

Studi Pengaruh Ketidakseimbangan Tegangan Suplai Terhadap Kinerja Motor Induksi Tiga Fasa

Rudy Setlabudy, Budi Sudiarto dan Laksito Febiandari

Departemen Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia

Kampus Baru UI, Depok 16424

rudy@eng.ui.ac.id, budi@ee.ui.ac.id, laksito_febiandari@yahoo.co.id

Abstrak

Ketidakseimbangan tegangan merupakan kondisi tegangan tiga fasa yang tidak seimbang baik dalam magnitude (besar) maupun dalam beda sudut fasanya. Salah satu hal yang menyebabkan terjadinya ketidakseimbangan tegangan adalah adanya ketidakseimbangan arus (beban) pada tiap fasa akibat beban-beban satu fasa. Beban satu fasa banyak digunakan pada perumahan dan penerangan. Variasi pada pembebanan satu fasa menyebabkan arus yang mengalir pada konduktor-konduktor fasa menjadi berbeda satu sama lain. Kemudian, akan dihasilkan jatuh tegangan yang berbeda pula antar fasanya. Pada akhirnya, ketidak-seimbangan tegangan antar fasa pun tidak dapat dihindari. Pada motor induksi tiga fasa yang banyak digunakan, ketidak-seimbangan tegangan suplai dapat menimbulkan banyak kerugian. Dalam penelitian ini dilakukan pengujian pengaruh tegangan suplai yang tidak seimbang pada motor induksi tiga fasa 380 Volt dengan variasi tingkat ketidak-seimbangan dari 0,35 % sampai 9,7 % pada beberapa besar beban. Dari pengujian dan analisis yang telah dilakukan, diketahui bahwa penambahan tingkat ketidak-seimbangan tegangan suplai akan menurunkan kecepatan putar, menambah besar arus beban, dan menurunkan efisiensi motor induksi tiga fasa. Dengan diketahuinya pengaruh ketidakseimbangan tegangan terhadap kinerja motor induksi tiga fasa maka dapat ditentukan besarnya ketidakseimbangan maksimum yang diperbolehkan agar efek buruk dari ketidakseimbangan tegangan masih dalam batas toleransi yang diperbolehkan.

Kata kunci: Ketidakseimbangan tegangan, kecepatan putar, arus beban dan efisiensi

Abstract

Unbalanced voltage is the condition of three phase voltage that is unbalance either on magnitude or phase angle. One of the factor caused unbalanced voltage is the unbalanced current that is caused by single phase load. Single-phase loads are widely used in residential dan lighting systems. Variation on single-phase loading causes currents flowing in phase conductors to be different from one another. Due to this unbalanced currents, there would be unbalanced voltage drop on each phase. In the end, unbalanced voltage may supply threee-phase loads such us induction motors. On induction motors, unbalanced supply voltage may cause many damage. This paper investigates the effects of the unbalanced supply voltage on ithree-phase induction motor with various unbalance factor from 0,35 % until 9,7 %s. Under five different voltage magnitude unbalance conditions, the performance of the induction motor has been analyzed through testing on the laboratory. It is found that the increasing unbalance factor leads to decreasing of motor's rotating speed, increasing of load current, and decreasing of motor's efficiency.

Keywords: Unbalanced voltage, rotatis speed, load current and efficiency

1. Pendahuluan

Sistem tiga fasa yang ideal memiliki tegangan yang seimbang, baik dalam hal besar maupun beda sudut fasanya, namun karena suatu hal dapat terjadi ketidakseimbangan tegangan.

Ketidak-seimbangan tegangan dapat disebabkan oleh distribusi beban satu fasa yang tidak seimbang pada tiap fasa, adanya kegagalan transformator, dan lain sebagainya. Ketidak-seimbangan tegangan merupakan salah satu permasalahan kualitas daya listrik yang penting untuk

diperhatikan, terutama jika terkait dengan sistem atau peralatan-peralatan dengan suplai tiga fasa, seperti pada motor induksi tiga fasa. Motor induksi tiga fasa membutuhkan suplai tiga fasa yang seimbang. Jika terjadi ketidak-seimbangan pada suplai motor, akibat yang dapat terjadi pada motor tersebut antara lain adalah menurunnya efisiensi motor, meningkatnya temperatur motor secara berlebihan, menimbulkan vibrasi berlebihan, merusak isolasi, dan lain-lain. Seluruh dampak tersebut, pada akhirnya akan menyebabkan semakin pendeknya umur motor.

