

Analisis Motor Reluktansi Tipe *Switched Reluctance* Motor dengan Sumber Tiga Fasa

RYAN AGUNG TRIAJI, NASRUN HARIYANTO, SYAHRIAL

Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Nasional Bandung

Email : ryan_triaji@yahoo.co.id

ABSTRAK

Switched Reluctance Motor (motor SR) merupakan motor kutub ganda yang memiliki beberapa kelebihan seperti struktur yang sederhana dengan konstruksi tanpa belitan di sisi rotor dan tanpa menggunakan magnet permanen. Untuk melakukan penelitian maka telah dirancang motor switch reluktansi dengan diberi sumber tiga fasa. Pada perancangan dari stator menggunakan bahan letter E tipe M₁₉, dan sedangkan pada rotor menggunakan bahan besi. Pada penelitian motor switch reluktansi ini dilakukan dengan mengatur besaran frekuensi secara bertahap berdasarkan kecepatan putaran generator. Dari hasil percobaan motor didapat bahwa kecepatan putaran rotor sebesar 588 rpm, dengan besaran jalur fluks magnetik yang melalui motor sebesar $8,03 \times 10^{-3}$ Wb.

Kata kunci : Motor SR, 3 Fasa, Putaran Rotor, fluks magnetik

ABSTRACT

Switched reluctance motors (SR motors) are doubly salient pole which have some advantages such as simple structure with construction without winding on the rotor side and without use permanent magnet. To conduct the study, it has been designed a switch reluctance motor with a three-phase source. The design of the stator used material E letter M₁₉ type, and the rotor used iron material. The switch reluctance motor research was done by adjusting the frequency gradually by the rotation of generator. From the motor testing, it was yielded the speed of rotor rotation on the switched reluctance motor was 588 rpm and the paths magnetic flux through on the switched reluctance motor was 8.03×10^{-3} Wb.

Keywords : Motor SR, 3 Phase, Rotation Rotor, flux magnetic

1. PENDAHULUAN

Teknik Tenaga Listrik merupakan ilmu yang mempelajari konsep dasar kelistrikan dan pemakaian alat yang asas kerjanya berdasarkan aliran elektron dalam konduktor (arus listrik). Dalam sistem energi listrik dikenal peralatan yang mengubah energi listrik baik dari energi listrik ke energi mekanis maupun sebaliknya, serta mengubah energi listrik dari rangkaian atau jaringan yang satu menjadi energi listrik yang lain **(Amilia, 2009)**.

Konstruksi dari suatu motor listrik akan sangat menentukan tingkat kerumitan dalam perancangan pada suatu motor. Torque yang besar serta bagaimana mengendalikan putaran poros rotor akan menjadi pertimbangan dalam memilih suatu motor sebagai tenaga penggerak. Terdapatnya belitan pada sisi rotor akan menjadi kendala bagi suatu motor dalam menyalurkan arus ke kumparan rotor **(Slamet, 2010)**.

Berdasarkan konstruksinya, motor SR merupakan jenis motor sinkron yang memiliki konstruksi lebih sederhana dibandingkan dengan motor fraksional lainnya, yang dikarenakan pada bagian dari rotor motor SR tidak memiliki belitan atau magnet permanen sehingga akan menjadi lebih ekonomis **(Woo, 1995)**.

