

Penurunan *Rating* Tegangan Terpasang dari 380V_{ac} Menjadi 120V_{ac} dengan Melilit Ulang Belitan Stator pada Motor Induksi 3 Fasa

WALUYO, ALINDA NOVITA SARI, SYAHRIAL

Teknik Elektro Institut Teknologi Nasional

Email : alinalinda.novitasari@gmail.com

ABSTRAK

Keterbatasan dimensi baterai meyebabkan kendaraan listrik membutuhkan motor penggerak dengan tegangan rendah. Dengan demikian, metoda rewinding digunakan untuk menurunkan rating tegangan dari 380V_{ac} menjadi 120V_{ac} dengan melilit ulang belitan stator pada motor induksi 3 fasa. Dengan mengubah jumlah belitan pada kumparan stator menjadi 160 lilitan per fasa, mengubah jumlah konduktor menjadi 960 konduktor serta mengubah ukuran diameter menjadi 0,89mm dan luas penampang tembaga pada lilitan stator menjadi 0,63mm². Dengan melakukan pengujian didapatkan torka beban sebesar 1,8 Nm, torka starting sebesar 2,79 Nm dan torka maksimum sebesar 6,17Nm pada slip maksimum sebesar 0,2. Rugi-rugi aliran daya pada motor terdiri dari rugi-rugi lilitan stator sebesar 81,94 W, rugi-rugi celah udara sebesar 338,06W, rugi-rugi tembaga rotor sebesar 6,08W, rugi-rugi mechanic sebesar 331,98W, dan rugi-rugi rotasi atau sebesar 48,06W sehingga daya output motor sebesar 283,92W dan efisiensi motor adalah 67,6%.

Kata Kunci: kendaraan listrik, motor induksi, rewinding, torka, rugi-rugi

ABSTRACT

Limitation of battery dimensions, cause electric vehicles require low voltage motor. Thus, a rewinding method was used to reduce voltage rating from 380V_{ac} to 120V_{ac} with wrapped around the stator winding 3 phase induction motor. The process changed the number of turns in the stator windings per phase to 160 turns, changed the number of conductors as 960 conductors and changed into 0.89mm of diameter and cross-sectional area of copper in the stator windings into 0.63mm². Based on the testing, the load torque was obtained as 1.8 Nm, starting torque of 2.79 Nm and maximum torque of 6.17 Nm at the maximum slip of 0.2. The stator copper loss, air gap loss, the rotor copper loss, mechanic loss, and rotational loss were 81.94W, 338.06W, 6.08W, 331.98W, and 48.06W respectively. The power output of the motor was 283.92W and the motor efficiency after rewinding was 67.6%.

Key word: electric vehicles, induction motor, rewinding, torque, losses

1. PENDAHULUAN

Didukung dengan kenaikan bahan bakar minyak, salah satu solusi yang memungkinkan adalah mengganti kendaraan berbahan bakar minyak dengan kendaraan listrik. Dalam pembuatan kendaraan listrik dibutuhkan beberapa komponen pendukung salah satunya adalah motor listrik. Motor listrik yang digunakan untuk aplikasi kendaraan listrik adalah motor yang mempunyai keandalan yang tinggi dengan harga yang relatif murah. Motor induksi adalah salah satu motor yang banyak digunakan di lingkungan industri serta pada aplikasi kendaraan listrik karena harganya yang relatif murah serta mempunyai faktor keandalan yang tinggi.

Namun karena keterbatasan sumber tegangan pada baterai maka dibutuhkan motor dengan tegangan rendah ($60V_{ac}$, $80V_{ac}$, $110V_{ac}$). Adapun tujuan lain adalah untuk menghindari bahaya sistem tegangan tinggi, kerumitan isolasi tegangan tinggi serta mengurangi efek dV/dt yang berpengaruh terhadap perangkat power elektronik. Kendaraan listrik yang baik membutuhkan suatu pemeliharaan seminimal mungkin, keandalan yang tinggi, torka yang tinggi serta kokoh.

Metoda *rewinding* dapat digunakan untuk menurunkan rating tegangan pada motor induksi sesuai yang diinginkan dengan melilit atau menggulung ulang kumparan motor induksi. Metoda *rewinding* umum digunakan pada penurunan tegangan karena metoda yang digunakan cukup mudah.

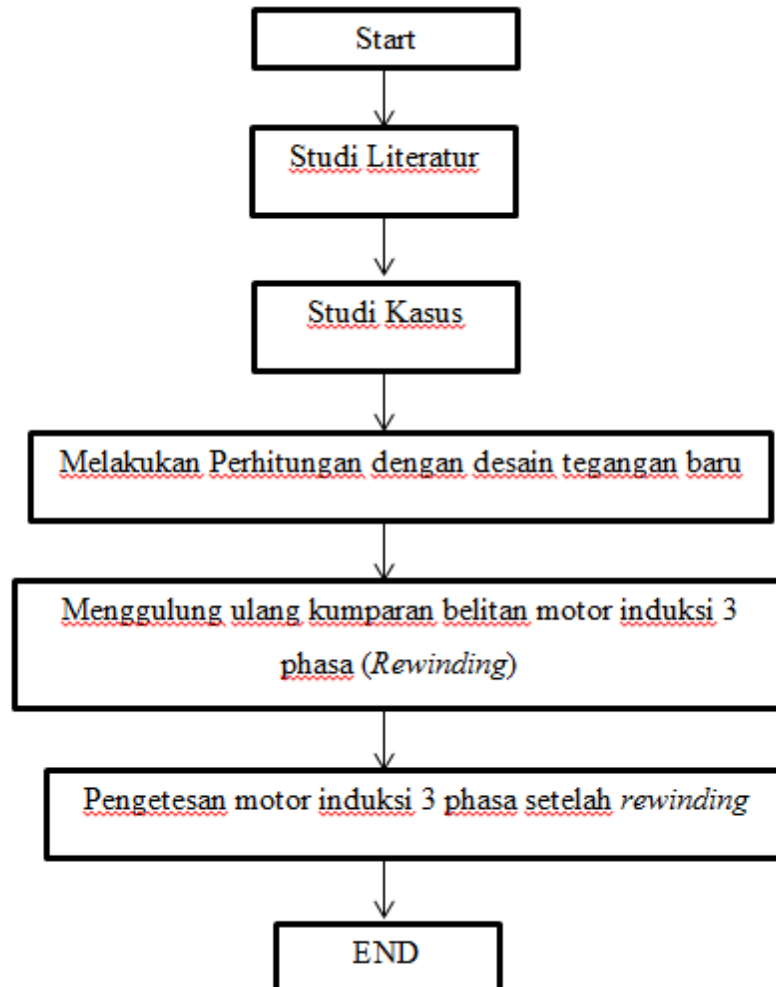
Motor induksi adalah motor ac yang digunakan sebagai penggerak utama di sebagian besar industri besar maupun kecil dan digunakan pada aplikasi pompa, conveyor dan kompresor **(VTU Learning)**. Motor induksi merupakan tipe motor yang paling populer diantara motor ac lain karena kesederhanaan dan kemudahan operasi **(Chapman , 1985)**. Motor induksi sangat diterima secara luas untuk kendaraan listrik karena telah banyak digunakan, keandalan dan daya tahan yang tinggi, didukung pula dengan biaya pemeliharaan yang rendah **(Aglan and Ashour, 2012)**. Berdasarkan penelitian terdahulu digunakan metoda *rewinding* untuk menghindari biaya yang mahal, kerumitan isolasi dan efek dv/dt yang berpengaruh terhadap lama masa kerja motor dan keandalan.

