

PENENTUAN PERSENTASE PENINGKATAN BIAYA TENAGA LISTRIK PADA MOTOR INDUKSI TIGA FASA AKIBAT TEGANGAN TIDAK SEIMBANG

Syarifuddin¹⁾

Abstrak: Penelitian ini bertujuan menentukan persentase peningkatan biaya tenaga listrik pada motor induksi tiga fasa yang diakibatkan tegangan tidak seimbang. Dalam pengujian laboratorium, dibuat simulasi tegangan tidak seimbang sebagai masukan motor induksi tiga fasa 1000 W. Pada beban nominal konstan, tegangan tidak seimbang dibuat bervariasi dengan persentase ketidakseimbangan mulai dari 0 hingga 5 %. Data yang diperoleh dari pengujian laboratorium adalah data tegangan stator, arus rotor tidak seimbang, dan daya masukan. Dari hasil penelitian diketahui bahwa tegangan tidak seimbang pada motor induksi tiga fasa menyebabkan peningkatan rugi daya dan peningkatan biaya tenaga listrik. Pada tegangan seimbang nominal dengan beban 55,1 % dari beban nominal atau daya keluaran 551 W, motor menyerap daya listrik 770 W termasuk rugi daya 219 W. Pada ketidakseimbangan tegangan 1 %, rugi daya meningkat dari 219 W menjadi 228 W atau meningkat 4,110 %, dan efisiensi menurun dari 71,559 % menjadi 70,732 %. Dengan tarif listrik Rp 800 per kWh, biaya tenaga listrik pada tegangan seimbang nominal per tahun adalah Rp 3.696.000. Pada ketidakseimbangan tegangan 1 %, biaya tenaga listrik meningkat Rp 43.200 atau meningkat 1,169 % per tahun. Pada ketidakseimbangan tegangan 5 %, rugi daya meningkat 31,050 %, efisiensi menurun menjadi 65,752 %, dan biaya tenaga listrik meningkat Rp 326.400 atau meningkat 8,831 % per tahun.

Kata kunci: tegangan tidak seimbang, motor induksi tiga fasa, biaya tenaga listrik.

I. PENDAHULUAN

Motor induksi tiga fasa banyak digunakan sebagai penggerak alat-alat produksi, memutar pompa, fan, konveyor, dan lain-lain, karena mempunyai konstruksi sederhana, kokoh, harga lebih murah, dan mudah pemeliharaannya dibandingkan dengan jenis motor listrik lainnya (Chakrasali, 2011). Pada umumnya motor induksi tiga fasa di industri memperoleh pasokan daya listrik dari sumber tegangan tiga fasa PLN. Sumber tegangan tiga fasa ini dimanfaatkan baik untuk mengoperasikan beban satu fasa seperti lampu penerangan, alat-alat elektronik, dan pemanas dan lain-lain, maupun beban tiga fasa seperti motor induksi tiga fasa secara bersama-sama. Beban satu fasa ini cenderung menyebabkan sistem pembebanan tidak seimbang karena beban satu fasa mempunyai karakteristik, faktor daya, dan waktu pengoperasian yang berbeda-beda. Ketidakseimbangan distribusi

¹⁾ Staf Pengajar Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Ujung Pandang

beban satu fasa pada sistem suplai daya listrik tiga fasa menyebabkan tegangan tidak seimbang (Quispe, 2011).

Tegangan tidak seimbang pada motor induksi tiga fasa di industri ini menimbulkan komponen tegangan urutan negatif yang membangkitkan fluks medan putar yang melawan putaran rotor, dan menyebabkan arus yang mengalir menjadi lebih besar dibandingkan arus nominal (Kostic and Nikolic, 2010). Menurut Plummer (2011), ketidakseimbangan tegangan ini berdampak langsung terhadap kinerja motor induksi tiga fasa, seperti kecepatan putaran, torsi poros, dan efisiensi menjadi menurun, serta umur isolasi motor menjadi lebih pendek.