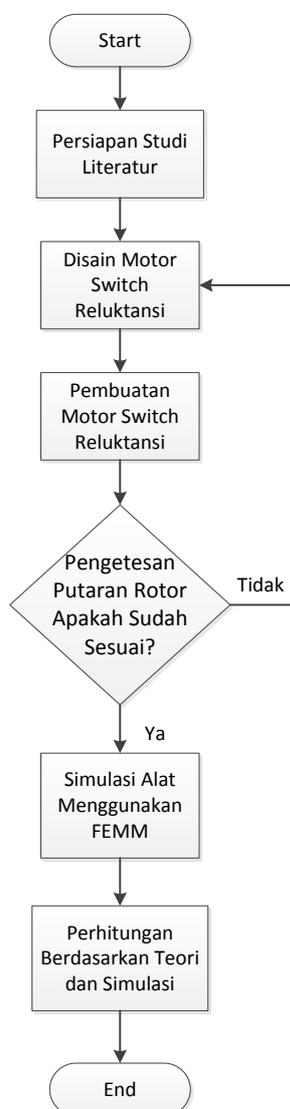
Pada aplikasinya, motor fraksional akan membutuhkan kecepatan sinkron yang tepat. Akan tetapi, motor SR merupakan versi lain dari motor tipe rotor sangkar dengan memanfaatkan medan magnet yang diinduksikan pada inti besi rotor. Sehingga switch disini mengimplikasikan rotor dapat berputar pada kecepatan sinkron dengan memanfaatkan perbedaan nilai reluktansi yang terjadi pada sisi rotor dengan memanfaatkan gaya magnetik akibat medan magnet pada sisi stator untuk menggerakkan kutub rotor **(Krishnan, 2001)**

Penelitian pada motor switch reluktansi dengan sumber tiga fasa dilakukan dengan tujuan untuk menganalisis putaran rotor pada motor switch reluktansi dengan sumber tiga fasa, memperoleh besarnya nilai reluktansi pada stator, celah udara, rotor, dan memperoleh besarnya aliran fluks magnetik yang melalui motor.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Langkah Penelitian

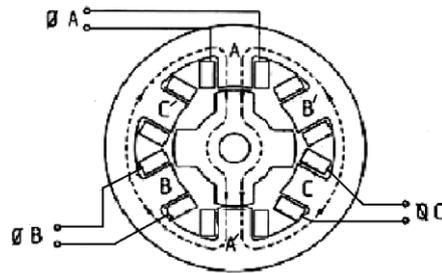
Berikut ini langkah-langkah yang dilakukan untuk melakukan penelitian, simulasi, dan perhitungan pada motor switch reluktansi yang dinyatakan dalam diagram alir seperti ditunjukkan oleh **Gambar 1**. Gambar tersebut menjelaskan diagram alir pada penelitian motor switch reluktansi dengan persiapan studi literatur mengenai teori – teori yang berkenaan pada motor switch reluktansi, lalu dilakukan pendisainan motor switch reluktansi dengan melakukan pendisainan pada stator dan rotor. Setelah dilakukan pendisainan maka dilakukan pembuatan motor switch reluktansi dan pengetesan pada putaran rotor pada motor switch reluktansi dengan sumber tiga fasa yang diatur besaran frekuensinya berdasarkan putaran generator. selanjutnya dilakukan pengetesan motor switch reluktansi dengan pensimulasian menggunakan software *Finite Element Magnetic* untuk dilakukan perhitungan berdasarkan teori.



Gambar 1. Diagram Alir Langkah Penelitian

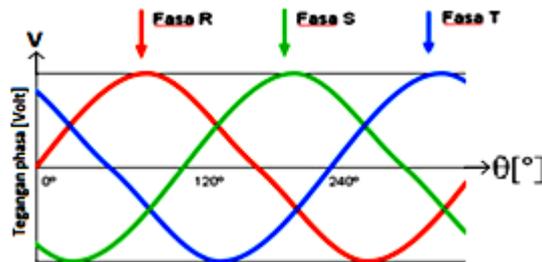
2.2 Model Pengujian Motor

Gambar 2 menjelaskan model pengujian motor switch reluktansi dengan sumber tiga fasa.