Dampak buruk ternyata tidak hanya dirasakan oleh pemakai, namun juga oleh perusahaan listrik. Motor-motor induksi tiga fasa yang disuplai tegangan tidak seimbang akan menarik arus lebih banyak dibandingkan motor yang disuplai tegangan seimbang, walaupun dengan beban yang sama. [1]. Mengingat motor induksi merupakan jenis motor yang paling banyak dipakai dalam dunia industri, masalah ketidak-seimbangan suplai pada motor induksi ini perlu diperhatikan dan dicari solusinya.

Penelitian-penelitian sebelumnya telah dibahas pengaruh harmonik terhadap unjuk kerja motor induksi tiga fasa sedangkan pada penelitian ini dibahas pengaruh ketidakseimbangan tegangan terhadap unjuk kerja motor induksi tiga fasa meliputi kecepatan putar motor, besarnya arus beban dan tingkat efisiensi motor.

Dengan diketahuinya pengaruh ketidakseimbangan tegangan terhadap kinerja motor induksi tiga fasa maka dapat ditentukan besarnya ketidakseimbangan maksimum yang diperbolehkan agar efek buruk dari ketidakseimbangan tegangan masih dalam batas toleransi yang diperbolehkan.

2. Ketidakseimbangan Tegangan

Pada Standar NEMA MG-1 tercantum bahwa persentase ketidak-seimbangan tegangan saluran (%KT) dapat dihitung dengan formula dibawah ini.

% KT adalah sama dengan deviasi tegangan rata-rata maksimum dari saluran dibagi dengan tegangan rata-rata saluran dikali 100 % (1)

Berbeda dengan metode perhitungan tingkat ketidak-seimbangan tegangan pada Standar NEMA MG-1, metode perhitungan yang dicantumkan pada Standar IEEE-141 menggunakan tegangan fasa. Berdasarkan Standar IEEE-141, tingkat ketidak-seimbangan tegangan dapat dihitung dengan,

% KT adalah sama dengan deviasi tegangan rata-rata maksimum dari tegangan fasa dibagi dengan rata-rata tegangan fasa dikali 100 % (2)

Namun, masih berdasarkan Standar IEEE-141, ketidak-seimbangan tegangan akan lebih baik jika dihitung berdasarkan perbandingan antara tegangan urutan negatif dan tegangan urutan positif, seperti,

$$\%KT = \frac{\text{Komponen tegangan urutan negatif } (V_1)}{\text{Komponen tegangan urutan positif } (V_1)} \times 100\% \quad (3)$$

Meski perhitungan ketidak-seimbangan tegangan dengan persamaan (3) lebih akurat, dalam penelitian ini akan digunakan metode perhitungan ketidak-seimbangan sesuai dengan formula (1) yang tercantum dalam NEMA MG-1. Hal ini disebabkan Standar NEMA ini yang paling sering digunakan sebagai acuan aplikasi motor, terutama pada bidang industri [2]. Namun demikian, pengaruh komponen tegangan urutan negatif akan tetap dipertimbangkan dalam penelitian ini.

Dengan memanfaatkan transformasi Fortesque, tegangan urutan positif, urutan negatif dan urutan nol pada sistem tiga fasa yang tidak seimbang dapat diketahui. Dengan transformasi Fortesque, komponen tegangan urutan positif fasa a (V_{A1}), tegangan urutan negatif fasa a (V_{A2}), dan tegangan urutan nol fasa a (V_{A0}) dapat ditentukan dengan persamaan (4) dibawah ini.

Untuk dua fasa yang lain, komponen simetris tegangannya dapat diperoleh dengan cara yang sama.

Saat penelitian dilakukan, hanya diamati besar tegangan fasa dan antar fasa saja, sedangkan perhitungan komponen urutan memerlukan matematika bilangan kompleks dan pengukuran besaran fasor tegangan. Untuk itu, digunakan metode perhitungan tegangan urutan positif dan negatif [3]. Metode ini dapat menentukan nilai tegangan urutan positif dan negatif dari tegangan antar fasa tanpa perlu mengetahui besar sudut fasanya, yang menggunakan persamaan-persamaan berikut.

$$\begin{pmatrix} V_{A0} \\ V_{A1} \\ V_{A3} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{pmatrix} \quad (4)$$

