

ANALISIS KETIDAKSEIMBANGAN TEGANGAN DAN KENAIKAN SUHU PADA MOTOR INDUKSI 3 FASA AKIBAT GANGGUAN *SINGLE-PHASING*

Alam Afif Makarim^{*)}, Tejo Sukmadi, and Bambang Winardi

Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro, Semarang
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*)}E-mail: karim.alamafif@gmail.com

Abstrak

Pada motor induksi 3 fase, akibat kurang perawatan dan lingkungan yang buruk, dapat menyebabkan salah satu fase statornya menjadi rusak dan tidak berfungsi. Hal ini menimbulkan gangguan *single-phasing* yang menyebabkan ketidakseimbangan tegangan dan kenaikan suhu pada motor. Tulisan ini menganalisis ketidakseimbangan tegangan dan kenaikan suhu yang terjadi pada motor induksi 3 fase ketika terjadi gangguan *single-phasing* dalam kondisi beban nol dan berbeban dengan menggunakan pembebanan *prony brake*. Oleh karena itu perlu dianalisa pengaruh gangguan *single-phasing* terhadap ketidakseimbangan tegangan dan kenaikan suhu dari kondisi normalnya. Dari hasil penelitian didapatkan akibat terjadinya *single-phasing* menimbulkan ketidaksetimbangan tegangan sebesar 3,64% pada kondisi beban nol hingga 6,30% pada kondisi beban penuh. Nilai daya keluaran pada kondisi *single-phasing* lebih besar dibandingkan dengan kondisi normalnya pada variasi yang sama, dimana daya keluaran saat *single-phasing* bernilai 36,46 W hingga 573,62 W, sedangkan pada kondisi normal bernilai 34,06 W hingga 417,04 W. Efisiensi saat *single-phasing* bernilai 21% hingga 70%, sedangkan pada kondisi normal bernilai 30% hingga 76%. Kenaikan suhu pada motor ketika kondisi beban nol sebesar 35,40°C, dan pada kondisi berbeban sebesar 57,74°C (83,819% beban penuh) dengan suhu pada kondisi normalnya bernilai 28°C.

Kata Kunci : motor induksi 3 fasa, *single-phasing*, ketidakseimbangan tegangan, kenaikan suhu

Abstract

In the 3-phase induction motor, due to the lack of maintenance and poor environment, can cause one phase stator becomes damaged and not functioning. This raises a single-phasing disorders that cause an unbalance voltage and motor temperature rise. This paper analyzes the unbalance voltage and the temperature rise that occurs in 3-phase induction motor when there is disruption single-phasing in zero load and load conditions using Prony brake loading. It is therefore necessary to analyze the influence of single-phasing interference against unbalance voltage and the temperature rises from its normal condition. From the results, due to the single-phasing unbalance raises the voltage of 3,64% at zero load conditions up to 6,30% at the loading condition. Rated output power at single-phasing condition is greater than the normal conditions in the variation of the same, where the output power of single-phasing is currently worth 36,46 W to 573,62 W, whereas in normal conditions is worth 34,06 W to 417,04 W. Efficiency when single-phasing worth 21% to 70%, whereas in normal conditions is worth 30% to 76%. The temperature rise of the motor when the condition of zero load of 35,40°C, and the load condition of 57,74°C (83,819% of full load) with temperatures in normal conditions is 28°C.

Keywords : 3-phase induction motor, *single-phasing*, voltage unbalance, the temperature rise

1. Pendahuluan

Penggunaan motor induksi 3 fasa semakin banyak digunakan. Hal ini dikarenakan penggunaannya yang mudah, ketahanan yang tinggi, efisiensi yang tinggi dan biaya perawatan yang murah [1]. Motor-motor tersebut ditempatkan pada lingkungan dan kondisi bervariasi yang dapat menimbulkan kerusakan pada bagian-bagian motor [2]. Kerusakan pada motor dapat disebabkan karena