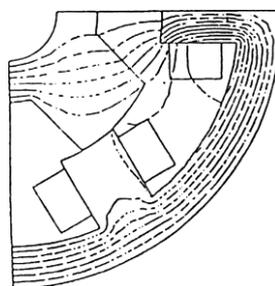
Gambar 2. Model Pengujian Motor

Pada penelitian motor switch reluktansi dilakukan dengan menghubungkan sumber tiga fasa ke kumparan stator dengan tujuan untuk dilakukan pengamatan terhadap putaran rotor pada motor switch reluktansi dengan sumber tiga fasa. *Switched Reluctance Motor (SRM)* merupakan jenis motor yang memiliki konstruksi lebih sederhana dibandingkan dengan jenis motor lainnya, dikarenakan pada bagian rotornya tidak memiliki belitan atau magnet permanen sehingga akan lebih ekonomis (**Miller, 2002**).



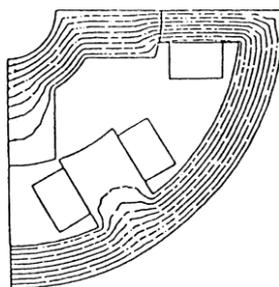
Gambar 3. Tegangan AC Tiga Fasa

Berdasarkan sumber tegangan AC tiga fasa seperti pada **Gambar 3**, maka medan magnet yang terjadi antar kutub fasa stator berbeda-beda terhadap fungsi waktu. Saat posisi kutub rotor sejajar dengan kutub pada stator maka saat itulah terjadi reluktansi minimum, dan jika posisi kutub rotor tidak sejajar dengan kutub pada stator, maka saat itu terjadi reluktansi lebih besar dibandingkan dengan ketika posisi kutub rotor sejajar dengan kutub stator. Jika dilihat berdasarkan sifat fluks magnetik, maka terlihat bahwa sifat fluks magnetik akan menarik benda yang terbuat dari bahan ferromagnetik sampai dengan mendapatkan nilai reluktansi sekecil mungkin. Penarikan kutub rotor oleh medan magnet pada stator tersebut ditunjukkan oleh **Gambar 4**, dimana gambar tersebut menjelaskan proses penarikan kutub rotor oleh medan magnet pada kutub stator (**Krishnan, 2001**).



Gambar 4. Kondisi Posisi Kutub Rotor Tidak Sejajar Terhadap Kutub Stator

Gambar 5 menjelaskan kutub rotor telah tertarik oleh medan magnet pada kutub stator (**Krishnan, 2001**).

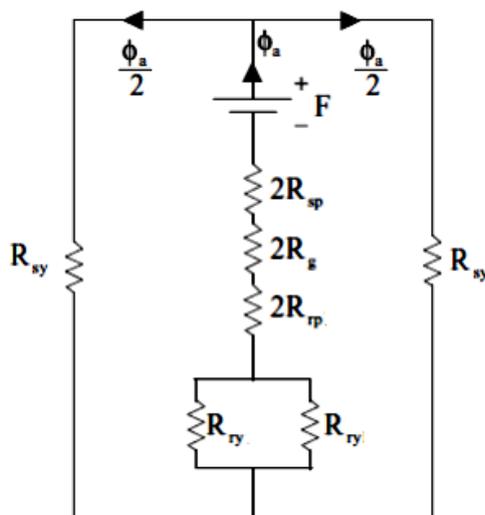


Gambar 5. Kondisi Posisi Kutub Rotor Tertarik Medan Magnet Pada Kutub Stator

2.3 Dasar Teori Motor Switch Reluktansi

2.3.1 Distribusi Fluks Magnetik

Fluks magnetik merupakan jumlah medan magnetik (garis gaya magnet) yang dihasilkan oleh sumber listrik, fluks magnetik dilambangkan dengan Φ (phi) dengan satuan fluks magnetik adalah weber (Wb). Berdasarkan rangkaian pengganti magnetik dari motor switch reluktansi dapat dilihat seperti pada **Gambar 6**, dimana dijelaskan rangkaian pengganti magnetik berdasarkan aliran fluks magnetik pada motor switch reluktansi (**Krishnan, 2001**).