Repair atau *rewinding* dengan cara yang bagus dan prosedur yang tepat akan menyebabkan rugi-rugi yang kecil. Tetapi apabila motor induksi telah dilakukan perbaikan atau *rewinding*, maka belitan yang ada pada motor induksi tidak akan sama seperti sebelumnya sehingga menyebabkan rugi-rugi yang relatif besar **(Electrical Apparatus Association, 2003)**.

2. METODOLOGI PERANCANGAN DAN PENGUJIAN

2.1 Langkah Penelitian

Metodologi perancangan merupakan uraian tahapan yang dilakukan dalam melaksanakan penelitian. Secara umum tahapan tertuang dalam bagan berikut pada Gambar 1.



Gambar 1. Bagan Alur Pengerjaan

2.1 Studi Literatur

Terdapat beberapa referensi teori dan persamaan yang relevan untuk menunjang penelitian, diantaranya :

Diketahui bahwa daya pada motor induksi adalah

$$P_{3\phi} = 3.V_{ph} \cdot I_{ph} \cdot \cos \phi \cdot \eta \cdot 10^{-3} \text{ kW} \quad (1)$$

Dimana P adalah daya output pada motor dalam kW.

Untuk menunjang penurunan tegangan,terdapat beberapa hal yang harus diperhatikan seperti faktor distribusi dan faktor kisar yang akan mempresentasikan faktor belitan pada motor induksi 3 phasa. Faktor belitan ditunjukkan oleh (**Deshapande, 2010**).

$$k_w = k_p \cdot k_d \quad (2)$$

Dimana faktor distribusi

$$k_d = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot \text{jumlah fasa}}\right)}{sy \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot \text{jumlah fasa} \cdot (sy)}\right)} \quad (3)$$

Dan faktor Kisar

$$k_p = \sin\left(\frac{\rho}{2}\right) \quad (4)$$

Dari persamaan 2 dapat diaplikasikan untuk tegangan induksi pada motor induksi yaitu dengan persamaan (**Chapman, 1985; Zuhail, 1997**).

$$E_{s \text{ fasa}} = 4,44 \cdot N \cdot f \cdot \phi \cdot k_w \quad (5)$$

Dan dengan fluks per kutub (**Deshapande, 2010; Duan, 2010**).

$$\phi = B \frac{\pi \cdot D \cdot L}{p} \quad (6)$$

Selain faktor belitan dan tegangan induksi, faktor luas penampang konduktor, diameter konduktor dan jumlah tembaga sangat berpengaruh pada penurunan tegangan. Maka untuk luas penampang konduktor di dapatkan

$$\alpha_s = \frac{I_p}{\delta_s} \quad (7)$$

Diameter konduktor (**Duan, 2010**).

$$D_B = 2 \cdot x \sqrt{\frac{\alpha_B}{\pi}} \quad (8)$$

Dengan jumlah Konduktor

$$Z_s = 6N \quad (9)$$

Rugi-rugi pada motor induksi digambarkan dalam diagram aliran daya motor induksi. berdasarkan diagram aliran daya motor induksi terdapat beberapa rugi-rugi yang terjadi diantaranya (**Chapman, 1985**).

Rugi-rugi *air gap* (P_{AG}) atau celah udara antara stator dan motor induksi 3 fasa dengan persamaan

$$P_{AG} = P_{in} - P_{SCL} - P_{core} \quad (10)$$

Rugi-rugi konversi antara daya elektrik dan daya mekanik (P_{conv}) pada motor induksi dengan persamaan

$$P_{conv} = P_{AG} - P_{RCL} \quad (11)$$

Rugi-rugi rotasi pada saat motor berputar (P_{rot}) dengan persamaan

$$P_{rot} = P_{core} - P_{F\&W} - P_{misc} \quad (12)$$

Dengan adanya rugi-rugi pada motor induksi, maka daya input tidak akan sama dengan daya output pada motor induksi. Dengan demikian daya output motor induksi dapat dicari dengan persamaan

$$P_{out} = P_{conv} - P_{F\&W} - P_{misc} \quad (13)$$

2.2 Studi Kasus

Untuk memahami objek yang diteliti dalam hal ini adalah motor induksi 3 fasa maka diperlukan parameter spesifikasi motor induksi awal. Motor yang digunakan adalah motor induksi dengan jenis rotor sangkar seperti pada Gambar 2 .