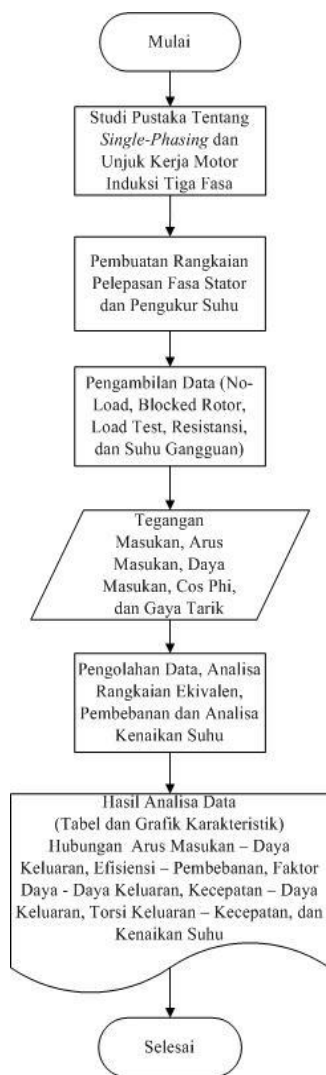
terdapat masalah pada bagian *internal* motor (*short-circuit* pada stator, panas berlebih pada *bearing*, dan lain-lain) atau kerusakan pada bagian *external* motor. Salah satu penyebab dari masalah *external* pada motor induksi 3 fasa adalah terputusnya salah satu fasa yang menimbulkan gangguan *single-phasing* pada motor induksi 3 fasa tersebut [3]. Sebuah kondisi *Single-phasing* pada motor listrik termasuk salah satu kasus terburuk dari ketidakseimbangan tegangan. Kondisi gangguan ini juga

menyebabkan kenaikan arus dan torsi, serta penurunan kecepatan putar. Fauzi [4] menemukan torsi ketika gangguan *single-phasing* meningkat menjadi 0,29 Nm dan kecepatan turun menjadi 1350 rpm pada motor induksi 3 fasa kapasitas 2,2 kW. Kenaikan nilai arus ke motor pada 2 fase yang tersisa secara teoritis meningkat menjadi 1,73 (173%) kali dari kondisi normal motor [5]. Hal ini tentunya akan memberikan pengaruh terhadap kemampuan mesin untuk dapat bekerja optimal. Oleh karena itu perlu dianalisa pengaruh gangguan *single-phasing* terhadap ketidakseimbangan tegangan dan kenaikan suhu dari kondisi normalnya dalam keadaan beban nol dan berbeban dengan menggunakan pembebanan *prony brake* pada motor induksi 3 fasa.

2. Metode

2.1. Flowchart

Diagram alir dari penelitian yang telah dilakukan dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

2.2. Spesifikasi Motor Induksi 3 Fasa

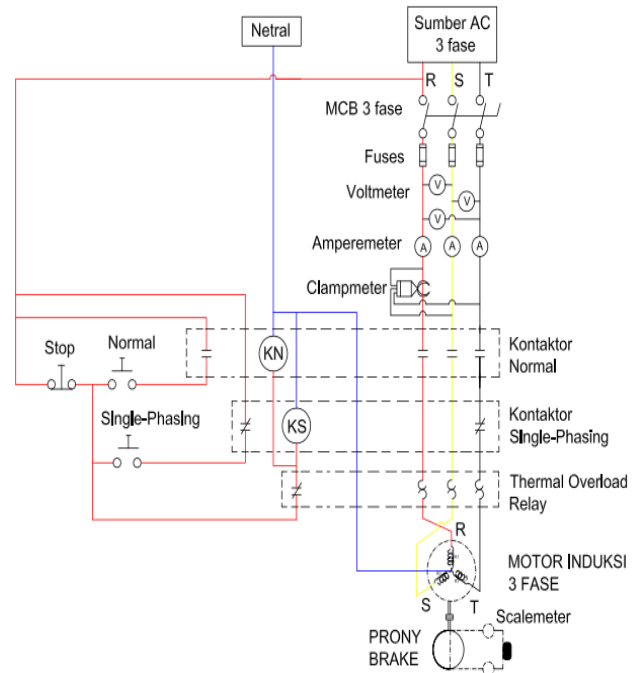
Motor induksi yang digunakan adalah motor induksi 3 fasa 1 HP / 0,75 kW merek Tatung, model TEFC-D80M.

Tabel 1. Spesifikasi motor induksi 3 fasa

Motor Induksi 3 Fasa Tatung D80M	
Output	: 0,75 kW
Poles	: 4
Voltage	: 380 - 415 V (Y)
FL Amps	: 1,9 A
Frequency	: 50 Hz
FL Efficiency	: 72 %
Full Load RPM	: 1400
Maximum Torque	: 420 %

2.3. Rangkaian Percobaan

Percobaan yang dilakukan untuk mengetahui unjuk kerja motor induksi ketika kondisi normal dan *single-phasing* adalah percobaan beban nol, percobaan hubung singkat dan percobaan berbeban [3][6]. Kondisi *single-phasing* didapat dengan menggunakan kontaktor untuk melakukan pelepasan salah satu fase pada rangkaian. Rangkaian percobaan dalam penelitian ini terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Rangkaian Percobaan

Sumber tegangan 3 fasa diambil dari regulator tegangan *Hampden Instrument*. Pengukuran tegangan menggunakan *multimeter* PC-5000, arus menggunakan *tangamper*, daya dan faktor daya menggunakan *clampmeter*, gaya tarikan menggunakan *scalemeter*, kecepatan motor menggunakan *tachometer* digital, sedangkan pengukuran suhu menggunakan mikrokontroler