Gambar 6. Rangkaian Pengganti Magnetik Motor Switch Reluktansi

Berdasarkan rangkaian pengganti magnetik pada motor switch reluktansi, maka untuk menentukan besaran fluks magnetik pada motor switch reluktansi dapat diketahui pada persamaan 1 (**Harris, 1989**).

$$\phi = \frac{F}{\left(\frac{R_{sy}}{2} + 2R_{sp} + 2R_g + 2R_{rp} + \frac{R_{ry}}{2} \right)} \dots\dots\dots (1)$$

dimana: ϕ =Fluks magnet pada kutub stator(Wb), F =Gaya gerak magnet(A-T), R_{sp} = Reluktansi kutub stator(A/Wb), R_g =Reluktansi celah udara(A/Wb), R_{ry} =Reluktansi rotor back iron(A/Wb), R_{sy} =Reluktansi stator back iron(A/Wb), R_{rp} =Reluktansi kutub rotor(A/Wb).

2.3.2 Rapat fluks Fluks Magnetik

Kerapatan fluks magnetik merupakan jumlah total fluks yang menembus area yang tegak lurus dengan fluks tersebut, maka untuk menentukan rapat fluks magnet pada kutub rotor dapat dirumuskan dengan persamaan 2 (Harris, 1989).

$$B_{rp} = B_{sp} \cdot \left(\frac{A_{sp}}{A_{rp}}\right) \dots \dots \dots (2)$$

Dimana : B_{rp} = Rapat fluks magnet pada kutub rotor (Wb/m² atau T), A_{rp} = Luas permukaan kutub rotor (m²), B_{sp} = Rapat fluks magnet pada kutub stator (Wb / m² atau T), A_{sp} = Luas permukaan kutub stator (m²).

untuk menentukan rapat fluks magnet pada celah udara dapat dirumuskan dengan persamaan 3.

$$B_g = B_{sp} \cdot \left(\frac{A_{sp}}{A_g}\right) \dots \dots \dots (3)$$

Dimana : B_g = Rapat fluks magnet celah udara (Wb/m² atau T), A_g = Luas Permukaan celah udara (m²), B_{sp} = Rapat fluks magnet pada kutub stator (Wb/ m² atau T), A_{sp} = Luas permukaan kutub stator (m²).

untuk menentukan rapat fluks magnet pada rotor back iron dapat dirumuskan dengan persamaan 4.

$$B_{ry} = \frac{B_{sp}}{2} \cdot \left(\frac{A_{sp}}{A_{ry}}\right) \dots \dots \dots (4)$$

Dimana : B_{ry} = Rapat fluks magnet rotor back iron (Wb/m² atau T), A_{ry} = Luas permukaan rotor back iron (m²), B_{sp} = Rapat fluks magnet pada kutub stator (Wb/m²), A_{sp} = Luas permukaan kutub stator (m²).

untuk menentukan rapat fluks magnet pada stator back iron dapat dirumuskan dengan persamaan 5.

$$B_{sy} = \frac{B_{sp}}{2} \cdot \left(\frac{A_{sp}}{A_{sy}}\right) \dots \dots \dots (5)$$

Dimana : B_{sy} = Rapat fluks stator back iron (Wb/m² atau T), A_{sy} = Luas permukaan stator back iron (m²), B_{sp} = Rapat fluks magnet pada kutub stator (Wb/m² atau T), A_{sp} = Luas permukaan kutub stator (m²).

2.3.3 Permeabilitas Magnetik

Permeabilitas magnet merupakan konstanta pembanding antara rapat fluks (B) dengan kuat medan (H). Untuk udara dan bahan non magnetik, permeabilitas dinyatakan sebagai permeabilitas ruang kosong (μ_0). Sedangkan untuk bahan magnetik permeabilitas dinyatakan sebagai permeabilitas relatif bahan (μ_r), sehingga untuk mengetahui nilai pembanding antara rapat fluks dengan kuat medan dapat ditentukan seperti pada persamaan 6.

$$\mu = \frac{B}{H} \dots \dots \dots (6)$$

Dimana : B=Rapat fluks magnet (T atau Wb/m²), H=Intensitas kuat medan magnet (At/m), μ = Permeabilitas (H/m).