Dengan :

$$a = 1 \angle 120^\circ$$

$$a^2 = 1 \angle 240^\circ$$

$$a^3 = 1 \angle 360^\circ = 1 \angle 0^\circ$$

V_A = Tegangan fasa A

V_B = Tegangan fasa B

V_C = Tegangan fasa C

$$V_1 = \sqrt{\frac{A_m^2 + \frac{4A_s^2}{\sqrt{3}}}{2}} \quad (5)$$

dan

$$V_2 = \sqrt{\frac{A_m^2 - \frac{4A_s^2}{\sqrt{3}}}{2}} \quad (6)$$

Dengan A_m^2 merupakan kuadrat rata-rata sisi-sisi segitiga ABC. A_s^2 dapat diperoleh dari persamaan berikut.

$$A_m^2 = \frac{V_{AB}^2 + V_{BC}^2 + V_{CA}^2}{3} \quad (7)$$

A_s^2 merupakan keliling luas ABC yang dapat dihitung dengan persamaan berikut.

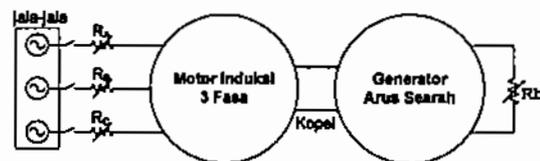
$$A_s^2 = \sqrt{p(p - V_{AB})(p - V_{BC})(p - V_{CA})} \quad (8)$$

Dan p merupakan setengah keliling segitiga ABC, yang ditentukan dengan persamaan (9).

$$P = \frac{V_{AB} + V_{BC} + V_{CA}}{2} \quad (9)$$

3. Metode Eksperimental

Pada penelitian ini pengujian dilakukan dengan menggunakan motor induksi tiga fasa yang dibebani generator arus searah dan beban resistif variabel, dengan skema seperti pada Gambar 3.1. berikut.



Gambar 1.
Skema Sistem Penelitian

Agar kondisi sistem dengan tegangan suplai yang tidak seimbang dapat diperoleh, dipergunakan hambatan variabel R_A , R_B , dan R_C . Hambatan yang terhubung secara seri dengan saluran penyuplai motor induksi ini, masing-masing dapat diubah besarnya untuk memperoleh variasi tingkat ketidak-seimbangan tegangan suplai.

Pada motor induksi, terjadi proses transformasi energi listrik menjadi energi mekanik. Energi mekanik tersebut digunakan untuk memutar rotor generator arus searah. Generator arus searah dihubungkan dengan beban resistif variabel R_b . Jika beban resistif variabel ini diperbesar, maka generator arus searah memerlukan daya yang lebih besar untuk dapat melayani beban R_b . Lebih jauh, motor induksi yang dikopel dengan rotor generator arus searah harus menghasilkan torsi yang lebih besar. Hal ini hanya dapat diimbangi dengan kenaikan arus suplai motor induksi dari jala-jala. Sehingga, secara tidak langsung, R_b merupakan beban dari motor induksi.

Pengujian pada penelitian ini dilakukan dalam beberapa kondisi ketidak-seimbangan yang berbeda antara satu dengan yang lain.

Skenario rancangan tingkat ketidakseimbangan tegangan pada pengujian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1.

Tingkat Ketidak-Seimbangan dan Tegangan Urutan Positif dan Urutan Negatif Motor Induksi Pada Lima Kondisi

KONDISI	TEGANGAN INPUT			% Ketidak-seimbangan Tegangan	V ₁	V ₂
	V _{ab} (Volt)	V _{bc} (Volt)	V _{ca} (Volt)			
1	378	380	378	0,35	378,67	1,33
2	390	390	370	3,48	383,22	13,22
3	390	390	360	5,26	379,75	19,75
4	330	370	375	7,91	357,81	27,98
5	370	385	325	9,72	359,15	35,47

V₁ = Tegangan urutan positif

V₂ = Tegangan urutan negatif

Kondisi 1 pada penelitian ini mewakili kondisi suplai seimbang, sedangkan kondisi 2 sampai 5 mewakili kondisi tegangan tidakseimbangan dengan variasi tingkat ketidakseimbangan hingga 9,7 %

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Pengaruh Ketidakseimbangan Tegangan Terhadap Kecepatan Putar Motor