Penurunan efisiensi pada motor induksi tiga fasa menyebabkan daya listrik yang dikonsumsi motor menjadi meningkat karena rugi daya meningkat. Dengan demikian, ketidakseimbangan tegangan pada motor induksi tiga fasa berdampak secara langsung terhadap konsumsi daya listrik dan biaya tenaga listrik (Rao, 2011). Oleh karena itu, diperlukan penelitian untuk mengetahui korelasi persentase ketidakseimbangan tegangan pada motor induksi tiga fasa dengan peningkatan biaya tenaga listrik yang harus dibayar dalam satu tahun.

Permasalahan ketidakseimbangan tegangan di industri yang mengoperasikan banyak motor induksi tiga fasa, bukan hanya berkaitan dengan biaya tenaga listrik tetapi juga berimplikasi pada penurunan hasil produksi dan penurunan umur operasi motor. Oleh karena itu, NEMA (*National Electrical Manufacturers Association*) merekomendasikan pembatasan ketidakseimbangan tegangan maksimum 1 % tanpa *derating* dan maksimum 5 % dengan *derating* keluaran motor (Schneider Electric, 2006).

Berdasarkan standar IEC (*International Electrotechnical Commission*), persentase ketidakseimbangan tegangan, F_v (%) dari tegangan tiga fasa tidak seimbang ditentukan dengan metode komponen simetri, dan dinyatakan sebagai perbandingan antara tegangan urutan negatif, V_{a2} (V) dengan tegangan urutan positif, V_{a1} (V) (Shandu and Chaudhary, 2009), yaitu:

$$F_v = (V_{a2})/(V_{a1}) \times 100 \% \quad (1)$$

Tegangan urutan positif dan tegangan urutan negatif ditentukan berdasarkan data tegangan pada fasa a, V_a (V), tegangan pada fasa b, V_b (V), dan tegangan pada fasa c, V_c (V), yaitu:

$$V_{a1} = 1/3(V_a + aV_b + a^2V_c)$$

$$V_{a2} = 1/3(V_a + a^2V_b + aV_c)$$

dengan:

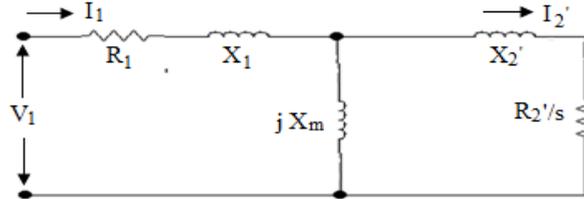
$$a = 1 \angle 120^\circ = -0,5 + j 0,866$$

$$a^2 = 1 \angle 240^\circ = -0,5 - j 0,866$$

A. Motor Induksi Tiga Fasa pada Tegangan Seimbang

Prinsip kerja motor induksi sama seperti transformator, yaitu berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, sehingga motor induksi dapat dianggap sebagai

transformator dengan bagian sekunder yang berputar. Dengan demikian, rangkaian ekivalen motor induksi tiga fasa dapat digambarkan seperti rangkaian ekivalen transformator. Berdasarkan rekomendasi IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), rangkaian ekivalen motor induksi tiga ditunjukkan pada gambar 1 berikut ini.



Gambar 1. Rangkaian ekivalen motor induksi tiga fasa

Parameter rangkaian ekivalen motor induksi tiga fasa pada gambar 1 didefinisikan R_1 (Ω) adalah resistansi stator per fasa, X_1 (Ω) adalah reaktansi bocor stator per fasa, X_m (Ω) adalah reaktansi magnetisasi, R_2' (Ω) adalah resistansi rotor dilihat dari sisi stator, dan X_2' (Ω) adalah reaktansi bocor rotor dilihat dari sisi stator.