ATMega16 dan sensor LM 35 yg ditempelkan pada inti stator. Pengukuran pada suhu motor dilakukan selama 10 menit

3. Hasil dan Analisa

3.1. Rangkaian Ekvivalen Motor Induksi

Dengan menggunakan analisis rangkaian ekvivalen, maka didapatkan parameter rangkaian ekvivalen motor induksi 3 fasanya seperti yang tertulis pada Tabel 2. Dalam penelitian ini dilakukan analisis rangkaian ekvivalen pada motor induksi 3 fasa dalam keadaan normal dan dalam keadaan *single-phasing*.

Akibat adanya *single-phasing* pada motor induksi 3 fasa menyebabkan terjadinya penurunan pada nilai X_1 , R_m , X_m , X'_2 , $V_{1,LN}$, dan $V_{1,eq}$, sedangkan kenaikan terjadi pada nilai parameter R'_2 . Adapun nilai R_1 tidak mengalami perubahan.

Tabel 2. Parameter rangkaian ekvivalen motor induksi

Parameter	Normal	Single-Phasing	Keterangan
R_1	10,44 Ω	10,44 Ω	Tahanan stator
X_1	54,86 Ω	44,72 Ω	Reaktansi stator
R_m	1282,56 Ω	531,42 Ω	Resistansi magnetisasi inti
X_m	147,55 Ω	88,21 Ω	Reaktansi ekvivalen inti besi
R'_2	10,30 Ω	12,62 Ω	Tahanan rotor
X'_2	54,86 Ω	44,72 Ω	Reaktansi rotor
$V_{1,LN}$	220 V	211 V	Tegangan <i>line-neutral</i> stator
$V_{1,eq}$	160,16 V	139,59 V	Tegangan ekvivalen rotor

3.2. Analisis Kemampuan Pembebanan Prony Brake

Besarnya daya mekanik yang membebani motor dapat diketahui dengan menggunakan Persamaan 1. Daya mekanik lawan (P_{load}) ini dalam kgf m/s merupakan daya lawan dari beban *prony brake* yang melawan putaran motor induksi. Untuk mendapatkan daya beban perlu dihitung gaya tarikan (F) menggunakan Persamaan 2 dan kecepatan tarik (v) menggunakan Persamaan 3 [7]. Satuan daya mekanik dalam kgf m/s diubah menjadi mekanik hp (metric) yang kemudian dikonversi kedalam W menggunakan Persamaan 4 [8].

$$F = |m_1 - m_2| \text{ dalam kgf} \tag{1}$$

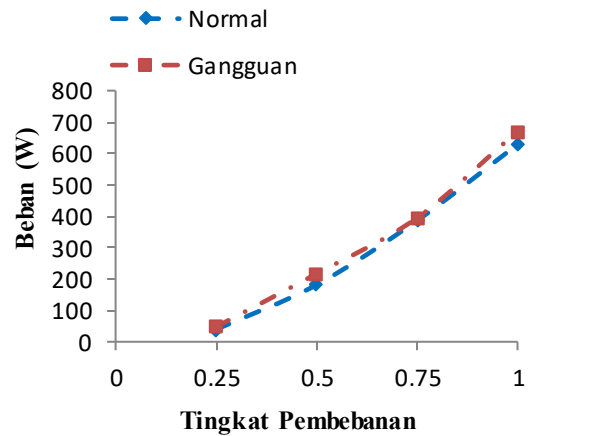
$$v = n_m \cdot 2\pi r \text{ dalam m/s} \tag{2}$$

$$P_{load} = F \cdot v \text{ dalam kgf m/s} \tag{3}$$

$$P_{load} = \frac{(\text{kgf m/s}) \times 735,5}{75} \text{ dalam W} \tag{4}$$

Tabel 3. Hasil perhitungan besar beban *prony brake*

Tingkat Pembebanan	Daya Beban (W)		Beban (%FL)	
	Normal	Single-phasing	Normal	Single-phasing
0,25	39,25	47,67	5,234	6,356
0,5	181,37	216,62	24,183	28,883
0,75	386,04	394,67	51,473	52,623
1	628,64	670,71	83,819	89,428