Kondisi pertama yang diamati adalah pengaruh besar ketidakseimbangan tegangan terhadap kecepatan putar motor induksi untuk beberapa variasi torsi (tingkat beban motor). Pengaruh kondisi ketidakseimbangan tegangan suplai terhadap kecepatan putar pada seluruh kondisi yang diujikan dapat dilihat pada Tabel.2

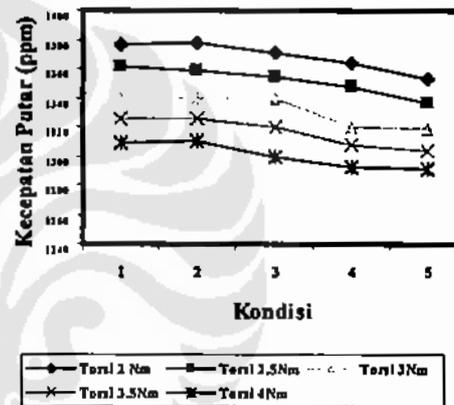
Tabel 2.

Kecepatan Putar Motor Induksi Dalam Beberapa Kondisi

T (Nm)	Kecepatan (ppm)				
	Kondisi 1	Kondisi 2	Kondisi 3	Kondisi 4	Kondisi 5
2	1377	1378	1371	1364	1353
2.5	1362	1359	1355	1347	1337
3	1339	1340	1339	1320	1318
3.5	1326	1325	1320	1307	1304
4	1309	1310	1300	1293	1291

Tabel 2 dapat direpresentasikan dalam bentuk grafik seperti pada Gambar 2. Dengan metode perhitungan kuadrat terkecil, diketahui gradien kurva tiap

kondisi pada Gambar 2 diatas, seperti ditunjukkan pada Tabel 3, berikut ini.



Gambar 2.

Ketidak Seimbangan Tegangan Suplai dan Kecepatan Putar Dengan Variasi Pembebanan

Tabel 3.

Konstanta dan Gradien Kurva

Torsi (Nm)	Tingkat Ketidak-seimbangan (%)	Konstanta a	Gradien B
2	0.352	1387.20	-6.20
2.5	3.478	1370.60	-6.20
3	5.263	1349.80	-6.20
3.5	7.907	1335.00	-6.20
4	9.722	1316.50	-5.30

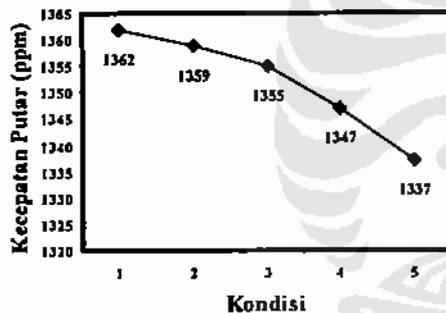
Besar penurunan kecepatan putar untuk lima variasi beban dari kondisi 1 (seimbang) ke kondisi paling ekstrim dalam pengujian, yaitu kondisi 5 (9.722% ketidakseimbangan tegangan) ditunjukkan pada Tabel 4, sebagai berikut.

Tabel 4.
Penurunan Kecepatan Putar
Pada Variasi Beban

Torsi	Penurunan Kecepatan (%)
2	1.74
2.5	1.84
3	1.57
3.5	1.66
4	1.38

Secara umum, Gambar 2 menunjukkan bahwa kecepatan putar motor akan semakin menurun seiring dengan kenaikan tingkat ketidak-seimbangan tegangan suplai.

Dalam analisis, akan digunakan hasil pengamatan pada kondisi beban 2.5Nm sebagai sampel. Gambar 3 menunjukkan hubungan antara ketidak-seimbangan dan kecepatan putar motor pada kondisi beban tersebut.



Gambar 3.
Hubungan Antara Ketidak-Seimbangan
Tegangan Suplai dan Kecepatan Putar Motor
Pada Torsi 2.5Nm

Terjadinya penurunan kecepatan ketika ketidak-seimbangan tegangan suplai meningkat, bersesuaian dengan gradiennya yang semakin besar (ditunjukkan pada Tabel 3). Untuk torsi beban 2.5Nm, penurunan kecepatan putar ini ditunjukkan pada Tabel 5 dibawah ini.