Dengan tegangan masukan stator per fasa adalah V_1 (V), arus stator per fasa adalah I_1 (A), dan faktor daya stator adalah $\cos \phi_1$, maka diperoleh daya masukan stator atau daya masukan motor P_1 (W), dan rugi tembaga stator P_{c1} (W) pada tegangan seimbang, yaitu:

$$P_1 = 3V_1 I_1 \cos \phi_1 \quad (2)$$

$$P_{c1} = 3I_1^2 R_1 \quad (3)$$

Dengan menyatakan I_2' (A) adalah arus yang mengalir pada rotor dilihat dari sisi stator, dan s adalah slip motor, maka daya masukan rotor P_2 (W), daya poros termasuk rugi rotasi P_{sh} (W), dan rugi tembaga rotor P_{c2} (W) dapat ditentukan sebagai berikut:

$$P_2 = 3(I_2')^2 (R_2' / s) \quad (4)$$

$$P_{sh} = 3(I_2')^2 R_2' \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad (5)$$

$$P_{c2} = 3(I_2')^2 R_2' \quad (6)$$

Apabila dinyatakan kecepatan putaran sinkron adalah n_s (rpm), kecepatan putaran rotor adalah n_r (rpm), frekuensi sumber tegangan adalah f (Hz) dan jumlah kutub adalah p , maka slip s ditentukan berdasarkan:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = 1 - \frac{n_r}{n_s} \quad (7)$$

dengan:

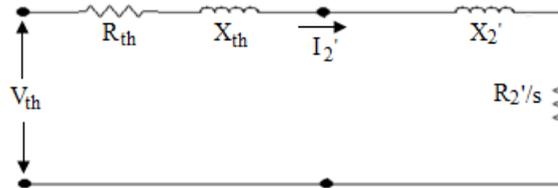
$$n_s = 120(f / p)$$

Dengan menerapkan metoda rangkaian ekivalen thevenin pada cabang jX_m pada gambar 1 diatas, tegangan thevenin per fasa V_{th} (V) dan impedansi thevenin per fasa Z_{th} (Ω) ditentukan sebagai berikut:

$$V_{th} = \frac{jX_m}{R_1 + j(X_1 + X_m)} V_1$$

$$Z_{th} = \frac{jX_m(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)} = R_{th} + jX_{th}$$

Rangkaian ekivalen thevenin dan rangkaian rotor per fasa dari motor induksi tiga fasa ditunjukkan pada gambar 2 berikut ini.



Gambar 2. Rangkaian ekivalen thevenin dan rangkaian rotor

Dengan R_{th} (Ω) adalah resistansi thevenin per fasa, dan X_{th} (Ω) adalah reaktansi thevenin per fasa, diperoleh:

$$I_2' = \frac{V_{th}}{(R_{th} + R_2'/s) + j(X_{th} + X_2')}$$

Dengan memasukkan harga I_2' kedalam persamaan (5), diperoleh daya poros termasuk rugi rotasi, yaitu:

$$P_{sh} = 3(1-s) \frac{V_{th}^2 (R_2'/s)}{(R_{th} + R_2'/s)^2 + (X_{th} + X_2')^2} \tag{8}$$

Dengan P_{fw} (W) adalah rugi rotasi, maka daya poros keluaran P_o (W) yang diberikan kepada beban mekanik adalah:

$$P_o = P_{sh} - P_{fw} \tag{9}$$

Disamping rugi tembaga dan rugi rotasi tersebut diatas, pada motor induksi tiga fasa terdapat juga `rugi inti stator atau rugi inti besi P_f (W), dan rugi *stray* P_{sl} (W). Rugi inti besi dan rugi rotasi diperoleh dari uji eksperimental pada kondisi motor tanpa beban, dan harganya konstan selama motor beroperasi. Adapun rugi *stray* (*stray losses*) yaitu rugi yang terutama disebabkan oleh arus pusar (*eddy current*) dalam komponen metal motor, sukar ditentukan secara eksperimental. Berdasarkan standar IEC, rugi *stray* berkisar antara 5 sampai dengan 15 % dari rugi daya total pada saat motor berbeban.

