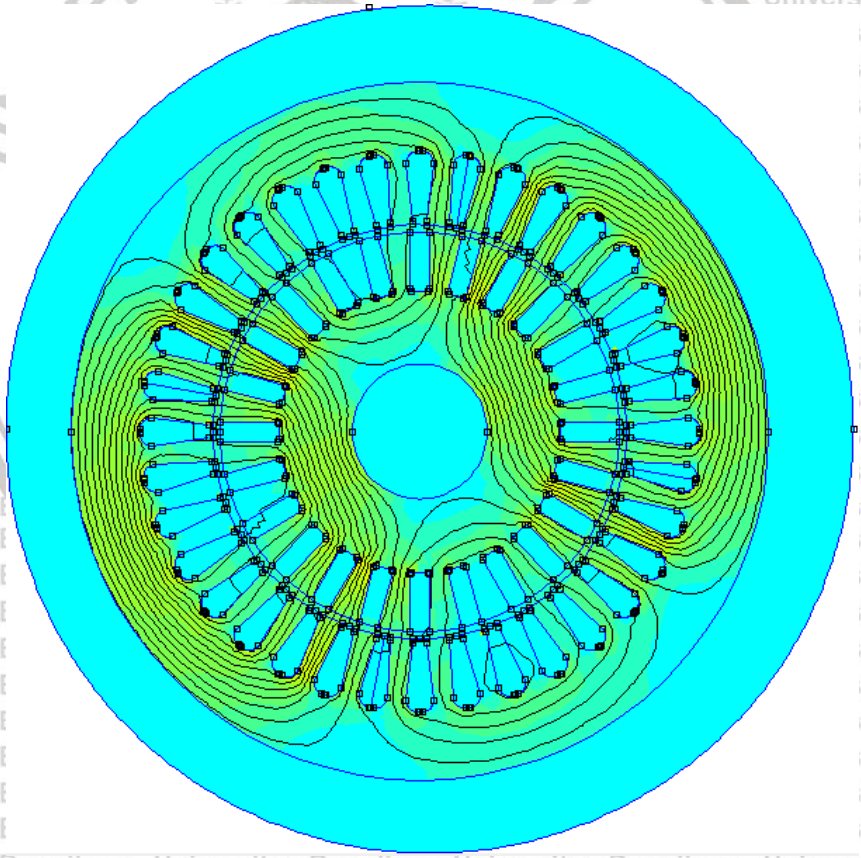
Sesuai dengan tujuan pada penelitian ini, yakni motor induksi diaplikasikan untuk penggerak transportasi listrik. Dalam hal ini mesin A memberikan beberapa keuntungan. Ketika pada kondisi nominal arus pada masing-masing kumparan nilainya hampir setimbang. Hal ini karena beda sudut antara arus kumparan utama dan kumparan bantu mendekati 90°. Kondisi tersebut sangat dibutuhkan karena akan mudah untuk mendapatkan nilai torsi yang dibutuhkan agar konsumsi energi menjadi efisien. Namun di sisi lain mesin A masih kalah dengan mesin B dalam hal daya dan torsinya. Hal ini dikarenakan susunan belitan mesin A kurang terdistribusi dibanding mesin B.

6.4.4. Perbandingan Motor Hasil Modifikasi dengan Motor Induksi Satu Fasa Standart

Motor induksi hasil modifikasi memiliki perbedaan konfigurasi kumparan dengan motor induksi standart pada umumnya. Perbedaan tersebut terletak pada perbandingan antara jumlah kumparan utama dan kumparan bantu. Umumnya motor induksi standart mempunyai kumparan utama dua per tiga dari total keseluruhan jumlah kumparan, dan sepertiga sisanya adalah kumparan bantu (Sawhney, 1970 : 694). Kumparan bantu akan terlepas ketika putaran

hampir mendekati sinkron, sehingga daya yang dihasilkan motor tinggal sepertiga karena hanya kumparan utama yang bekerja. Pada penelitian ini kedua kumparan motor induksi satu fasa memiliki jumlah yang sama agar daya yang dihasilkan kedua kumparan sama besarnya.