Gambar 3. Grafik daya beban terhadap variasi putaran

3.3. Analisis Rugi-Rugi Daya

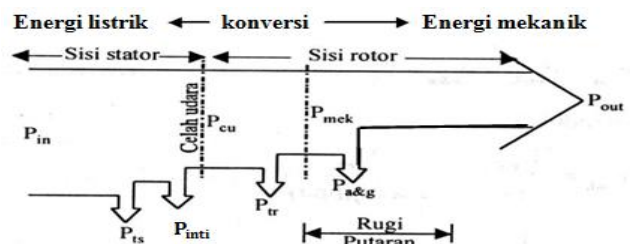
Daya masukan berupa energi listrik dari sumber tegangan yang masuk ke motor diubah menjadi energi mekanik pada poros motor yang diikuti rugi-rugi daya seperti Gambar 4. Dalam proses konversi energi ini akan muncul berbagai rugi-rugi, seperti rugi-rugi tembaga stator (P_{ts}), rugi-rugi inti (P_{inti}), rugi-rugi tembaga rotor (P_{tr}), dan rugi-rugi karena angin dan gesek ($P_{a\&g}$) menggunakan Persamaan 5-8 [6][9].

$$P_{inti} = \frac{V_{1,ln}^2}{R_m} \tag{5}$$

$$P_{a\&g} = P_{NL} - P_{ts} \tag{6}$$

$$P_{ts} = 3 I_1^2 R_1 \tag{7}$$

$$P_{tr} = 3 I_2^2 R'_2 \tag{8}$$



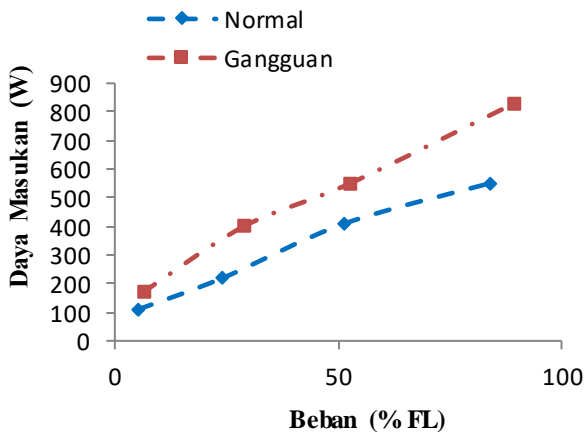
Gambar 4. Aliran daya motor induksi [6]

Tabel 4. Hasil perhitungan rugi-rugi daya kondisi normal

Tingkat Pembebanan (putaran)	Daya Masukan (W)	P_{inti} (W)	P_{ts} (W)	P_{tr} (W)
0,25	110	37,73	37,897	0,312
0,5	220	37,73	41,421	2,579
0,75	410	37,73	56,238	10,024
1	550	37,73	64,945	30,280

Tabel 5. Hasil perhitungan rugi-rugi daya kondisi *single-phasing*

Tingkat Pembebanan (putaran)	Daya Masukan (W)	P_{inti} (W)	P_{ts} (W)	P_{tr} (W)
0,25	170	73,77	81,185	0,128
0,5	400	73,77	89,453	1,154
0,75	550	73,77	125,280	4,136
1	830	73,77	173,745	8,869



Gambar 5. Grafik daya masukan terhadap pembebanan

3.4. Analisis Daya Keluaran dan Efisiensi

Setelah rugi-rugi daya motor induksi didapatkan maka besarnya daya keluaran motor induksi juga bisa didapatkan. Daya keluaran merupakan hasil pengurangan dari daya masukan terhadap rugi-rugi. Besarnya daya keluaran dan efisiensi dihitung menggunakan Persamaan 9 dan 10 [3].

$$P_{Output} = P_{input} - P_{losses} \quad (9)$$

$$\eta = \frac{P_{Output}}{P_{input}} \times 100\% \quad (10)$$

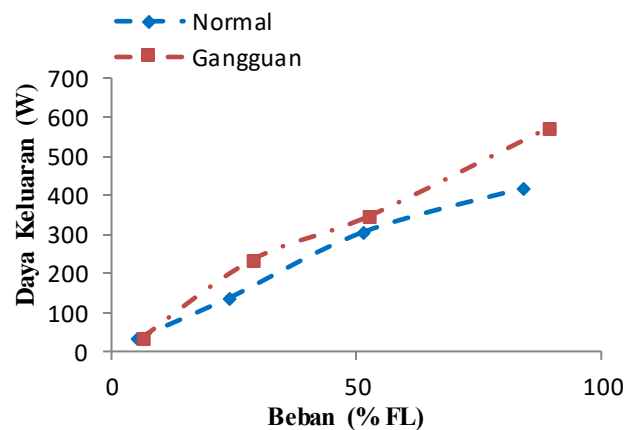
Tabel 6. Hasil perhitungan daya keluaran dan efisiensi kondisi normal

Tingkat Pembebanan	Daya Masukan (W)	Daya Keluaran (W)	Efisiensi (%)
0,25	110	34,061	30,964
0,5	220	138,270	62,850
0,75	410	306,007	74,636
1	550	417,044	75,826