Berdasarkan daya masukan, daya keluaran, dan rugi daya yang diuraikan diatas, dan P_{tl} (W) adalah rugi daya total pada tegangan seimbang, efisiensi motor η (%) pada tegangan seimbang ditentukan sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} 100\% = \frac{P_o}{P_o + P_{tl}} 100\% = \left(\frac{P_o}{P_i} \right) 100\% \tag{10}$$

dengan:

$$P_{tl} = P_f + P_{c1} + P_{c2} + P_{fw} + P_{sl} \tag{11}$$

Pada tegangan tiga fasa yang seimbang sebagaimana diuraikan di atas, motor induksi tiga fasa akan beroperasi sesuai dengan kapasitas nominalnya. Pada umumnya data kapasitas nominal motor induksi tiga fasa diberikan pada *name plate* (papan nama) motor, seperti daya keluaran, tegangan masukan stator, arus stator, faktor daya, arus rotor, frekuensi, jumlah kutub, dan putaran pada beban nominal.

B. Rugi Daya Pada Tegangan Tidak Seimbang

Tegangan masukan tidak seimbang pada motor induksi tiga fasa menyebabkan timbulnya komponen tegangan urutan positif dan komponen tegangan urutan negatif secara bersama-sama. Tegangan urutan negatif menghasilkan medan putar yang berlawanan dengan arah putaran rotor yang dihasilkan oleh tegangan urutan positif, sehingga motor seolah-olah mendapat beban tambahan. Akibatnya, arus yang mengalir baik pada stator maupun pada rotor mengalami peningkatan, sehingga rugi resistansi atau rugi tembaga pada stator dan rotor juga mengalami peningkatan. Arus yang mengalir ini juga tidak seimbang, terutama arus stator yang mengalami persentase ketidakseimbangan yang lebih besar dibandingkan persentase ketidakseimbangan tegangan.

Apabila arus stator pada masing-masing fasa dinyatakan dengan I_{sa} (A), I_{sb} (A) dan I_{sc} (A), maka rugi tembaga stator pada tegangan tidak seimbang P_{clu} (W) adalah:

$$P_{clu} = (I_{sa}^2 + I_{sb}^2 + I_{sc}^2) R_l \quad (12)$$

Apabila arus rotor pada masing-masing fasa dinyatakan dengan I_{ra} (A), I_{rb} (A) dan I_{rc} (A), maka rugi tembaga rotor pada tegangan tidak seimbang adalah:

$$P_{c2u} = (I_{ra}^2 + I_{rb}^2 + I_{rc}^2) \quad (13)$$

Apabila dinyatakan daya masukan stator atau daya masukan motor pada tegangan tidak seimbang adalah P_{iub} (W), tegangan masukan urutan positif adalah V_{a1} (V), tegangan masukan urutan negatif adalah V_{a2} (V), arus stator urutan positif adalah I_{sa1} (A), dan arus stator urutan negatif adalah I_{sa2} (A), maka diperoleh:

$$\begin{aligned} P_{iub} &= 3 \operatorname{Re} [V_{a1} I_{sa1}^* + V_{a2} I_{sa2}^*] \\ &= P_o + P_{thu} \end{aligned} \quad (14)$$

dengan:

$$P_{thu} = P_f + P_{clu} + P_{c2u} + P_{fw} + \quad (15)$$

C. Peningkatan Biaya Tenaga Listrik

Peningkatan arus akibat tegangan tidak seimbang berimplikasi sangat luas terhadap kinerja motor induksi tiga fasa, terutama peningkatan rugi daya dan peningkatan suhu isolasi yang memperpendek umur operasi motor. Oleh karena itu NEMA memberikan batasan ketidakseimbangan tegangan maksimum 1 % tanpa *derating*, dan maksimum 5 % dengan *derating* (penurunan keluaran motor) untuk menghindari peningkatan suhu isolasi yang terlalu tinggi.