Penurunan kecepatan motor induksi tiga fasa yang disuplai secara tidak seimbang disebabkan karena adanya arus tegangan urutan negatif, yang menyebabkan mengalirnya arus urutan negatif pada kumparan stator motor induksi. Arus urutan negatif akan menghasilkan medan dan torsi

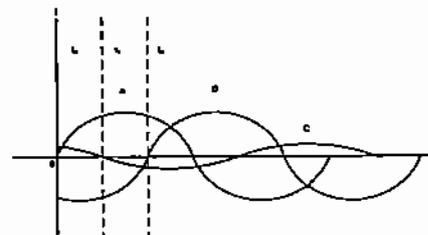
dengan arah yang berlawanan dengan arah putar motor.

Tabel 5.
Penurunan Kecepatan Antar Kondisi Pada Torsi
2.5Nm

Kondisi	Tingkat Ketidak-seimbangan (%)	Kecepatan (Ppm)	Penurunan Kecepatan Antar Kondisi (Ppm)
1	0.352	1362	-
2	3.478	1359	3
3	5.263	1355	4
4	7.907	1347	8
5	9.722	1337	10

Ketika terdapat torsi lawan, torsi yang dihasilkan pada rotor akan berkurang dan kecepatan putar pun pada akhirnya akan ikut berkurang. Semakin besar ketidak-seimbangan tegangan suplai, maka semakin besar arus urutan negatif yang mengalir dan menghasilkan torsi lawan, sehingga pada beban yang sama, penurunan kecepatan akan semakin besar. Hal ini bersesuaian dengan Standar NEMA MG-1 1998.

Selain karena adanya torsi lawan, penurunan kecepatan putar juga disebabkan karena penambahan rugi-rugi gesekan. Rugi gesekan ini bertambah karena vibrasi motor yang berlebih yang disebabkan oleh fluktuasi torsi. Fluktuasi torsi tersebut dapat dijelaskan melalui analisis medan magnet sebagai berikut. Jika motor disuplai secara tidak seimbang, arus yang mengalir juga akan tidak seimbang, seperti tampak pada Gambar 4. dibawah ini.

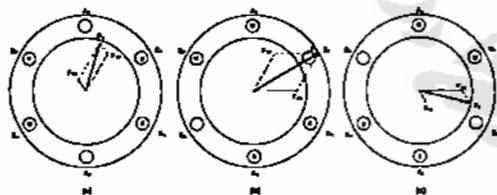


Gambar 4.
Suplai Arus Tiga Fasa Tidak Seimbang

Gambar diatas merupakan contoh suplai arus tiga fasa tidak seimbang pada motor induksi tiga fasa.

Sesuai Gambar 5, saat t_0 , pada fasa A tidak ada arus yang mengalir; pada fasa B mengalir arus negatif; dan pada fasa C mengalir arus positif. Untuk kondisi saat t_0 , C1 dan B2 merupakan kutub utara sedangkan C2 dan B1 merupakan kutub selatan.

Garis magnetis fasa C (F_{SC}) meninggalkan kutub utara C1 memasuki kutub selatan pasangannya yaitu C2. Garis magnetis fasa B (F_{SB}) juga meninggalkan kutub utara B2 menuju kutub utara B1. Resultan keduanya menghasilkan medan magnetis stator (F_S) yang akan menghasilkan fuks yang akan memotong kumparan rotor. Proses pembentukan medan magnet stator pada saat t_0 ini diGambarkan pada Gambar 5(a). Dibandingkan dengan medan magnet pada keadaan seimbang, medan magnet yang dihasilkan saat t_0 yang sama pada kondisi suplai tidak seimbang relatif lebih kecil magnitudnya. Selain itu, terlihat sedikit pergeseran sudut fasa medan magnet stator sebesar 17° searah jarum jam, sedangkan pada kondisi seimbang, pergeseran sudut fasa medan magnet stator ialah konstan, sebesar 60° .



Gambar 5.

Ilustrasi Pembentukan Medan Magnet Putar Pada Stator

Mengikuti logika yang sama dengan analisis medan magnet pada saat t_0 , medan magnetis yang dihasilkan saat t_1 dapat dilihat pada Gambar 5(b). Medan magnetis yang dihasilkan memiliki magnitud yang sama dengan medan magnet yang dihasilkan saat suplai seimbang. Hal ini disebabkan tidak adanya arus fasa C yang mengalir saat t_1 . Pada saat t_1 , terjadi perubahan sudut fasa medan magnet, namun hanya sekitar 43° searah jarum jam. Saat t_2 , medan magnet kembali berputar dengan penambahan fasa 43° searah jarum

jam. Besar medan magnet pada saat ini pun kembali berkurang drastis, setingkat dengan besar medan magnet saat t_0 . Hal ini ditunjukkan pada Gambar 5(c).