2.3.4 Gaya Gerak Magnet

Mmf atau gerak gaya magnet merupakan gaya yang timbul akibat fluks magnetik pada rangkaian magnetik, gaya gerak magnet tergantung dari jumlah arus yang mengalir pada kumparan serta bergantung pada jumlah lilitan, maka untuk menentukan gaya gerak magnet pada motor switch reluktansi dapat dirumuskan seperti persamaan 7.

$$F = 2 (H_{sp} \ell_{sp} + H_g \ell_g + H_{rp} \ell_{rp}) + \frac{1}{2} (H_{ry} \ell_{ry} + H_{sy} \ell_{sy}) \dots \dots \dots (7)$$

Dimana : F = Gaya Gerak Magnet (A-T), H_{sp} = Intensitas kuat medan magnet pada kutub stator (At/m), ℓ_{sp} = Panjang lintasan fluks pada kutub stator (m), H_g = Intensitas kuat

medan magnet celah udara (At/m), l_g = Panjang lintasan fluks pada celah udara (m), H_{rp} = Intensitas kuat medan magnet pada kutub rotor (At/m), l_{rp} = Panjang lintasan fluks pada kutub rotor (m), H_{ry} = Intensitas kuat medan magnet pada *rotor back iron* (At/m), l_{ry} = Panjang lintasan fluks pada *rotor back iron* (m), H_{sy} = Intensitas kuat medan magnet pada *stator back iron* (At/m), l_{sy} = Panjang lintasan fluks pada *stator back iron* (m).

2.3.5 Reluktansi

Reluktansi merupakan tahanan magnetik untuk menetapkan garis fluks magnet dalam bahan yang ditentukan, sehingga reluktansi dapat diartikan sebagai tahanan magnetik dari suatu rangkaian magnetik terhadap fluks magnet.

Untuk menentukan nilai reluktansi pada kutub stator dapat dirumuskan seperti pada persamaan 8.

$$R_{sp} = \frac{H_{sp}}{B_{sp}} \cdot \frac{l_{sp}}{A_{sp}} \dots\dots\dots (8)$$

Dimana : R_{sp} = Reluktansi kutub stator (A/Wb), l_{sp} = Panjang lintasan fluks pada kutub stator (m), A_{sp} = Luas permukaan kutub stator (m^2), B_{sp} = Rapat fluks magnet pada kutub stator (Wb/ m^2 atau T), H_{sp} = Intensitas kuat medan magnet kutub stator (At/m).

Untuk menentukan nilai reluktansi pada celah udara dapat ditentukan dengan persamaan 9.

$$R_g = \frac{H_g}{B_g} \cdot \frac{l_g}{A_g} \dots\dots\dots (9)$$

Dimana : R_g = Reluktansi celah udara (A/Wb), l_g = Panjang lintasan fluks pada celah udara(m), μ_o = Permeabilitas celah udara ($4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m), A_g = Luas permukaan celah udara (m^2).

Untuk menentukan nilai reluktansi pada kutub rotor dapat ditentukan dengan persamaan 10.

$$R_{rp} = \frac{H_{rp}}{B_{rp}} \cdot \frac{l_{rp}}{A_{rp}} \dots\dots\dots (10)$$

Dimana : R_{rp} = Reluktansi kutub rotor (A/Wb), l_{rp} = Panjang lintasan fluks pada kutub rotor (m), B_{rp} = Rapat fluks magnet pada kutub rotor (Wb / m^2 atau T), A_{rp} = Luas permukaan kutub rotor (m^2).