Dengan daya masukan dan rugi daya pada tegangan tidak seimbang masing-masing adalah P_{lub} (W) dan P_{thu} (W), dan efisiensi pada tegangan tidak seimbang adalah η_{ub} (%), maka dapat dinyatakan:

$$\eta_{ub} = \frac{P_o}{P_{lub}} 100\% = \frac{P_o}{P_o + P_{tlu}} 100\% = \left(1 - \frac{P_{tlu}}{P_{lub}}\right) 100\% \quad (16)$$

Dengan menyatakan L_f adalah faktor pembebanan motor dan P_{on} (W) adalah daya keluaran nominal, maka peningkatan konsumsi daya listrik atau peningkatan rugi daya listrik akibat tegangan tidak seimbang P_{li} (W) ditentukan sebagai berikut:

$$P_{li} = P_{on} L_f \left(\frac{100}{\eta_{ub}} - \frac{100}{\eta} \right) \quad (17)$$

Dengan P_{tl} (W) adalah rugi daya pada tegangan seimbang, maka persentase peningkatan konsumsi daya listrik atau peningkatan rugi daya akibat tegangan tidak seimbang LI (%) adalah:

$$LI = \frac{P_{li}}{P_{tl}} 100\% \quad (18)$$

Dengan menyatakan waktu operasi motor dalam satu tahun adalah t_{op} (jam), maka peningkatan konsumsi tenaga listrik atau kerugian tenaga listrik akibat tegangan tidak seimbang H_{li} (Wh) per tahun adalah:

$$H_{li} = P_{li} t_{op} \quad (19)$$

Dengan menyatakan peningkatan biaya tenaga listrik atau kerugian biaya tenaga listrik akibat tegangan tidak seimbang adalah CST_{li} (Rp) per tahun dan harga tenaga listrik adalah N (Rp/kWh), maka diperoleh:

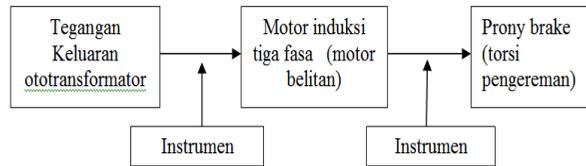
$$CST_{li} = H_{li} \times N \quad (20)$$

Apabila dinyatakan biaya tenaga listrik pada tegangan seimbang nominal per tahun adalah CST_b (Rp) dan persentase peningkatan biaya tenaga listrik adalah CI (%), maka diperoleh:

$$CI = \frac{CST_{li}}{CST_b} 100\% \quad (21)$$

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Mesin-mesin Listrik dan Pengaman Program Studi Teknik Listrik Politeknik Negeri Ujung Pandang. Dalam penelitian ini didesain suatu simulasi tegangan tiga fasa tidak seimbang melalui tiga buah ototransformator satu fasa dalam operasi normal. Ketiga ototransformator tersebut dihubungkan secara bintang dengan tegangan masukan per fasa 220 V dan tegangan keluaran per fasa 0 – 250 V. Motor induksi tiga fasa 1 kW yang dijadikan objek penelitian, dikopel dengan sebuah *prony brake* (torsi pengereman) variabel. Terminal tegangan keluaran ototransformator yang berfungsi sebagai sumber tegangan tiga fasa dihubungkan ke stator motor yang terhubung secara bintang. Diagram blok penelitian ditunjukkan berikut ini.



Gambar 3. Diagram blok penelitian

Dengan mengatur tegangan keluaran masing-masing ototransformator, dapat diperoleh variasi tegangan tiga fasa tidak seimbang pada motor sesuai dengan kebutuhan penelitian tanpa mengabaikan kondisi keamanan motor. Adapun simulasi beban motor dapat diatur dengan mengatur setting skala 0 – 5 kg pada *prony brake*, dan jarak antara cakram/skala dan poros motor adalah 14 cm. Dalam penelitian ini beban mekanik motor dijaga konstan pada setting skala 2,7 kg (3,71 N-m), baik pada tegangan seimbang nominal maupun pada tegangan tidak seimbang.