Dengan melihat Gambar 7, diketahui bahwa ketika motor disuplai secara tidak seimbang, medan magnet putar tetap terbentuk, namun besarnya tidak sama untuk setiap waktu dan putarannya pun tidak konstan. Hal ini akan mempengaruhi torsi yang dihasilkan dan juga kecepatan yang dihasilkan. Torsi yang cenderung berfluktuasi akan meningkatkan rugi-rugi gesekan dan secara tidak langsung kecepatan putar motor akan berkurang.

Semakin tidak seimbang suplai motor, maka semakin parah fluktuasi torsi dan penurunan kecepatan yang terjadi. Sesuai dengan Tabel 4, terjadi penurunan efisiensi antara kondisi 1 (seimbang) dan kondisi 5 (9.722% ketidak-seimbangan) pada beban 2.5Nm sebesar 1.84%. Penurunan kecepatan putar seiring dengan peningkatan ketidak-seimbangan tegangan juga terjadi pada pembebanan lain seperti ditunjukkan pada Gambar 2, Tabel 3 dan Tabel 4.

4.2. Pengaruh Ketidakseimbangan Tegangan terhadap Arus Beban

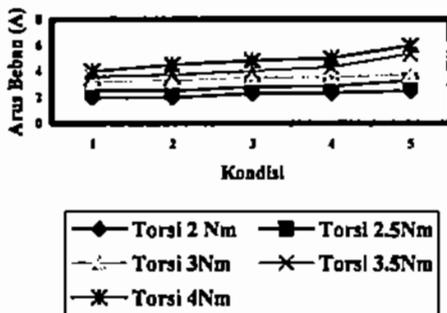
Pengaruh ketidak-seimbangan tegangan suplai dengan arus beban pada variasi torsi beban dapat dilihat pada Tabel.6 dibawah ini.

Tabel 6.
Arus Beban Pada lima Kondisi

T (Nm)	Arus Beban (A)				
	Kondisi 1	Kondisi 2	Kondisi 3	Kondisi 4	Kondisi 5
2	2.00	2.00	2.30	2.35	2.50
2.5	2.50	2.50	2.80	2.85	3.30
3	3.20	3.30	3.50	3.55	3.70
3.5	3.60	3.70	4.00	4.30	5.30
4	4.00	4.50	4.80	5.00	6.00

Memerhatikan Gambar 6, secara umum terlihat bahwa pada beban yang sama, arus yang dibutuhkan motor induksi tiga fasa akan semakin besar seiring dengan ketidak-seimbangan tegangan suplainya.

Tabel 6 diatas dapat direpresentasikan dalam bentuk grafik seperti pada Gambar 6



Gambar 6.

Ketidakseimbangan Tegangan vs Arus Beban

Tabel 7.
Konstanta dan Gradien Kurva

Torsi (Nm)	Tingkat Ketidak-seimbangan Tegangan (%)	Konstanta a	Gradien B
2	0.352	1.83	0.14
2.5	3.478	2.21	0.20
3	5.263	3.08	0.13
3.5	7.907	2.98	0.40
4	9.722	3.51	0.45

Besar penambahan arus beban dari kondisi 1 (seimbang) ke kondisi paling ekstrim dalam pengujian, yaitu kondisi 5 (9.722% ketidak-seimbangan) adalah seperti ditunjukkan pada Tabel 8.

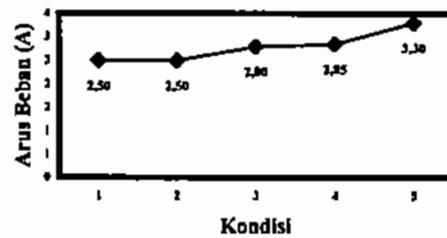
Tabel 8.
Penambahan Arus Beban

Torsi	Penambahan Arus Beban (%)
2	25.00
2.5	32.00
3	15.63
3.5	47.22
4	50.00

Dalam analisis, akan digunakan hasil pengamatan pada kondisi beban 2.5Nm sebagai sampel. Gambar 8 menunjukkan hubungan antara ketidak-seimbangan dan arus beban pada kondisi beban 2.5Nm.