Gambar 2. Rotor sangkar motor induksi 3 fasa

Nameplate motor induksi dapat dilihat pada Tabel 1 berikut

Tabel 1. Nameplate motor induksi 3 fasa

Parameter	Nilai
Rating tegangan	Δ/Y 220V/380V
Daya Output	0,55 KW
Rating Arus	2,85A/1,65A
Power Factor	0,75
Kecepatan Putaran	1390 rpm
Jumlah Kutub	4 poles
Insulation Class (Is)	B
Index Protection (IP)	44
Type	AM 80 KY 4

Dengan parameter awal seperti ditunjukkan oleh Tabel 2.

Tabel 2. Parameter motor induksi awal

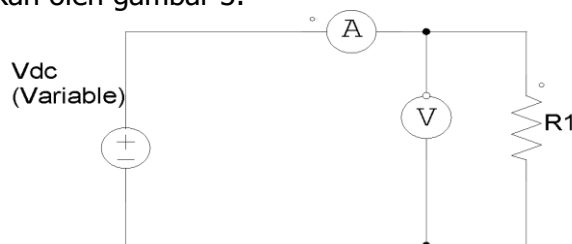
Parameter	Nilai
Tegangan Fasa	220V
Daya Output	0,55 KW
Rating Arus	1,65A
Jumlah Kutub	4
Jumlah Slot Stator	24 slot
Diameter tembaga	0,47 mm
Diameter inti stator	101,35 mm
Panjang inti stator	111,15 mm
Jumlah lilitan per kutub per fasa	125

2.3 Prosedur Pengujian Motor Induksi 3 Fasa

Untuk mengetahui performa motor induksi 3 fasa setelah *rewinding*, maka diperlukan pengujian atau pengetesan pada motor induksi. Adapun beberapa pengujian yang dilakukan, diantaranya adalah

1. Pengujian DC

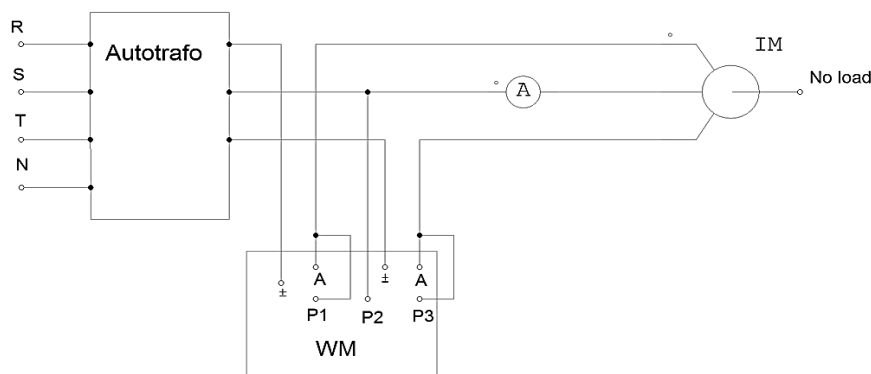
Dilakukan untuk mengetahui besar resistansi pada belitan stator. Dengan rangkaian pengujian ditunjukkan oleh gambar 3.



Gambar 3. Rangkaian pengujian DC

2. Tes Beban Nol (*No load Test*)

Dilakukan untuk menghitung rugi-rugi pada saat tanpa beban. Gambar 4 berikut adalah yang dimaksud

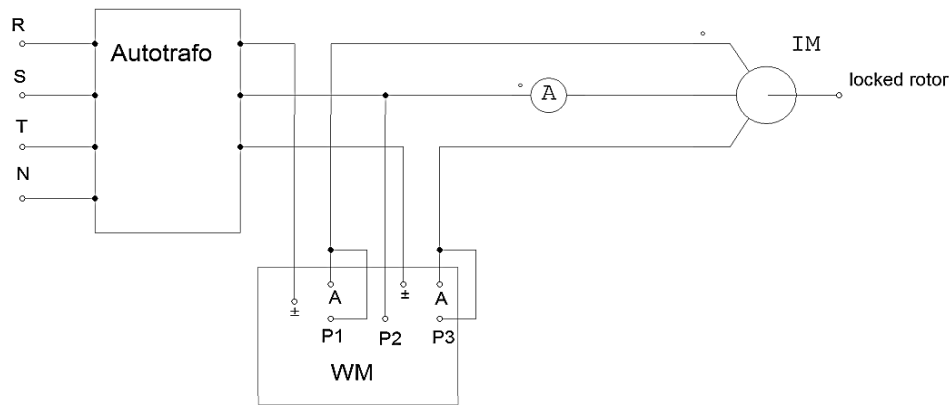


Gambar 4. Rangkaian pengujian beban nol

3. Tes Hubung Singkat (*Locked Rotor Test*)

Pada pengujian ini, rotor ditahan agar tidak bergerak lalu dilakukan pencatatan tegangan, arus dan daya. Gambar 5 adalah rangkaian *locked rotor*.

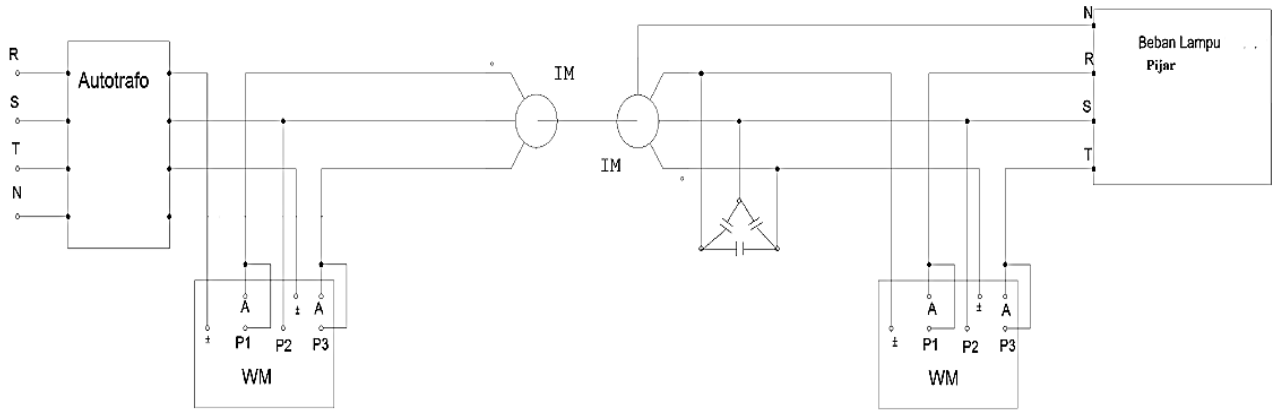
Penurunan Rating Tegangan Terpasang dari 380V_{ac} Menjadi 120V_{ac} dengan Melilit Ulang Belitan Stator pada Motor Induksi 3 Fasa