Dalam penelitian ini mula-mula motor dioperasikan pada tegangan seimbang nominal, dan selanjutnya motor dioperasikan pada tegangan tidak seimbang yang dimulai dari persentase ketidakseimbangan 1 %, dan dibatasi sampai dengan persentase ketidakseimbangan 5 % sesuai dengan rekomendasi NEMA.

Pada tegangan seimbang nominal dan pada setiap tingkat ketidakseimbangan tegangan yang dinyatakan dalam persentase ketidakseimbangan tegangan (F_v), dilakukan pengambilan data berupa data tegangan masukan stator, arus stator, dan arus rotor motor.

Dalam penelitian ini dilaksanakan juga pengujian tanpa beban (*no load test*) dan pengujian metode volt-ampere untuk menentukan parameter resistansi stator dan rotor, dan rugi daya konstan.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini motor induksi tiga fasa yang dijadikan objek penelitian dibebani dengan beban mekanik konstan sebesar 3,71 N-m atau 55,1 % dari beban nominal motor. Data yang diperoleh dari penelitian ini ditunjukkan pada tabel 1 berikut ini.

Tabel 1. Tegangan masukan motor, arus stator dan arus rotor

Tegangan per fasa (V)			Arus Stator (A)			Arus Rotor (A)		
V_a	V_b	V_c	I_{sa}	I_{sb}	I_{sc}	I_{ra}	I_{rb}	I_{rc}
220	220	220	2,00	2,00	1,80	3,60	3,60	3,60
223	220	215	2,20	2,00	1,75	3,70	3,60	3,60
225	210	220	2,32	1,80	2,00	3,75	3,64	3,62
225	204	220	2,50	1,75	2,10	3,90	3,70	3,68
225	197	220	2,70	1,64	2,40	3,95	3,75	3,70
225	191	220	2,94	1,45	2,68	4,1	3,90	3,85

A. Persentase Ketidakseimbangan Tegangan

Dalam menentukan persentase ketidakseimbangan tegangan, diasumsikan bahwa faktor daya masing-masing fasa adalah sama, sehingga pergeseran sudut fasa dianggap 120° antara fasa satu dengan fasa lainnya.

Berdasarkan persamaan (1), persentase ketidakseimbangan tegangan ditentukan sebagai berikut:

Pada tegangan seimbang, yaitu $V_a = 220 \text{ V}$, $V_b = 220$ dan $V_c = 220 \text{ V}$, persentase ketidakseimbangan tegangan (F_v) adalah nol. Hal ini dapat dilihat pada analisis berikut:

$$V_{a1} = 1/3 (220 \angle 0 + 220 \angle 240^\circ \cdot 1 \angle 120^\circ + 220 \angle 120^\circ \cdot 1 \angle 240^\circ) = 220 \text{ V}$$

$$V_{a2} = 1/3 (220 \angle 0 + 220 \angle 240^\circ \cdot 1 \angle 240^\circ + 220 \angle 120^\circ \cdot 1 \angle 120^\circ) = 0$$

$$F_v = \frac{0}{220} 100\% = 0 \%$$

Pada tegangan tidak seimbang, yaitu $V_a = 223 \text{ V}$, $V_b = 220 \text{ V}$ dan $V_c = 215 \text{ V}$, persentase ketidakseimbangan tegangan ditentukan sebagai berikut:

$$V_{a1} = 1/3 (223 \angle 0 + 220 \angle 240^\circ \cdot 1 \angle 120^\circ + 215 \angle 120^\circ \cdot 1 \angle 240^\circ) = 219,33 \text{ V}$$