Untuk menentukan nilai reluktansi pada *rotor back iron* dapat ditentukan dengan persamaan 11.

$$R_{ry} = \frac{H_{ry}}{B_{ry}} \cdot \frac{l_{ry}}{A_{ry}} \dots\dots\dots (11)$$

Dimana : R_{ry} = Reluktansi *rotor back iron* (A/Wb), l_{ry} = Panjang lintasan fluks pada *rotor back iron* (m), B_{ry} = Rapat fluks magnet pada *rotor back iron* (Wb / m^2 atau T), A_{ry} = Luas permukaan *rotor back iron* (m^2).

Untuk menentukan nilai reluktansi pada *stator back iron* dapat ditentukan dengan persamaan 12.

$$R_{sy} = \frac{H_{sy}}{B_{sy}} \cdot \frac{l_{sy}}{A_{sy}} \dots\dots\dots (12)$$

Dimana : R_{sy} = Reluktansi *stator back iron* (A/Wb), l_{sy} = Panjang lintasan fluks pada *stator back iron* (m), B_{sy} = Rapat fluks magnet pada *stator back iron* (Wb / m^2 atau T), A_{sy} = Luas Permukaan *stator back iron* (m^2)

2.3.6 Daya Masukan Pada Switch Reluktansi Motor

Daya listrik diartikan sebagai besar energi listrik yang dihasilkan setiap detik. Dalam hal ini besaran daya merupakan joule/detik atau disebut dengan watt. Untuk menentukan daya masukan pada motor reluktansi ini dapat ditentukan seperti pada persamaan 13 (Chapman, 1999).

$$P_{3\phi in} = \sqrt{3} V_{LL} I \cos \phi \dots\dots\dots (13)$$

Dimana : $P_{3\phi in}$ = Daya masukan tiga fasa pada motor (W), V_{LL} = Tegangan fasa - fasa (V), I = Arus yang diserap motor (A), $\cos \Phi$ = Power factor (dengan asumsi 0.86).

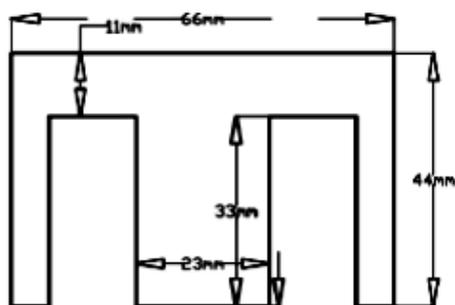
2.4 Disain Motor Switch Reluktansi

Pada disain motor switch reluktansi terdiri dari stator, rotor, dan pemodelan pada motor switch reluktansi (Vijayraghavan, 2001).

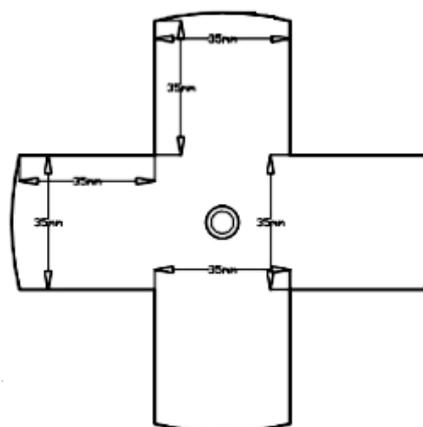
Gambar 7(a) memperlihatkan ukuran dari disain stator pada motor switch reluktansi menggunakan letter E tipe M₁₉.

Gambar 7(b) memperlihatkan ukuran dari disain rotor pada motor switch reluktansi.

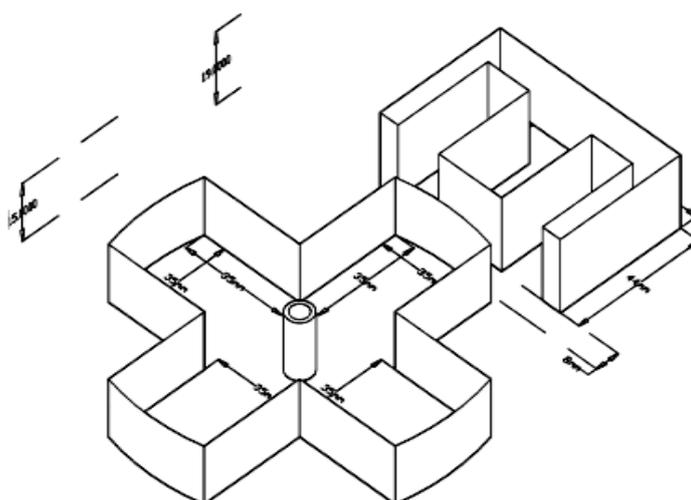
Gambar 7(c) memperlihatkan pemodelan pada motor switch reluktansi.