Gambar 5. Rangkaian pengujian *locked rotor*

4. Tes Pembebanan

Pada pengujian ini, motor dikopel dengan generator induksi untuk menyalakan beban lampu dengan rangkaian seperti ditunjukkan oleh Gambar 6 berikut



Gambar 6. Rangkaian pengujian pembebanan

3. PENGUJIAN DAN ANALISIS

3.1 Perhitungan dengan Desain Tegangan 70 V

Dalam melakukan *rewinding* pada belitan motor induksi 3 fasa, perlu diketahui beberapa parameter awal sebagai penunjang perancangan, diantaranya adalah faktor distribusi sebesar 0,999 dan faktor kisar sebesar 0,966. Dengan demikian didapatkan faktor belitan (k_w) sebesar 0,965.

Motor induksi A (sebelum *rewinding*) memiliki 125 lilitan, dengan demikian total lilitan pada motor induksi A adalah 1500 lilitan, maka lilitan per fasa adalah 500 lilitan, dengan jumlah konduktor adalah 3000 konduktor. Dengan demikian besarnya fluks dapat diketahui dengan mensubstitusikan persamaan 5, sehingga besar fluks per kutub adalah $2,054 \times 10^{-3}$ Weber.

Tujuan dari perancangan ini adalah untuk menurunkan rating tegangan pada motor induksi guna untuk aplikasi kendaraan listrik. Solusi yang dilakukan adalah dengan melilit ulang kumparan belitan motor induksi (*rewinding*), dengan tegangan sebelumnya $220 V_{1\phi}$ menjadi $70 V_{1\phi}$.

Dengan menurunkan tegangan menjadi 70 V, maka parameter arus akan mengalami kenaikan, dengan persamaan

$$3V_a I_a = 3V_b I_b$$

$$I_b = \frac{V_a}{V_b} x I_a = \frac{220}{70} x 1.65 = 5,2 A$$

Kenaikan arus mencapai empat kali lipat dari arus sebelumnya. Solusi untuk mengatasinya adalah dengan memperbesar diameter konduktor pada setiap slot.

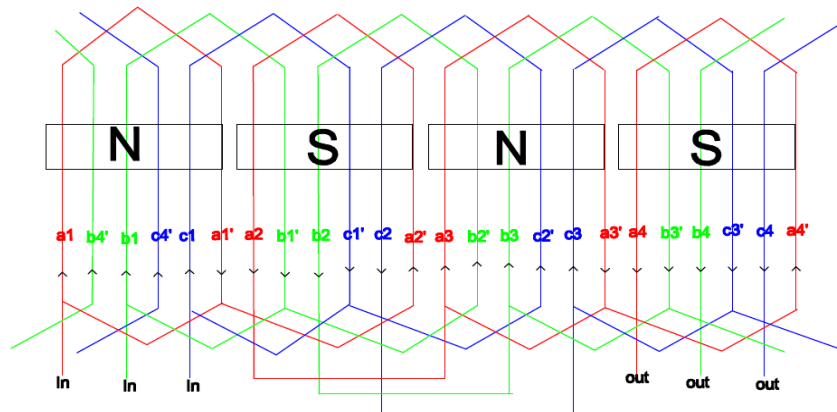
Perlu diperhatikan bahwa belitan stator motor induksi sebelumnya tersusun dari satu kawat konduktor berdiameter 0,47 mm, karena di pasaran tidak ada konduktor ukuran 0,47 mm maka dibulatkan menjadi 0,5 mm, konduktor berukuran 0,5 mm mempunyai *rating* arus (I_p) sebesar 0,304A dengan luas penampang $\alpha = 0,200\text{mm}^2$ dan mempunyai kerapatan arus sebesar $\delta = 1,52 A / \text{mm}^2$ (**Chapman, 1985**).

Berdasarkan persamaan 7, akan didapatkan jumlah konduktor dengan luas penampang 0,63 mm^2 dan dengan menggunakan persamaan 8 akan didapatkan diameter konduktor sebesar 0,89 mm. Penurunan tegangan dapat dilakukan dengan cara mengubah ukuran konduktor pada lilitan motor induksi tanpa mengubah rating daya. Tabel 3 adalah data motor induksi setelah dilakukan penggulangan ulang pada kumparan stator.

Tabel 3. Parameter motor induksi setelah *rewinding*

Parameter	Nilai
Tegangan Fasa	70V
Daya <i>Output</i>	0,55 KW
Rating Arus	5,2A
Jumlah Kutub	4
Jumlah Slot Stator	24 slot
Diameter tembaga	0,89 mm
Luas penampang tembaga	0,63 mm^2
Diameter inti stator	101,35 mm
Panjang inti stator	111,15 mm
Jumlah lilitan per kutub per fasa	40 lilitan

Belitan yang digunakan adalah jenis belitan gelung seperti Gambar 7 berikut (**Kanakaraj dkk, 2011; Sarjan, 2011**).



Gambar 7. Diagram belitan stator

Belitan gelung pada Gambar 7 dapat direpresentasikan pada motor induksi 3 fasa seperti Gambar 8 (a) pada saat melakukan *rewinding* dengan kabel *input* dan *output* yang menjulang keluar serta Gambar 8 (b) adalah gambar pada saat proses *rewinding* telah selesai dilakukan.