Motor induksi hasil modifikasi memiliki distribusi medan yang lebih merata dibandingkan dengan motor induksi standart. Motor induksi standart memiliki kerapatan fluks yang berbeda karena jumlah kumparan utama dan bantu berbeda. Hasil simulasi FEMM 4.2 dari motor induksi standart dengan 4 kutub dengan konfigurasi kumparan seperti pada Gambar 5.1 menunjukkan tidak meratanya distribusi medan yang dihasilkan kumparan seperti ditunjukkan pada Gambar 6.16 di bawah dibandingkan distribusi medan pada motor hasil modifikasi pada Gambar 5.13 dan 5.14 yang lebih merata. Meratanya distribusi medan pada motor hasil modifikasi menunjukkan daya yang dihasilkan kedua kumparan sama besarnya. Hal ini sesuai dengan tujuan penelitian dimana motor hasil modifikasi dapat diatur torsinya melalui pengaturan daya yang dihasilkan kumparan.



Gambar 6.16. Distribusi medan magnet Motor standart 4 kutub

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

BAB VII
KESIMPULAN DAN SARAN

7.1. Kesimpulan

Hasil perbandingan unjuk kerja motor induksi dengan dua tipe belitan yang berbeda dapat disimpulkan bahwa Mesin B dengan tipe belitan terpusat-terdistribusi memiliki kelebihan unjuk kerja dibanding dengan Mesin A dengan tipe belitan terbagi-*screw*. Faktor-faktor yang menyebabkan diantaranya:

1. Konfigurasi kumparan Mesin B lebih terdistribusi dibanding Mesin A, akibatnya MMF yang dihasilkan Mesin A memiliki lebih banyak komponen harmonisa. Komponen harmonisa menghasilkan torsi parasit yang menyebabkan gaya rotor tidak terkompensasi.
2. Adanya enam alur yang terisi dua kumparan yang berbeda dengan arah arus yang berlawanan menyebabkan fluksnya saling menghilangkan, sehingga distribusi fluks yang dihasilkan kumparan stator Mesin A tidak merata. Hal ini dibuktikan dari hasil analisis medan magnet dengan metode elemen berhingga. Oleh karena itu kerapatan fluksi pada celah udara Mesin A lebih rendah dibanding Mesin B. Oleh karena itu daya dan torsi Mesin B lebih tinggi dibanding Mesin A.

7.2. Saran

Penelitian studi konfigurasi kumparan motor induksi satu fasa yang telah dilakukan masih banyak bagian-bagian yang menjadi perhatian khusus agar mendapatkan hasil yang diinginkan. Bagian-bagian yang perlu diperhatikan yaitu:

1. Konfigurasi kumparan stator terdistribusi di seluruh alur stator dan menghindari adanya dua sisi kumparan dalam satu alur dengan arah arus yang berlawanan.
2. Konfigurasi konduktor kumparan dengan merangkap beberapa konduktor yang lebih kecil dari ukuran yang dikehendaki, agar jumlah lilit menjadi lebih banyak. Hal ini bertujuan untuk mendapatkan sudut impedansi kumparan yang ideal sebesar 45°.
3. Rugi-rugi yang dihasilkan motor perlu dikaji lebih mendalam pada penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

Abhisek Pal dan Sukanta Das. 2016. *A New Sensorless Speed Estimation Strategy for Induction Motor Driven Electric Vehicle with Energy Optimization Scheme*. *IEEE*.