Secara umum, Gambar 7 menunjukkan bahwa arus beban yang disuplai motor akan semakin bertambah seiring dengan kenaikan tingkat ketidak-seimbangan tegangan suplai. Sesuai dengan Tabel 8, terjadi penambahan arus beban antara kondisi 1 (seimbang) dan kondisi 5

(9.722% ketidak-seimbangan) pada beban 2.5Nm sebesar 32%.



Gambar 7.

Hubungan Antara Ketidak-Seimbangan Tegangan Suplai dan Arus Beban Motor Pada Torsi 2.5Nm

Motor tiga fasa yang disuplai secara tidak seimbang akan menimbulkan tegangan urutan negatif pada terminal motor. Seperti dijelaskan pada bagian sebelumnya, tegangan urutan negatif akan mengakibatkan mengalirnya arus urutan negatif pada kumparan stator dan rotor.

Arus urutan negatif menghasilkan torsi lawan yang akan menambah torsi beban. Sehingga, untuk beban yang sama, arus yang dibutuhkan dan ditarik oleh motor induksi menjadi lebih besar.

Semakin tinggi tingkat ketidak-seimbangan tegangan, semakin besar arus yang ditarik oleh motor walaupun dengan beban yang sama besar. Hal ini ditunjukkan pada Tabel 9. dibawah ini yang mencantumkan penambahan arus beban dari satu kondisi ketidak-seimbangan menuju kondisi lain yang lebih besar.

Rugi-rugi elektrik yang terjadi akan lebih besar jika arus yang mengalir pada kumparan motor bertambah. Secara umum, hal ini akan mengurangi umur motor. Selain itu, arus ini tidak terdistribusi secara merata pada tiap kumparan fasa. Ada fasa-fasa tertentu yang dialiri arus yang lebih tinggi, sehingga jika motor induksi tiga fasa dioperasikan dengan suplai tidak seimbang dalam jangka waktu yang lama, akan terjadi degradasi isolasi yang tidak merata antar kumparan fasa motor. Karena terjadi degradasi isolasi yang tidak merata antar fasa, koordinasi isolasi antar kumparan fasa akan lebih rumit.

Tabel 9.
Penambahan Arus Beban Pada Torsi 2.5 Nm

Kondisi	Tingkat Ketidakseimbangan (%)	Arus Beban (A)	Penambahan Arus Beban Antar Kondisi (A)
1	0.352	2.50	-
2	3.478	2.50	0.00
3	5.263	2.80	0.30
4	7.907	2.85	0.05
5	9.722	3.30	0.45

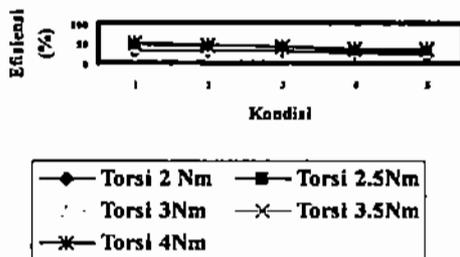
4.3. Pengaruh Ketidakseimbangan Tegangan terhadap Efisiensi Motor

Pengaruh ketidakseimbangan tegangan terhadap efisiensi motor dapat dilihat pada Tabel.10.

Tabel 10.
Efisiensi Motor Induksi Pada Lima Kondisi

T (Nm)	Efisiensi(%)				
	Kon-disi 1	Kon-disi 2	Kon-disi 3	Kon-disi 4	Kon-disi 5
2	31.50	29.99	29.77	23.32	22.13
2.5	38.11	34.83	34.08	27.12	25.36
3	42.12	37.15	36.57	29.49	28.93
3.5	43.02	41.33	40.11	31.92	31.24
4	48.02	43.24	40.90	33.51	34.60

Dari data di Tabel 10 diatas dapat dibuatkan grafik sebagai berikut.



Gambar.8.
Ketidak-Seimbangan dan Efisiensi Dalam Beberapa Kondisi

Dengan metode perhitungan kuadrat terkecil, diketahui gradien kurva tiap kondisi pada Gambar 8 diatas, seperti ditunjukkan oleh Tabel 11, berikut ini.

Tabel 11.
Konstanta dan Gradien Kurva Pada Gambar 7

Torsi (Nm)	Tingkat Ketidakseimbangan (%)	Konstanta a	Gradien b
2	0.352	34.97	-2.54
2.5	3.478	41.86	-3.32
3	5.263	45.06	-3.40
3.5	7.907	47.42	-3.30
4	9.722	51.03	-3.66

Besar penurunan efisiensi dari kondisi 1 (seimbang) ke kondisi paling ekstrim dalam pengujian, yaitu kondisi 5 (9.722% ketidakseimbangan) dapat dilihat pada Tabel 12. berikut.