Gambar 8 (a) Saat *rewinding* Gambar 8 (b). Setelah *rewinding*
Gambar 8. Belitan stator motor induksi yang dilakukan *rewinding*

3.2 Hasil Pengujian Motor Induksi 3 fasa

Untuk mengetahui performa motor induksi 3 fasa setelah *rewinding* maka dilakukan beberapa pengujian diantaranya *DC test*, *no load test*, *locked rotor test* dan pembebanan. Pengujian ini dilakukan dengan terhubung bintang. Tabel 4 adalah data pengujian DC pada motor induksi 3 fasa.

Tabel 4. *DC Test*

<i>DC Test</i>		
V	I	R
1,57 V	1,08 A	1,07 Ω
3,01 V	2,81 A	1,071 Ω
4,5 V	3,95 A	1,13 Ω
5,1 V	4,55 A	1,12 Ω
6,24 V	5,89 A	1,05 Ω
R_{tot}		$= \frac{5,441}{5} = 1,0882 \Omega$

Pengujian hubung singkat atau *locked rotor test* ditunjukkan oleh Tabel 5.

Tabel 5. *Locked Rotor Test*

<i>Locked Rotor Test</i>	
V_{LN}	15,55 V
V_{LL}	28,75 V
I	5,18 V
P	130 W

Pengujian tanpa beban dilakukan sebanyak 5 kali dengan beberapa variasi tegangan. Tabel 6 adalah data pengujian tanpa beban pada motor induksi 3 fasa.

Tabel 6. *Test Tanpa Beban*

<i>NO LOAD</i>				
V_{LN}	V_{LL}	I	P	n_m
30,35 V	55,2 V	1,73 A	30 W	1498 rpm
45,9 V	80,1 V	2,81 A	50 W	1498 rpm
52,3 V	93,4 V	3,5 A	70 W	1499 rpm
62,5 V	110,6 V	5,01 A	130 W	1498 rpm
70,2 V	124,6 V	7,46 A	280 W	1498 rpm

Pengujian pembebanan dilakukan dengan beberapa variasi beban dan diperoleh data seperti ditunjukkan Tabel 7.

Tabel 7. Test Pembebanan

Pembebanan									
$V_{LN(m)}$	$V_{LL(m)}$	I_m	n_m	P_{in}	I_g	$V_{LN(G)}$	$V_{LL(G)}$	n_G	P_{beban}
60,1 V	105,09 V	5,00 A	1482 rpm	320 W	1,00 A	246,8 V	414 V	1443 rpm	20 W
61,5 V	105,59 V	5,21 A	1476 rpm	380 W	0,87 A	221,5 V	374,8 V	1398 rpm	80 W
63,12 V	110,23 V	5,3 A	1471 rpm	400 W	0,76 A	192,8 V	325,9 V	1358 rpm	120 W
64,9 V	114,5 V	5,55 A	1470 rpm	420 W	0,64 A	163,3 V	277,9 V	1368 rpm	140 W
64,9 V	114,52 V	5,58 A	1473 rpm	420 W	0,49 A	134,6 V	230,5 V	1345 rpm	160 W

Pada saat pengujian, tegangan supply diatur oleh autotrafo yang dipasang langsung ke motor. Pada saat melakukan pembebanan, motor induksi 3phasa dikopel dengan generator induksi menggunakan belt yang dipasang pada *pulley* motor. Serta dipasang kapasitor untuk *mensuply* daya reaktif ke beban.

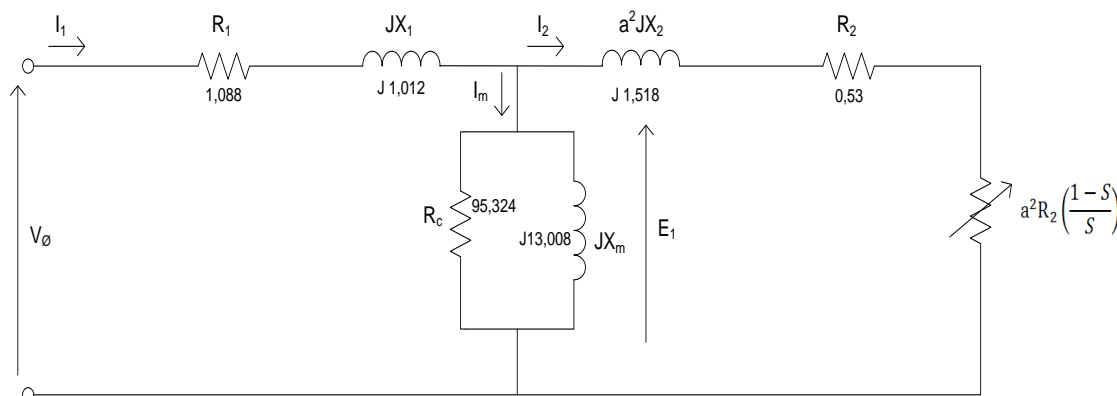
3.4 Hasil Perhitungan Motor Induksi 3 phasa

Pengujian performa motor induksi 3 fasa dilakukan dengan mengukur resistansi stator, pengujian tanpa beban, hubung singkat serta pembebanan. Berdasarkan dari hasil pengukuran, dilakukan beberapa proses perhitungan untuk mendapatkan nilai rangkaian *ekivalen* motor induksi 3 fasa. Didapatkan hasil seperti Tabel 8 berikut.

Tabel 8 Parameter Rangkaian Ekivalen

Parameter	Nilai
R_1	1,0882 Ω
X_1	1,012 Ω
X_2	1,518 Ω
R_2	0,53 Ω
X_m	13,008 Ω
R_c	95,324 Ω

Dengan mengetahui parameter-parameter diatas dapat digambarkan rangkaian pengganti per fasa motor induksi 3 fasa seperti ditunjukkan oleh Gambar 9 (*Chapman, 1985; Zuhal, 1997*).



Gambar 9. Rangkaian Ekivalen motor induksi 3 fasa setelah *rewinding*

3.5 Torka Motor Induksi 3 Fasa

Suatu persamaan torka pada motor induksi dapat dihasilkan dengan bantuan teori rangkaian Thevenin. Dengan parameter rangkaian ekuivalen yang di dapatkan hasil perhitungan torka seperti ditunjukkan oleh Tabel 9.