Amit Kumar Singh, Ankit Dalal, and Praveen Kumar. 2014. *Analysis of Induction Motor for Electric Vehicle Application Based on Drive Cycle Analysis*. IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)

A. O. Di Tommaso, F. Genduso, R. Miceli, *Member*, IEEE, dan C. Nevoloso. 2017. *"Fast Procedure for the Calculation of Maximum Slot Filling Factors in Electrical Machines". IEEE.*

Burak Tekgun, Yilmaz Sozer, *Senior Member, IEEE*, and Igor Tsukerman., 2016. *Modeling and Parameter Estimation of Split-Phase Induction Motors.* IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 52, NO. 2

D. Meeker. 2008. *Finite Element Methode Magnetics Version*.

Fitzgerald A.E. et al, 1990. *Mesin-Mesin Listrik. Edisi ke empat*, Jakarta, Erlangga.

G. Mahalingam, A. Keyhani, 2000."*Design of 42v/3000w permanent magnet synchronous generator,"* Electrical Engineering Department, Ohio State University, Columbus Ohio, Technical Report.

Ion Boldea dan Syed A. Nasar. 2001. *The Induction Machne Handbook.* CRC Press.

Jimmie J. Cathey, 2001. *Electric Machines: Analysis and Design Applying MATLAB.* Singapore. The McGraw-Hill Companies, Inc.

Kadir Abdul, 1981. *Mesin Tak Serempak*. Jakarta, Djambatan

Margunadi, A R. 1994. *Dasar-dasar Rangkaian Listrik*. Jakarta: Erlangga.

Mismail Budiono 2011. *Dasar Teknik Elektro*. Malang: Universitas Brawijawa Press.

Sujud Abdul 1953. *Mesin Arus Searah*. Jakarta: Tehnik H. Stam.

Sawhney A.K, 1990. *Electrical Machine Design.* New Delhi: Dhanfat Rai & Sons.

P. C. Sen. 1997. *Principles of Electric Machines and Power Electronics*. United States of America. John Wiley And Sons, Inc.

Pudji Irasari, Hilman Syaeful Alam, dan Muhammad Kasim. 2012. *Magnetic Simulation and Analysis of Radial Flux Permanent Magnet Generator Using Finite Element Method*. Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology 03 : 23-30.

Santoso Hari, 2018. *Pengaruh Impedansi Kumparan Stator Terhadap Pengasutan Generator Induksi Satu Fasa Penguatan Sendiri Daya Rendah Putaran Rendah.* Malang. Jurusan Teknik Mesin. Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

Vladimir Kindl, Karel Hruska, Jan Sobra and Miroslav Byrtus., 2014. *Effect of Induction Machine's Load and Rotor Eccentricity on Space Harmonics in the Air Gap Magnetic Flux Density.* IEEE.

Wilkinson Karl, 1991. *Menggulung Ulang Motor Kecil*. Jakarta: PT. Elex Media Komputindo.

Zuhal, 1993. *Dasar Teknik Tenaga Listrik Dan Elektronika Daya*. Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Utama.

LAMPIRAN

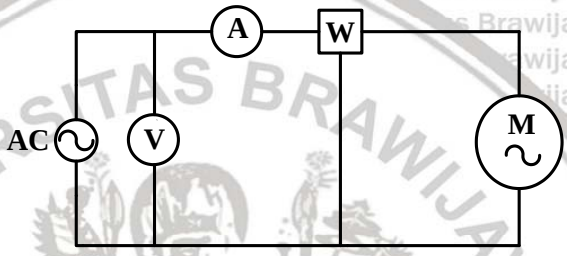
Lampiran 1 : Pengujian Motor Induksi

Penentuan Parameter Motor Induksi Satu Fasa

Parameter motor induksi satu fasa dapat diperoleh dari hasil pengujian tanpa beban, pengujian rotor ditahan dan pengukuran tahanan dc pada belitan stator.

1. **Pengujian Tanpa Beban**

Pengujian tanpa beban pada motor induksi satu fasa dapat memberikan keterangan mengenai arus penguatan dan rugi-rugi tanpa beban. Pengujian dilakukan dengan memberikan tegangan satu fasa pada terminal stator.