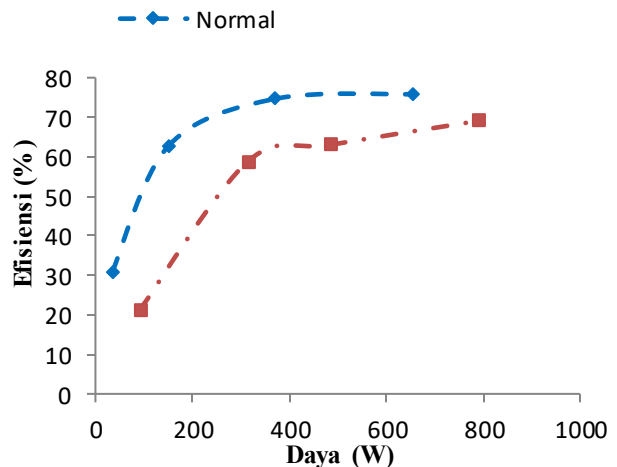
Tabel 7. Hasil perhitungan daya keluaran dan efisiensi kondisi *single-phasing*

Tingkat Pembebanan	Daya Masukan (W)	Daya Keluaran (W)	Efisiensi (%)
0,25	170	36,456	21,445
0,5	400	235,623	58,906
0,75	550	346,814	63,057
1	830	573,616	69,110

daya keluaran dan efisiensi meningkat sebanding dengan pembebanan yang meningkat. Hal ini menunjukkan pembebanan *prony brake* ini masih bisa diterima oleh motor dikarenakan respon motor yang cukup baik dalam menghasilkan daya keluaran.



Gambar 6. Grafik daya keluaran terhadap pembebanan



Gambar 7. Grafik efisiensi terhadap pembebanan

Pada kondisi *single-phasing* nilai daya keluaran lebih besar dibandingkan dengan daya keluaran pada kondisi normalnya, namun nilai efisiensinya lebih kecil dibandingkan dalam kondisi normalnya. Efisiensi yang dihasilkan dalam pembebanan ini pada kondisi normal berada disekitar 30 – 75 %, sedangkan pada kondisi gangguan berada disekitar 21 – 70 %.

3.5. Analisis Torsi Motor Induksi

Setelah daya keluaran motor induksi didapatkan maka besarnya torsi keluaran motor induksi bisa didapatkan. Torsi motor induksi merupakan hasil perkalian antara daya dan konstanta 9,55, lalu dibagi dengan kecepatan putar motor seperti pada Persamaan 11 dan 12 [3]. Nilai torsi beban dan motor pasti akan berbeda. Hal ini dipengaruhi nilai rasio konversi yang diakibatkan rugi-rugi torsi karena gesekan yang terjadi pada pulley.

$$T_{load} = \frac{9,55 P_{load}}{n_m} \tag{11}$$

$$T_{output} = \frac{9,55 P_{output}}{n_m} \tag{12}$$

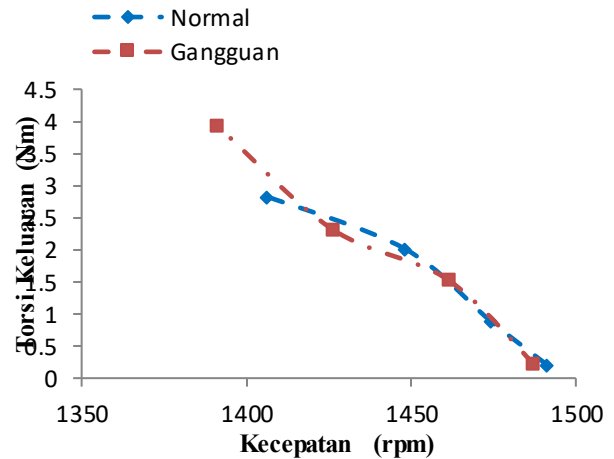
Tabel 8. Hasil perhitungan torsi beban dan motor kondisi normal

Tingkat Pembebanan	Kec. Putar (rpm)	Daya Keluaran (W)	Torsi Beban (Nm)	Torsi Keluaran (Nm)
0,25	1491	34,061	0,251	0,218
0,5	1474	138,270	1,175	0,896
0,75	1448	306,007	2,546	2,018
1	1406	417,044	4,270	2,833

Tabel 9. Hasil perhitungan torsi beban dan motor kondisi single-phasing

Tingkat Pembebanan	Kec. Putar (rpm)	Daya Keluaran (W)	Torsi Beban (Nm)	Torsi Keluaran (Nm)
0,25	1487	36,456	0,306	0,234
0,5	1461	235,623	1,416	1,540
0,75	1426	346,814	2,643	2,323
1	1391	573,616	4,604	3,937