Tabel 9. Parameter perhitungan torka

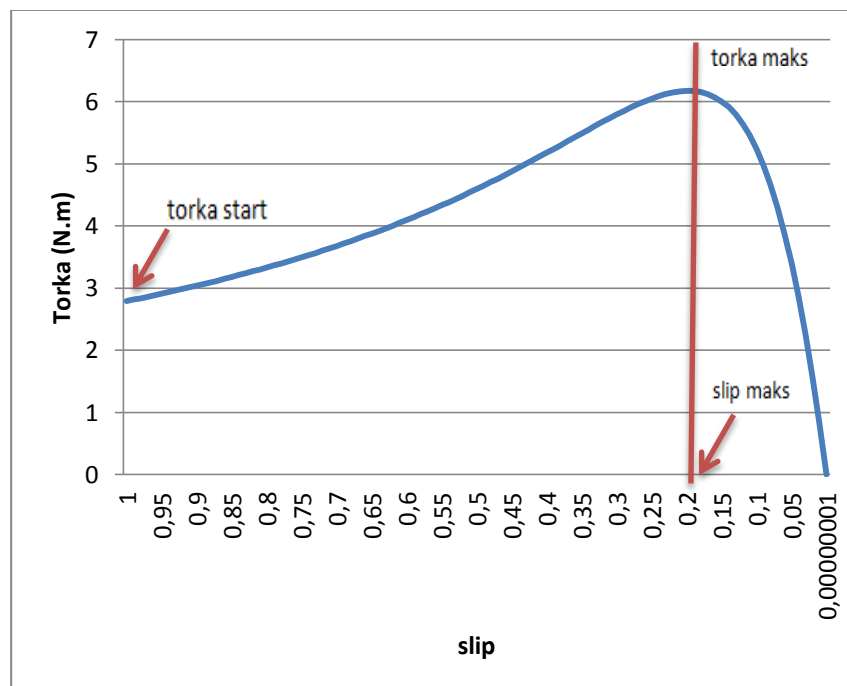
Parameter	Nilai
V_{TH}	48,34 V
R_{TH}	0,93 Ω
X_{TH}	1,0 Ω
ω_{sync}	157 rad/s
n_{sync}	1500 rpm

Dengan mengetahui V_{TH} dan Z_{TH} maka didapatkan nilai torka motor induksi 3 fasa seperti pada Tabel 10.

Tabel 10. Hasil perhitungan torka

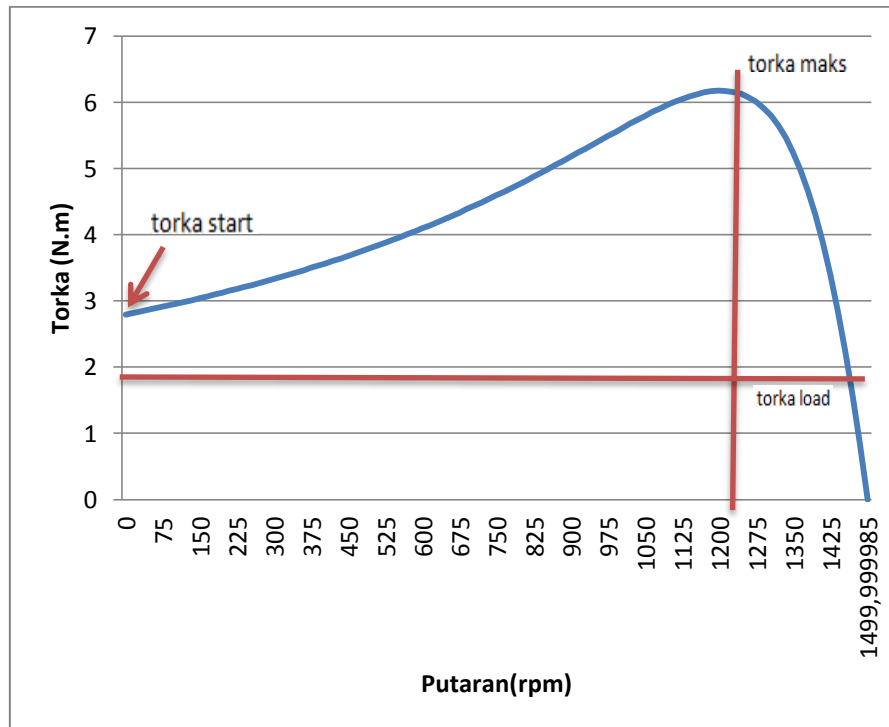
Parameter	Nilai
Torka Induksi	0,113 N.m
Torka Starting	2,79 N.m
Torka Beban	1,8 N.m
Torka Maksimum	6,17 N.m
Slip Maksimum	0,2

Berdasarkan pengukuran dan perhitungan, Gambar 10 adalah grafik torka terhadap slip yang diperoleh.



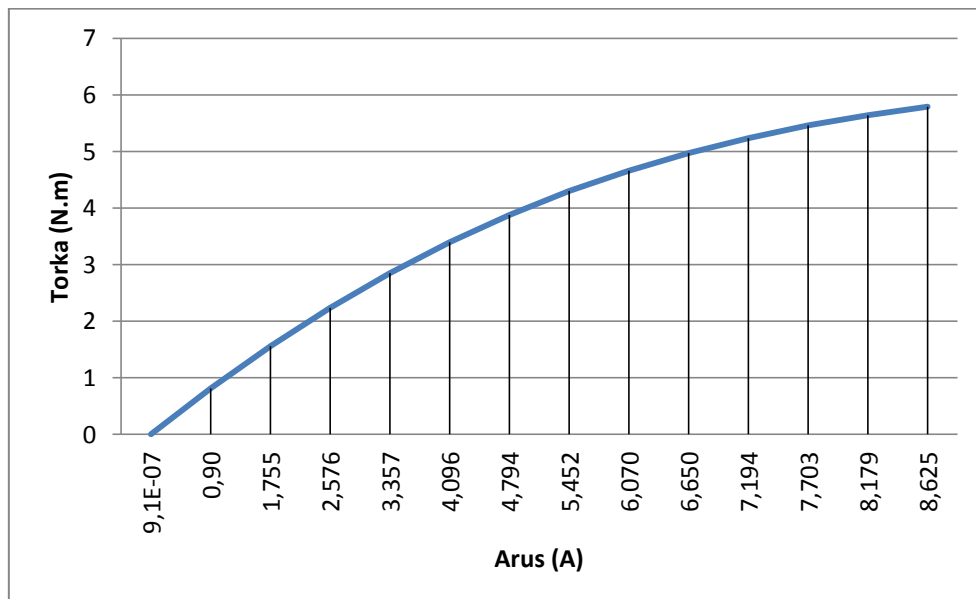
Gambar 10. Grafik torka terhadap slip

Torka *starting* adalah sebesar 2,79 Nm. Pada saat *starting*, torka belum dipengaruhi oleh adanya slip. Torka maksimum (*pullout torque*) adalah sebesar 6,17 Nm pada saat nilai slip maksimum sebesar 0,2.