Gambar Rangkaian Pengujian Tanpa Beban

Rangkaian pengujian seperti ditunjukkan pada diatas. Pada keadaan saat tanpa beban, arus rotor sangat kecil dan hanya dipergunakan untuk mengatasi gesekan. Oleh karena itu, rugi tembaga pada rotor nilainya kecil dan dapat diabaikan. Sedangkan rugi tembaga pada bagian stator cukup besar, karena arus penguatan yang cukup besar.

Pada keadaan tanpa beban, maka daya masuk Po terpakai untuk :

$P_o = P_c + P_{f+w} + (I_1)^2 R_1$

dengan, P_c : rugi inti besi

P_{f+w} : rugi gesekan dan angin

$(I_1)^2 R_1$: rugi tembaga stator

Besarnya rugi-rugi yang tetap (rugi inti besi dan gesekan angin) yang tidak tergantung pada perubahan beban motor adalah.

$P_c + P_{f+w} = P_o - (I_1)^2 R_1$

Pada keadaan tanpa beban, slip motor induksi sangat kecil, sehingga nilai tahanan rotor R^1_2/s sangat besar, hal ini menyebabkan nilai paralel X_m dan R^1_2 sangat mendekati nilai X_m.

Hal ini mengakibatkan, reaktansi X_{n1} yang terukur pada terminal stator keadaan tanpa beban menjadi mendekati $X_1 + X_m$, yang merupakan reaktansi dari stator yaitu :

$$X_{11} = X_1 + X_m = X_{n1}$$

Untuk motor induksi satu fasa statornya besar impedansi tanpa beban Z_{n1} adalah :

$$Z_{nl} = \frac{V_{nl}}{I_{nl}}$$

dengan, V_{n1}: tegangan masukan stator pada pengujian tanpa beban

I_{n1} : arus stator saat pengujian tanpa beban

Besar tahanan tanpa beban R_{n1} adalah :

$$R_{nl} = \frac{P_{nl}}{I_{nl}^2}$$

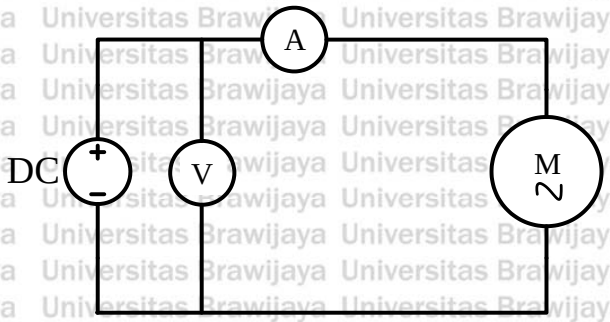
Besar reaktansi tanpa beban X_{n1} adalah :

$$X_{nl} = \sqrt{Z_{nl}^2 - R_{nl}^2}$$

2. Pengujian Tahanan DC Stator

Pengujian untuk R_1 tidak tergantung pada R_2, X_1, dan X_2. Tegangan dc dicatukan pada belitan stator, karena arus dc maka tidak ada tegangan induksi pada rotor dan reaktansi motor nol.

Sumber dc dihubung pada dua terminal belitan fasa, seperti pada gambar rangkaian dibawah. Arus yang masuk disesuaikan dengan nilai rating dan tegangan antara terminal kemudian diukur.



Gambar Rangkaian Pengujian DC

Arus akan mengalir pada belitan maka total tahanan yang dialiri arus adalah :

$$R_1 = \frac{V_{dc}}{I_{dc}}$$

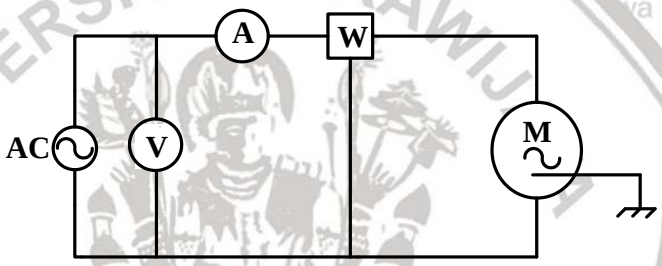
dengan V_{dc} : tegangan masukan terminal

I_{dc} : arus yang mengalir pada belitan

R_1 : tahanan belitan stator diukur pada terminal kumparan utama/ bantu.