Gambar 7(a). Disain Ukuran Letter E Tipe M₁₉



Gambar 7(b). Disain Ukuran Rotor Motor Switch reluktansi



Gambar 7(c). Disain Pemodelan Motor Switch reluktansi

2.4 Data Penelitian

Tabel 1 menunjukkan data berdasarkan pemodelan stator dan rotor pada motor switch reluktansi.

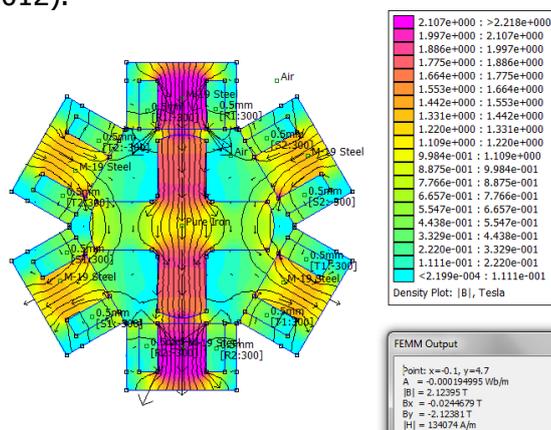
Tabel 1. Data Perancangan Motor Switch Reluktansi

Keterangan	
Jumlah Fasa	3 Fasa
Kutub Stator	6 Kutub
Kutub Rotor	4 Kutub
Jumlah Lilitan Stator	300 Lilitan
Ukuran Diameter Kawat	0.5 mm
Panjang Celah Udara	8 mm
Lebar Celah Udara	78 mm
Tinggi Celah Udara	15 mm
Sudut Kutub Stator	30 derajat
Sudut Kutub Rotor	40 derajat
Tinggi Stator	46 mm
Tinggi Rotor	44 mm
Tinggi Kutub Stator	19 mm
Panjang Kutub Stator	33 mm
Panjang Kutub Rotor	35 mm
Lebar Kutub Stator	23 mm
Lebar Kutub Rotor	35 mm
Tinggi Stator Back Iron	19 mm
Tinggi Rotor Back Iron	15 mm
Lebar Stator Back Iron	66 mm
Lebar Rotor Back Iron	35 mm
Panjang Stator Back Iron	11 mm
Panjang Rotor Back Iron	35 mm
Diameter Stator	206 mm
Diameter Rotor	110 mm
Material Stator	M ₁₉ Steel
Material Rotor	Besi

2.5 Simulasi Finite Element Magnetik

Simulasi *Finite Element Magnetic* (FEMM) digunakan dengan tujuan untuk mengetahui besaran rapat fluks magnetik pada kutub stator dari motor switch reluktansi. Sehingga besaran rapat fluks magnetik pada kutub stator dapat dilihat seperti pada **Gambar 8**.

Gambar 8 menjelaskan simulasi dengan *Finite Element Magnetic* pada motor switch reluktansi (Sholahuddin, 2012).



Gambar 8 Simulasi Finite Element Magnetik

Berdasarkan **Gambar 8** dapat diketahui bahwa rapat fluks magnetik pada kutub stator yaitu sebesar 2,12 T, dengan intensitas kuat medan magnet sebesar 134074 At/m.

3. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Perhitungan

Tabel 2 menunjukkan data berdasarkan hasil perhitungan dari rumus pada metodologi penelitian.