Gambar 11. Grafik torka terhadap putaran

Gambar 11 adalah grafik antara torka terhadap putaran. Torka starting pada nilai 2,79 Nm dan kecepatan motor dalam keadaan nol (baru akan berputar) karena pada saat *starting* nilai slip = 1 Saat slip semakin mendekati nol maka putaran motor akan mencapai kecepatan sinkron dan torka beban sebesar 1,8 Nm.



Gambar 12. Grafik torka terhadap arus

Gambar 12 adalah grafik antara torka terhadap arus. Grafik di atas menunjukkan bahwa seiring dengan adanya kenaikan arus pada motor maka torka yang dihasilkan akan semakin tinggi.

3.6 Analisis

Penurunan rating tegangan pada motor induksi 3 fasa dilakukan pada keadaan motor yang telah rusak. *Rating* tegangan awal adalah 220 V dan diturunkan menjadi 70 V. Penurunan tegangan dilakukan dengan cara melilit ulang belitan stator pada motor induksi 3 fasa. Penurunan tegangan dapat terealisasi dengan baik sehingga motor induksi 3 fasa dapat kembali berputar dengan desain *rating* tegangan yang baru.

Untuk mengetahui performa motor induksi dengan tegangan 70V maka dilakukan beberapa pengujian yang menunjang diantaranya pengujian rangkaian DC, pengujian beban nol, pengujian hubung singkat dan pengujian pembebanan. Pengujian rangkaian DC dilakukan untuk mengetahui besar resistansi atau tahanan pada stator motor induksi, dimana besar resistansi diperoleh adalah 1,0882 Ω.

Berdasarkan diagram aliran daya $P_{in} \neq P_{out}$ hal ini disebabkan karena adanya rugi-rugi aliran daya pada motor induksi. Rugi-rugi atau *losses* yang terjadi pada motor induksi meliputi rugi-rugi lilitan stator (P_{SCL}), rugi-rugi inti (P_{core}), rugi-rugi celah udara (P_{AG}), rugi-rugi besi rotor (P_{RCL}), dan rugi-rugi mekanik (P_{conv}). Berdasarkan data pengukuran dan persamaan 10-13, *losses* yang terjadi pada motor induksi ditunjukkan oleh Tabel 11 (**Chapman, 1985**).

Tabel 11. Rugi-rugi yang terjadi Pada Motor

No	Rugi-rugi	Nilai
1	P_{SCL}	81,94 W
2	P_{AG}	338,06 W
3	P_{RCL}	6,08 W
4	P_{conv}	331,98 W
5	P_{rot}	48,06 W
6	P_{out}	283,92 W

Dengan mengetahui besar daya output pada motor induksi, maka diketahui torka beban sebesar 1,8 Nm dan efisiensi motor sebesar 67,6%. Besar efisiensi mempengaruhi performa motor induksi secara keseluruhan. Untuk mengetahui perbandingan performa motor induksi sebelum *rewinding* dan setelah *rewinding* maka dilakukan pendekatan secara perhitungan dan pengukuran. Tabel 12 menunjukkan hasil daya output pada motor induksi 3 fasa berdasarkan perhitungan.

Tabel 12. Daya motor berdasarkan perhitungan

Berdasarkan Perhitungan					
Sebelum <i>Rewinding</i>			Desain Tegangan 70 V		
P_{in}	P_{out}	η	P_{in}	P_{out}	η
814,49 W	550 W	67,53%	819 W	550 W	67,15% W

Berdasarkan efisiensi yang didapatkan dari hasil pendekatan perhitungan, terdapat penurunan efisiensi pada motor induksi 3 fasa. Seiring dengan terjadinya penurunan efisiensi, daya *output* pada motor juga akan mengalami penurunan. Dengan demikian maka

dilakukan pengujian kembali dimana motor dikopel dengan generator yang dipasang kapasitor tanpa mengambil beban lampu, dengan hasil seperti Tabel 13.

Tabel 13. Pengukuran Kapasitas Daya Output

Pengukuran Kapasitas Daya Output						
V_{LN}	V_{LL}	I	P_{in}	n_m	P_{out}	pf
70,5 V	122,52 V	6,98 A	570 W	1498 rpm	433,51 W	0,43

Dari hasil pengukuran diatas, maka didapatkan nilai daya output berdasarkan perhitungan diagram aliran daya sebesar $P_{out} = 433,51$ Watt. Dapat dikatakan bahwa daya *output* setelah *rewinding* tidak sama dengan sebelumnya atau mengalami penurunan sebesar 25%. Hal ini dikarenakan adanya rugi-rugi yang terjadi pada motor. Berdasarkan *Loss for motor test in the EASA/AEMT study*, rugi-rugi untuk motor induksi ditunjukkan oleh Tabel 14 (**Electrical Apparatus Association, 2003**).