3. Pengujian Rotor Ditahan

Pengujian rotor ditahan pada motor induksi satu fasa dilakukan dengan cara tidak menambahkan alat bantu starting agar rotor tidak berputar, seperti pada gambar rangkaian di bawah. Walaupun dicatu tegangan bolak-balik satu fasa pada statornya.



Rangkaian Pengujian Rotor Ditahan

Dari hasil pengujian rotor tertahan, arus jangkar nominal (I_{nom}), untuk tegangan jangkar (V_{sc}) dan daya masukan (P_{sc}) yang tertera pada wattmeter dicatat, sehingga dapat dihitung besarnya nilai : (Rakosh Das Begamudre, 1988 : 297)

$$R_{BR} = \frac{P_{sc}}{I_{nom}^2}$$

$$Z_{BR} = \frac{V_{sc}}{I_{nom}^2}$$

$$X_{BR} = \sqrt{(Z_{BR})^2 - (R_{BR})^2}$$

Apabila arus penguatan I_0 dapat diabaikan, maka besar reaktansi rotor ditahan X_{br} sama dengan jumlah reaktansi bocor stator X_1 dan rotor X_2.

Untuk mencari nilai R_c dan X_m dapat dicari dengan persamaan : (Rakosh Das Begamudre, 1988 : 298)

$$R_c = \frac{(R_{nl} - R_1)^2 + (X_{nl} - X_1)^2}{R_{nl} - R_1}$$

$$X_m = \frac{(R_{nl} - R_1)^2 + (X_{nl} - X_1)^2}{X_{nl} - X_1}$$

Sedangkan pada pengujian rotor tertahan, tahanan tertahan R_{br} dapat dihitung menggunakan hubungan tegangan dan arus. Tahanan R adalah selisih antara tahanan *block rotor* R_{br} dan tahanan stator R_1 yang nilainya sebesar.

$R = R_{br} - R_1$

Dari rangkaian pengganti, dengan s = 1, maka tahanan R merupakan kombinasi paralel antara $R_2' + jX_2'$ dan jX_m.

$$R = R_2^1 \frac{X_m}{(R_2^1)^2 + (X_{22})^2} R_2^1 \left(\frac{X_m}{X_{22}} \right)^2$$

dengan $X_{22} = X_2^1 + X_m$ merupakan reaktansi diri rotor. Persamaan hubungan antara tahanan *block rotor* dan tahanan stator di atas merupakan pendekatan dengan menganggap $X_{22} > 10\ R^1_2$, sehingga terjadi kesalahan kurang dari 1%. (Fitzgerald et al, 1990 : 464).

Persamaan di atas dapat di selesaikan untuk R_2^1, sehingga menjadi :

$$R_2^1 = R \left(\frac{X_{22}}{X_{mm}} \right)^2 = R \left(\frac{X_2^1 + X_m}{X_m} \right)^2$$

Dengan demikian parameter motor, yaitu R_1, X_1, R_2^1, X_2^1 dapat ditentukan, sehingga penampilan motor pada keadaan berbeban dapat di hitung.