Berdasarkan Tabel 8 dan 9, torsi keluaran motor meningkat cukup signifikan sebanding dengan peningkatan bebannya. Dari tabel terlihat pada kondisi *single-phasing* nilai torsi keluaran mengalami peningkatan. Dengan variasi yg sama Torsi keluaran terkecil sebesar 0,218 Nm pada kondisi normal dan 0,234 Nm pada kondisi *single-phasing*. Sedangkan, torsi keluaran terbesar didapatkan ketika posisi sekrup 1 putara yaitu sebesar 2,833 Nm pada kondisi normal dan 3,937 Nm pada kondisi *single-phasing*. Torsi yang meningkat membuat nilai kecepatan motor semakin menurun. Ketika torsi terbesar tercapai, kecepatan motor hanya 1406 rpm pada kondisi normal dan 1391 rpm pada kondisi *single-phasing*. Sedangkan ketika torsi terendah tercapai, nilai kecepatannya sebesar 1491 rpm pada kondisi normal dan 1487 rpm pada kondisi *single-phasing*.

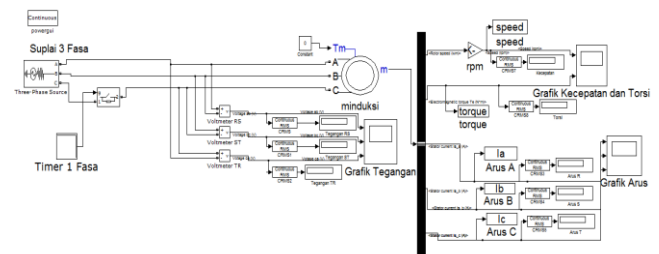


Gambar 8. Grafik torsi keluaran terhadap kecepatan

Gambar 8 menunjukkan bahwa torsi keluaran menurun sebanding dengan penurunan kecepatan. Adanya gangguan *single-phasing* menyebabkan naiknya nilai torsi keluaran namun kecepatan putar motor menjadi menurun.

3.6. Hasil Simulasi Single-Phasing

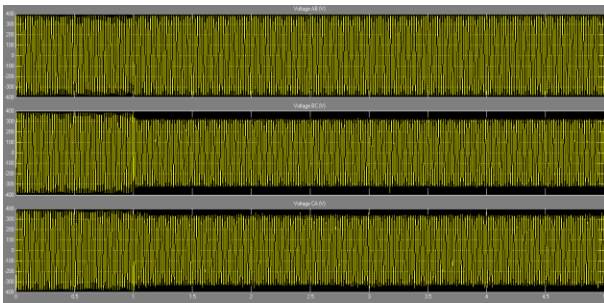
Simulasi dilakukan dengan menggunakan software MATLAB/simulink. Dalam simulasi fase R diwakilkan fase A, fase S diwakilkan fase B, dan fase T diwakilkan fase C.



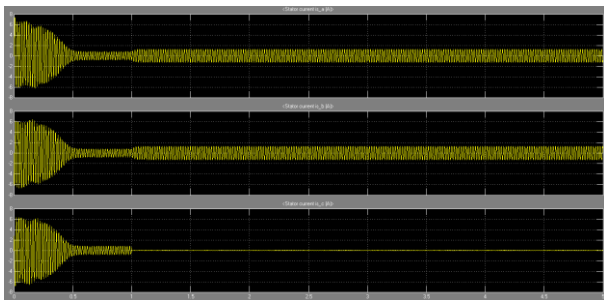
Gambar 9. Rangkaian simulasi gangguan single-phasing

Gangguan *single-phasing* diberikan setelah motor motor mulai bekerja selama 1 detik. Pelepasan terjadi pada fase T. Berikut hasil simulasi gangguan *single-phasing* :

Dari hasil simulasi terlihat ketika fase T terbuka setelah 1 detik motor bekerja yang menyebabkan terjadinya gangguan *single-phasing*, nilai tegangan pada fase RS tidak terjadi penurunan nilai, sedangkan fase ST dan TR mengalami penurunan nilai tegangan.

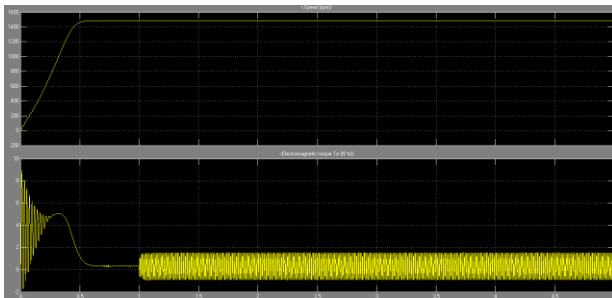


Gambar 10. Hasil simulasi gelombang tegangan fase RS, fase S T, dan fase TR beban nol



Gambar 11. Hasil simulasi gelombang arus fase R, fase S, dan fase T

Dari gambar terlihat akibat gangguan *single-phasing* pada motor menyebabkan naiknya arus pada fase R dan fase S, sedangkan arus pada fase T bernilai nol.