Tabel 14. Loss for motor test in the EASA/AEMT Study

Losses	2 pole average	4 pole average	Design factors affecting losses
<i>Core losses (W_c)</i>	19%	21%	<i>Electrical steel, air gap, saturation, supply frequency, condition of interlaminar insulation</i>
<i>Friction and Windage Losses (W_{fw})</i>	25%	10%	<i>Fan efficiency, lubrication, bearings, seals</i>
<i>Stator I^2R losses (W_s)</i>	26%	34%	<i>Conductor area, mean length of turn, heat dissipation</i>
<i>Rotor I^2R losses (W_r)</i>	19%	21%	<i>Bar and end ring area and material</i>
<i>Stray load losses (W_l)</i>	11%	14%	<i>Manufacturing processes, slot design, air gap, condition of air gap surfaces and end laminations</i>

Dari studi di atas, ditunjukkan bahwa banyak faktor yang mempengaruhi performa motor setelah dilakukan *rewinding* diantaranya adalah luas penampang konduktor dan diameter konduktor yang bertambah semakin besar, kondisi isolasi interlaminar yang tidak sebaik sebelumnya serta pelumasan pada konduktor yang kurang baik. Faktor-faktor yang terjadi dapat menyebabkan kondisi *air gap* atau celah udara pada motor akan semakin besar sehingga akan terjadi *losses* yang lebih besar. Seperti banyak terjadi pada motor listrik kapasitas besar (30 hp atau 22,5 kW) yang dilakukan *repair/rewound* akan mengalami penurunan efisiensi sebesar 1-5% (**Electrical Apparatus Association, 2003**)

Akan tetapi secara keseluruhan, dari pengujian yang dilakukan performa motor induksi dengan desain tegangan sebesar 70V masih sangat baik dan layak untuk digunakan terutama untuk aplikasi kendaraan listrik, mengingat rugi-rugi dan kehilangan daya masih dalam batas wajar.

KESIMPULAN

KESIMPULAN

Dari penelitian ini, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Penurunan rating tegangan pada motor induksi 3 fasa dilakukan dengan cara menggulung atau melilit ulang belitan stator motor induksi. Tegangan diturunkan menjadi 70V dari tegangan awal sebesar 220 V. Dengan rating tegangan 70 V, motor induksi 3phasa memiliki jumlah lilitan 40 lilitan per kutub fasa dengan *rating* arus naik menjadi 5,2A serta diameter tembaga 0,89 mm dengan luas penampang $0,63 \text{ mm}^2$. Belitan yang digunakan adalah jenis belitan gelung atau spiral.
2. Untuk mengetahui performa motor induksi 3 fasa setelah penurunan tegangan, maka dilakukan pengujian rangkaian DC, beban nol, hubung singkat dan pembebanan. Dengan melakukan pengujian, maka didapatkan nilai torka. Besarnya torka pada umumnya berbanding lurus dengan besar slip. Pada pengujian beban nol, slip yang dihasilkan sebesar 0,001333 sehingga torka induksi yang dihasilkan motor sebesar 0,156 Nm. Demikian pula yang terjadi pada torka beban, slip yang dihasilkan sebesar 0,018 sehingga torka beban yang dihasilkan lebih besar dibandingkan torka induksi yaitu sebesar 1,8 Nm. Pada saat torka telah mencapai keadaan *pullout torque* atau dalam keadaan torka maksimum maka torka tidak akan bertambah besar dan selanjutnya akan mengalami keadaan saturasi. Besarnya torka maksimum adalah 8,71 Nm pada slip maksimum sebesar 0,2.
3. Rugi- rugi yang terjadi pada motor adalah terdapat rugi-rugi belitan stator P_{SCL} sebesar 81,94W, rugi-rugi celah udara (*gap*) sebesar 338,06W, rugi-rugi tembaga rotor sebesar 6,08W, rugi-rugi mekanik sebesar 331,98W serta rugi-rugi rotasi yang mencakup rugi-rugi inti, *friction and windage* dan *stray* adalah sebesar 48,06 W. Dengan demikian didapatkan P_{out} pada motor adalah 283,92W, dengan daya *input* yang terukur sebelumnya adalah 420 W. Efisiensi motor induksi 3 fasa adalah 67,6%. Dengan *losses* pada generator induksi adalah P_{rot} sebesar 38,15W dan P_{copper} sebesar 11,85 W.
4. Berdasarkan pengukuran dan perhitungan yang dilakukan pada motor induksi 3 fasa dengan desain tegangan 70 V, terjadi penurunan daya *output* sebesar 25% dari daya sebelumnya. Tetapi secara keseluruhan, performa motor induksi 3 fasa dengan desain tegangan $70 V_{LN}$, $120 V_{LL}$ masih sangat baik dan layak untuk digunakan terutama untuk aplikasi kendaraan listrik, mengingat rugi-rugi yang timbul masih dalam batas wajar dan efisiensi yang dihasilkan tidak terlalu kecil.

DAFTAR RUJUKAN

- Chapman, Stephan J. (1985). *Electric Machinery Fundamental*, Singapura: McGraw Hill.
- M.V. Deshapande. (2010). *Design and Testing of Electrical Machines*, New Delhi: PHI Learning Privat Limited. ISBN-978-81-203-3645-2
- Aglan Tarek Samir Eng, Ashour Ahmed Hamdy, (2012). *Reduced Voltage and Combined AC Motor and Drive System for Safe Electric Vehicle*. First International Conference on Renewable Energies and Vehicular Technology : Miami, Alexandria.
- Kanakaraj J, Sumanthi A, Balasubramanian P, Krishnakumar R, Nagarajan Sampath. (2011). *Electrical Machine and Appliances Theory, Second Year*, Tamil Nadu Textbook Corporation college Road, Chennai

- Duan, Yao. (2010). *Method for Design and Optimization of Surface Mount Permanent Magnet Machines and Induction Machines*. Georgia Institut of Technology.
- Electrical Apparatus Service Association. (2003). *The effect of Repair/Rewinding on Motor Efficiency EASA/EAMT Rewind Study*. New York, England : St Louis Missouri
- VTU Learning. *Design of Induction Motor*, Unit 6.
- Sarjan, Muhammad. (2011). *Perbandingan Karakteristik Motor Induksi Belitan Gelung dengan Belitan Spiral*. Jurnal Ilmiah Foristek vol 1 no 1: Universitas Tadulako.
- Zuhal, (1997). *Dasar Tenaga Listrik*, Bandung : Institut Teknologi Bandung