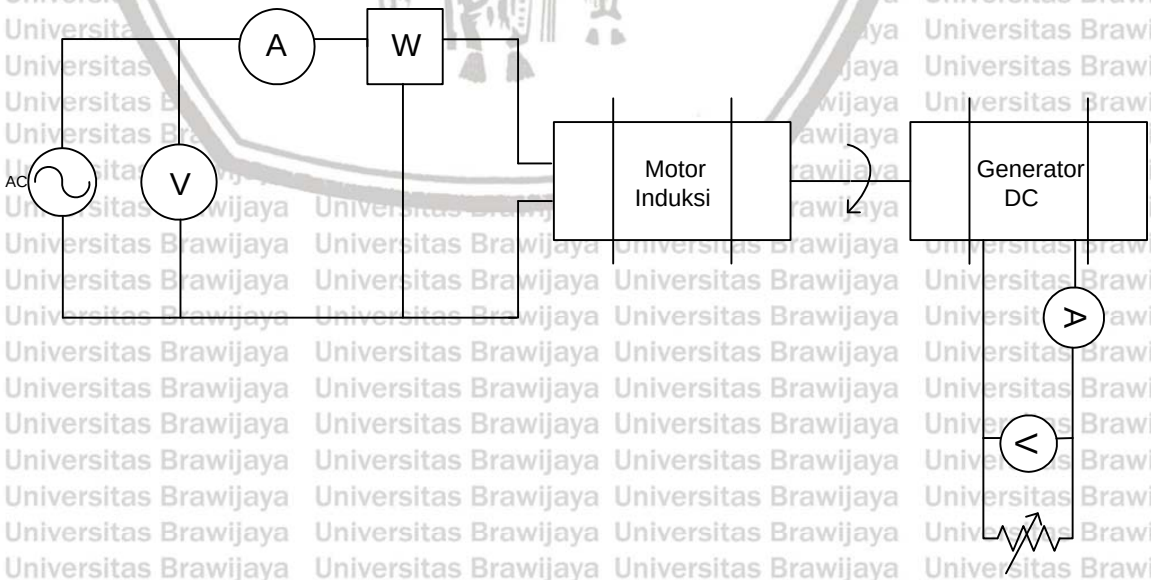
Tabel Pembagian reaktansi bocor motor induksi secara empiris

	Jenis Motor Induksi	$\frac{X_1}{X_1 + X_2^1}$	$\frac{X_2^1}{X_1 + X_2^1}$
1.	Motor induksi 3 fasa rotor sangkar		
	Klas A	0,5	0,5
	Klas B	0,4	0,6
	Klas C	0,3	0,7
	Klas D	0,5	0,5
2.	Motor induksi 3 fasa rotor belitan	0,5	0,5

Sumber : Fitzgerald, 1990 : 46

4. Pengujian unjuk kerja motor

Unjuk kerja motor dapat diketahui melalui pengujian berbeban. Hal ini bertujuan untuk mengetahui torsi dan daya keluaran motor. Kedua parameter tersebut dapat diketahui melalui pengujian dengan rangkaian seperti pada gambar di bawah.



Gambar pengujian berbeban

Prosedur pengujian dilakukan dengan mensuplai motor dengan tegangan bolak-balik yang terhubung langsung dengan generator dc sebagai beban mekanik. Generator dc dibebani resistor variabel untuk meningkatkan arus generator agar motor dapat terbebani hingga kondisi nominal. Untuk mengetahui torsi motor menggunakan metode *Prony Brake*, dimana sebuah timbangan diikatkan pada generator dc. Masa (m) yang terukur pada timbangan dikalikan dengan percepatan gravitasi (g) untuk mendapatkan gaya (F) yang dihasilkan motor yang didapatkan melalui persamaan di bawah,

$$F = m.g\ (N)$$

Gaya yang didapatkan dikalikan jari-jari (r) generator dc untuk mengetahui torsi (τ) yang dihasilkan motor induksi, yang dihitung dengan persamaan di bawah,

$$\tau = F.r\ (Nm)$$

Sedangakan daya keluaran motor (P_{out}) dapat diketahui dari nilai torsi motor dibagi dengan putaran (ω_n) yang terukur pada poros motor. Nilai daya keluaran motor tersebut dapat dihitung dengan persamaan di bawah,