Gambar 12. Hasil simulasi nilai kecepatan dan torsi

Hasil simulasi menunjukkan ketika terjadi gangguan *single-phasing* nilai kecepatan putar rotor mengalami penurunan, sedangkan nilai torsi nya mengalami kenaikan.

3.7. Analisis Kenaikan Suhu

3.7.1. Pengukuran Langsung

Data yang didapat pada kondisi belum beroperasi sebesar 25,9°C, sedangkan ketika dalam beroperasi normal suhu meningkat menjadi 28°C hingga 32,3°C, lalu dilakukan pengukuran dalam kondisi gangguan *single-phasing*. Tegangan masukan sebelum gangguan bernilai 380 V.

Tabel 10. Hasil pengukuran suhu pada inti stator kondisi gangguan *single-phasing*

Beban (%FL)	Tegangan <i>Single-Phasing</i> (V)	Suhu <i>Single-phasing</i> (°C)
0	366	30,7
5,234	366	34,2
24,183	361	37,1
51,473	356	38,1
83,819	354	41

3.6.2. Metode Persentase Ketidak Seimbangan Tegangan

persentase kenaikan suhu pada motor yang terkait dengan ketidakseimbangan tegangan dapat dihitung dengan perhitungan 2 kali kuadrat dari persentase ketidakseimbangan tegangan. Dimana persentase tegangan didapat dari nilai selisih terbesar pengurangan nilai tegangan dengan tegangan rata-ratanya dibagi dengan nilai tegangan rata-rata [5], [10].

$$\%V_{unbalance} = \frac{\text{Selisih Tegangan Terbesar}}{\text{Tegangan Rata-rata}} \times 100 \quad (13)$$

$$\%T_{rise} = 2 \times (\%V_{unbalance})^2 \quad (14)$$

Sehingga nilai suhu pada motor saat mengalami gangguan adalah :

$$\text{Suhu Gangguan} = T_{normal} \times (100\% + \%T_{rise}) \quad (15)$$

Tabel 11. Hasil perhitungan suhu metode persentase ketidakseimbangan tegangan

Beban (%FL)	$V_{unbalance}$ (%)	T_{rise} (%)	Suhu Normal (°C)	Suhu <i>Single-phasing</i> (°C)
0	3,64	26,45	28	35,40
5,234	3,64	26,45	28,3	35,78
24,183	4,61	42,55	30,7	43,76
51,473	5,80	67,28	31,2	52,19
83,819	6,30	79,30	32,2	57,74

semakin besar pembebanan yang diberikan pada motor, maka semakin besar pula suhu saat gangguan pada motor. Nilai suhu akibat *single-phasing* terkecil bernilai 35,40°C, sedangkan suhu terbesar bernilai 57,74°C.

3.6.3. Metode Pengukuran Resistansi

Nilai suhu pada motor ketika mengalami gangguan juga dapat dihitung dengan melakukan pengukuran resistansi pada stator. Dimana resistansi pada stator diukur ketika motor dalam kondisi belum bekerja (R_c) dan setelah motor bekerja ketika mengalami gangguan (R_h) [3]. Perhitungan metode pengukuran resistansi menggunakan persamaan 16.

$$T_h = \left(\left(\frac{R_h}{R_c} \right) \times (K + T_c) \right) - K \quad (16)$$

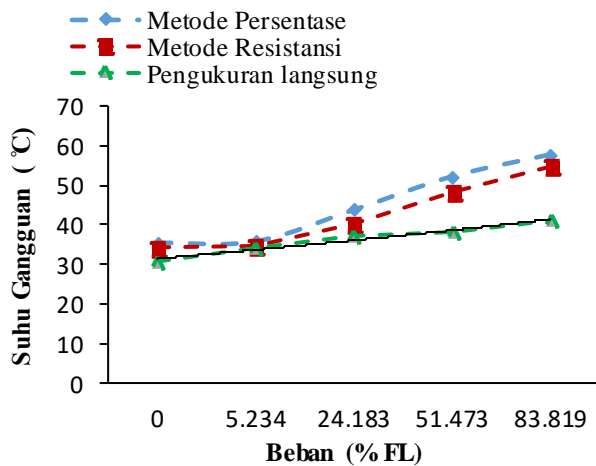
Tabel 12. Hasil perhitungan suhu metode pengukuran resistansi

Beban (%FL)	R _c (ohm)	R _h (ohm)	Suhu Normal (°C)	Suhu single-phasing (°C)
0	10,44	10,69	28	34,29
5,234	10,44	10,7	28,3	34,84
24,183	10,44	10,81	30,7	40,10
51,473	10,44	11,12	31,2	48,51
83,819	10,44	11,32	32,2	54,68

Pada pengukuran resistansi kondisi *single-phasing*, semakin besar pembebanan menyebabkan semakin besar nilai resistansi setelah gangguan terukur. Nilai suhu akibat *single-phasing* terkecil bernilai 34,29°C, sedangkan suhu terbesar bernilai 54,68 °C.