Tabel 12.
Penurunan Efisiensi

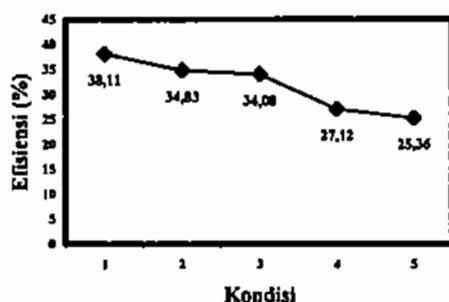
Torsi (Nm)	Penurunan Efisiensi (%)
2	29.75
2.5	33.46
3	31.31
3.5	27.39
4	27.95

Motor induksi tiga fasa akan mengalami penurunan efisiensi ketika suplai tegangannya tidak seimbang. Secara umum, hal ini dapat dilihat pada Gambar 7. Dalam analisis, akan digunakan hasil pengamatan pada kondisi beban 2.5Nm sebagai sampel. Gambar 9 menunjukkan hubungan antara ketidak-seimbangan dan efisiensi motor pada kondisi beban 2.5Nm.

Sesuai dengan Tabel 10, terjadi penurunan efisiensi antara kondisi 1 (seimbang) dan kondisi 5 (9.722% ketidakseimbangan) pada beban 2.5Nm sebesar 33.46%.

Penyebab terjadinya penurunan efisiensi ialah mengalirnya arus urutan negatif yang akan memperbesar rugi-rugi elektrik motor yang dipengaruhi oleh besarnya arus yang mengalir pada kumparan. Rugi-rugi yang

terpengaruh ialah rugi-rugi tembaga stator dan rotor. Selain itu, rugi-rugi yang dipengaruhi besar medan magnet seperti rugi-rugi histerisis dan arus Eddy juga akan bertambah.



Gambar 9.

Ketidak-Seimbangan Tegangan Suplai vs Efisiensi Motor Pada Torsi 2.5Nm

Selain rugi-rugi listrik, rugi-rugi mekanis juga bertambah besar. Adanya torsi lawan akan memperbesar rugi-rugi gesekan yang terjadi pada motor. Karena rugi-rugi secara keseluruhan bertambah, daya keluaran berkurang. Dengan demikian, efisiensi motor akan berkurang seiring dengan kenaikan tingkat ketidak-seimbangan tegangan suplai.

Penambahan rugi-rugi tidak hanya akan mengurangi efisiensi motor namun juga akan mengakibatkan degradasi isolasi kumparan motor. Semakin tinggi tingkat ketidak-seimbangan tegangan suplai, semakin besar penurunan efisiensi yang terjadi pada motor induksi. Hal ini ditampilkan pada Tabel.13 berikut ini.

Tabel 13.
Penurunan Efisiensi (Torsi 2.5 Nm)

Kondisi	Tingkat Ketidak-seimbangan (%)	Efisiensi (%)	Penurunan Efisiensi Antar Kondisi (%)
1	0.352	38.11	-
2	3.478	34.83	3.27
3	5.263	34.08	0.76
4	7.907	27.12	6.96
5	9.722	25.36	1.76

5. Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut.

1. Ketidak-seimbangan tegangan suplai (9.722%) akan sedikit mengurangi kecepatan putar motor sebesar 1.84%.
2. Ketidak-seimbangan tegangan suplai (9.722%) menyebabkan arus beban motor bertambah sebesar 50.00%. Hal ini akan meningkatkan rugi-rugi panas dan mengurangi umur motor.
3. Ketidak-seimbangan tegangan suplai (9.722%) mengurangi efisiensi motor sebesar 33.46%.

6. Daftar Acuan

- [1]. NEMA Standard Publication No. MG 1-1998, *Motors and Generators*, National Electrical Manufacturers Association, 1999.
- [2]. "IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants" (IEEE Std 141-1993), IEEE Standards Board, Desember 1993
- [3]. Ghijselen, Jozef A. L, "Exact Voltage Unbalance Assessment Without Phase Measurements", *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, VOL. 20, NO. 1, Februari 2005.