Tabel 2. Hasil Perhitungan

Parameter	Nilai
B_{sp}	2,12 (T)
H_{sp}	134074 (At/m)
B_g	1,82 (T)
H_g	1446200 (At/m)
B_{rp}	1,7 (T)
H_{rp}	37082,28 (At/m)
B_{ry}	0,85 (T)
H_{ry}	18541,14 (At/m)
B_{sy}	0,08 (T)
H_{sy}	5055,1 (At/m)
F	83180 (A-T)
R_{sp}	571780 (A/Wb)
R_g	4134800 (A/Wb)
R_{rp}	167790 (A/Wb)
R_{ry}	167790 (A/Wb)
R_{sy}	1042610 (A/Wb)
ϕ	0,00803 (Wb)
$P_{3\phi}$	116,19 (W)

3.2 Hasil Pengujian Motor Reluktansi dengan Sumber Tiga Fasa

Berdasarkan pengukuran pada motor switch reluktansi dengan sumber tiga fasa, didapat besaran arus yang mengalir ke kumparan stator pada motor switch reluktansi sebesar 2.6 A, dengan tegangan fasa-fasa berdasarkan pengukuran didapat sebesar 30 V. Sehingga berdasarkan penelitian pada motor switch reluktansi dengan sumber tiga fasa dengan daya masukan pada motor adalah sebesar 116.19 Watt maka didapat kecepatan putaran rotor pada motor switch reluktansi berdasarkan pengukuran adalah sebesar 588 rpm.

4. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

1. Berdasarkan perhitungan didapat bahwa besaran reluktansi pada kutub stator adalah sebesar $571,78 \times 10^3$ A/Wb, reluktansi pada celah udara sebesar $4134,8 \times 10^3$ A/Wb, reluktansi pada kutub rotor sebesar $167,79 \times 10^3$ A/Wb, reluktansi pada *rotor back iron* sebesar $167,79 \times 10^3$ A/Wb, dan reluktansi pada *stator back iron* adalah sebesar $1042,61 \times 10^3$ A/Wb. sehingga dapat disimpulkan bahwa reluktansi terbesar berada pada celah udara yaitu sebesar $4134,8 \times 10^3$ A/Wb.
2. Berdasarkan perhitungan didapat bahwa besaran aliran fluks magnetik yang melalui motor switch reluktansi adalah sebesar $8,03 \times 10^{-3}$ Wb, dengan besaran gaya gerak magnet yang terjadi pada motor berdasarkan perhitungan adalah sebesar $83,18 \times 10^3$ A-T.
3. Berdasarkan perhitungan didapat daya masukan pada motor switch reluktansi dengan sumber tiga fasa adalah sebesar 116,19 Watt, sehingga berdasarkan pengukuran pada putaran rotor motor switch reluktansi dengan sumber tiga fasa didapat sebesar 588 rpm.

DAFTAR RUJUKAN

- Harris, M.R. and T.J.E. Miller. (1989). *Comparison of design and performance parameters in switched reluctance and induction motors*, EMD, pp. 39-57.
- Miller, T.J.E. (2002). *Optimal design of switched reluctance motors*, IEEE Trans. on Industry Appl, pp. 1-13.
- Krishnan, R., R. Arumugam, and J.F. Lindsay. (1988). *Design procedure for switched-reluctance motors*, pp. 60-62.
- Chapman, Stephen J. (1999). *Electric Machinery Fundamentals*, 2nd Edition, Mc Graw – Hill Book Company, Singapore, pp. 442.
- Sholahuddin. (2012). *Modelling and Simulation of Switched Reluctance Motor*, Electric Energy Conversion Research Laboratory, School of Electrical Engineering and Informatics, Indonesia, pp. 1-5.
- Vijayraghavan. (2001). *Design of Switched Reluctance Motors and Development of a Universal Controller for Switched Reluctance and Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives*, pp.30-32.