$$P_{out} = \frac{P_{out}}{\omega_n}\ (W)$$

Lampiran 2 : Tabel hasil pengujian berbeban

Tabel hasil pengujian berbeban mesin A

I (A)	Iu (A)	Ib (A)	P in (W)	n (rpm)	Torsi (Nm)	Rugi mek (W)	Rugi-rugi	P gen (W)	P out motor (W)	Pout,mek (W)	Eff (%)	n gen (rpm)
2,26	3,94	3,38	325	982	0	30	30	0	30	0	0	2808
2,45	3,83	3,32	405	976	0,597	30	30,375	77,9	108,275	61,02	0,151	2774
2,65	3,79	3,29	478	972	0,661	30	31,5	156,3	187,8	67,281	0,141	2740
2,93	3,84	3,27	553	968	1,301	30	33,375	226,95	260,325	131,848	0,238	2714
3,2	3,87	3,19	630	964	1,76	30	36	291	327	177,582	0,282	2664
3,55	3,99	3,13	715	960	2,304	30	39,375	342,75	382,125	231,506	0,324	2549
3,93	4,15	3,08	801	956	2,795	30	43,5	384,3	427,8	279,638	0,349	2429
4,35	4,39	3,06	890	952	3,157	30	48,375	404,6	452,975	314,605	0,353	2429
4,74	4,6	3	950	954	3,371	30	54	385,2	439,2	336,568	0,354	1702

Tabel hasil pengujian berbeban mesin B

I (A)	Iu (A)	Ib (A)	P in (W)	n (rpm)	Torsi (Nm)	Rugi mek (W)	Rugi-rugi	P gen (W)	P out motor (W)	Pout,mek (W)	Eff (%)	n gen (rpm)
2,05	3,81	3,2	282	987	0,000	30	30	0	30	0	0	2812
2,42	3,47	3,13	381	972	0,053	30	30,375	80	110,38	5,426	0,0142	2792
2,55	3,42	3,07	451	972	0,939	30	31,5	157,4	188,9	95,496	0,2117	2764
2,87	3,5	2,96	531	972	1,301	30	33,375	229,2	262,58	132,392	0,2493	2747
3,21	3,84	3,12	629	967	2,197	30	36	291	327	222,398	0,3536	2718
3,57	3,98	3,12	705	957	2,560	30	39,375	350	389,38	256,425	0,3637	2662
3,93	4,17	3,01	790	962	3,435	30	43,5	400,2	443,7	345,834	0,4378	2599
4,38	4,45	2,93	890	952	4,117	30	48,375	439,25	487,63	410,262	0,461	2512
4,93	4,88	2,85	1000	946	4,608	30	54	464	518	456,260	0,4563	2407
5,36	5,01	2,79	1080	938	4,992	30	60,38	453,6	513,98	490,1	0,454	2288

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Lampiran 3: Listing Program Analisis Deret Fourier MMF Kumparan

A. Mesin A

```
%Analisis Deret Fourier MMF Kumparan Mesin A
clear all;
t=0:0.01:7;
ft=0;
for n=1:2:700
    for i=1:701
        y(n,i)=((0.1*(cos(n*pi/5)-cos(4*n*pi/5)-
(2*cos(n*pi))+2)/n*pi)*sin(n*t(i)));
    end
    ft=ft+y(n,:);
end
plot(t,ft);grid
```

B. Mesin B

```
%Analisis Deret Fourier MMF Kumparan Mesin B
clear all;
t=0:0.01:7;
ft=0;
for n=1:2:700
    for i=1:701
        y(n,i)=(0.1*((cos(2*n*pi/5)+cos(n*pi/5)-cos(3*n*pi/5)-
cos(4*n*pi/5)-(cos(n*pi))+1)/n*pi)*sin(n*t(i)));
    end
    ft=ft+y(n,:);
end
plot(t,ft);grid
```