3.6.4. Perbandingan Pengukuran Suhu Pans Motor Akibat Single-Phasing

Dari tabel 10, 11, dan 12, dapat dibuat grafik perbandingan hasil pengukuran suhu panas sebagai berikut :



Gambar 13. Grafik suhu gangguan terhadap resistansi panas motor

Gambar 13 menunjukkan seiring dengan kenaikan beban motor, maka suhu ketika terjadinya gangguan *single-phasing* juga semakin meningkat. Pada metode persentase tegangan, kenaikan suhu didapat nilai 35,40 °C hingga 57,74 °C, metode resistansi didapat kenaikan suhu bernilai 34,29 °C hingga 54,68 °C, sedangkan pengukuran langsung kenaikan suhu didapat nilai 30,7 °C hingga 41 °C.

4. Kesimpulan

Modul pengujian gangguan *single-phasing* pada motor induksi 3 fasa telah dibuat dan dapat berjalan dengan

baik. kondisi *single-phasing* menyebabkan kenaikan daya keluaran, torsi, suhu motor, serta penurunan efisiensi. Daya keluaran saat *single-phasing* bernilai 36,46 W hingga 573,62 W, sedangkan pada kondisi normal bernilai 34,06 W hingga 417,04 W. Efisiensi saat *single-phasing* bernilai 21% hingga 70%, sedangkan pada kondisi normal bernilai 30% hingga 76%. Torsi terendah pada kondisi *single-phasing* bernilai 0,234 Nm dan tertingginya 3,937 Nm, sedangkan kondisi normal didapatkan terendah bernilai 0,218 Nm dan tertingginya 2,833 Nm. Pada percobaan didapatkan kenaikan nilai suhu pada motor dengan metode Pengukuran langsung bernilai 30,7°C hingga 41°C, metode resistansi bernilai 34,29°C hingga 57,74°C, sedangkan metode persentase ketidakseimbangan tegangan didapatkan nilai 35,40°C hingga 57,74°C. Pengembangan dapat dilakukan dengan melakukan perbandingan pembebanan *prony brake* dengan jenis lainnya, misalnya generator listrik dengan kemampuan yang sama sehingga dapat diketahui perbedaan pembebanan secara mekanik dan listrik.

Referensi

- [1]. M.H. Pradipta, “Pengeraman Dinamis Konvensional Pada Motor Induksi Tiga Fasa” *TRANSIENT*, vol. 3, no. 4, hal. 009-015, Des, 2014.
- [2]. M. Y. Chow, “Methodologies of using neural network and fuzzy logic technologies for motor incipient fault detection”, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, Singapore, 1997.
- [3]. Wildi, T. 2002. *Electrical Machines, Drives, and Power System*. Prentice Hall Inc, New Jersey.
- [4]. Fauzi, “Analisa Pengaruh Satu fasa Stator terbuka Terhadap Torsi Dan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa”, Konsentrasi Teknik Energi Listrik, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Sumatra Utara, 2014.
- [5]. Bussmann, “Motor Protection Against Single-Phasing” Bulletin PSP.
- [6]. A.E. Fitzgerald, C. Kingsley Jr, dan S.D. Umans, “Polyphase Induction Machine” dalam *Electric Machinery*, 6th Ed, United States : Mc. Graw Hill, 2003.
- [7]. D. Cardenas, K. Goldvarg, dan C. Moreno, “Dynamometer Test Stand For Aircraft Air Turbine Starter Testing” Tesis, Dept. Mech. and Materials Eng., Florida International University, Florida, United States, 2015.
- [8]. J.E. Shigley, “Machine Element” dalam *Mechanical Engineering Design*, 4th Ed, United States : Mc. Graw Hill, 1983.
- [9]. M. Wijaya, “mesin Induksi” dalam *Dasar-Dasar Mesin Listrik*, Jakarta : Djambatan, 2001.
- [10]. P. Hofmann and P. Pillay, “Derating of Induction Motors Operating with a Combination of Unbalanced Voltages and Over- or Undervoltages”, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol 17, No. 4, Dec 2002 , pp 485-491.