$$V_{a2} = 1/3 (223 \angle 0 + 220 \angle 240^\circ \cdot 1 \angle 240^\circ + 215 \angle 120^\circ \cdot 1 \angle 120^\circ)$$

$$= 1/3 (223 - 110 + j 190,53 - 107,5 - j 186,20)$$

$$= 1/3 (5,5 + j 4,33) = 1/3 (7 \angle 38,21^\circ) = 2,33 \text{ V}$$

$$F_v = \frac{2,33}{219,33} 100\% = 1 \%$$

Dengan metode analisis yang sama seperti diatas, diperoleh persentase ketidakseimbangan tegangan seperti ditunjukkan pada tabel 2 berikut ini.

Tabel 2. Persentase ketidakseimbangan tegangan

Tegangan per fasa (V)			F _v (%)
V _a	V _b	V _c	
220	220	220	0
223	220	215	1
225	210	220	2
225	204	220	3
225	197	220	4
225	191	220	5

B. Rugi Daya dan Efisiensi

Dari pengujian tanpa beban (beban nol) dan pengujian metode volt-ampere, diperoleh resistansi stator per fasa (R_1) = 7,143 Ω , resistansi rotor per fasa (R_2) = 0,795 Ω , rugi inti stator (P_r) = 71 W, dan rugi gesek dan angin atau rugi rotasi (P_{fw}) = 24 W.

Rugi tembaga (rugi resistansi) stator pada tegangan seimbang ($F_v = 0$) seharusnya ditentukan menurut persamaan (3), namun karena ternyata arus tidak seimbang maka rugi tembaga stator ditentukan berdasarkan persamaan (12). Berdasarkan data arus stator pada tabel 1, rugi tembaga stator pada tegangan seimbang adalah:

$$P_{c1} = (2^2 + 2^2 + 1,8^2) \cdot 7,143 = 80 \text{ W}$$

Rugi tembaga rotor ditentukan menurut persamaan (6), namun harga arus dan resistansi rotor tidak ditransformasi ke sisi stator, karena dalam penelitian ini tersedia data arus dan data resistansi rotor. Berdasarkan data arus rotor pada tegangan seimbang (tabel 1), rugi tembaga rotor adalah:

$$P_{c2} = 3 \cdot 3,6^2 \cdot 0,795 = 31 \text{ W}$$

Pada tegangan tidak seimbang, rugi tembaga stator ditentukan menurut persamaan (12). Pada ketidakseimbangan tegangan 1 %, rugi tembaga stator adalah:

$$P_{c1u} = (2,2^2 + 2^2 + 1,75^2) \cdot 7,143 = 85 \text{ W}$$

Pada tegangan tidak seimbang, rugi tembaga rotor ditentukan menurut persamaan (13). Pada ketidakseimbangan tegangan 1 %, rugi tembaga rotor adalah:

$$P_{c2u} = (3,7^2 + 3,6^2 + 3,6^2) \cdot 0,795 = 32 \text{ W}$$

Dengan menganggap rugi *stray* 7 % dari rugi daya total pada tegangan seimbang ditentukan menurut persamaan (11), yaitu:

$$P_{it} = 71 + 80 + 31 + 24 + 13 = 219 \text{ W}$$

dan rugi daya total pada ketidakseimbangan tegangan 1 % ditentukan menurut persamaan (15), yaitu:

$$P_{ilu} = 71 + 85 + 32 + 24 + 16 = 228 \text{ W}$$

Pada beban nominal, daya keluaran motor 1000 W. Dalam penelitian ini motor dibebani 55,1 % dari beban nominalnya, sehingga daya keluaran $P_o = 551 \text{ W}$.

Berdasarkan persamaan (10), efisiensi motor pada tegangan seimbang adalah:

$$\eta = \frac{551}{551 + 219} 100 \% = 71,559 \%$$

Pada tegangan tidak seimbang, efisiensi motor ditentukan menurut persamaan (16), dan efisiensi motor pada ketidakseimbangan tegangan 1 % adalah:

$$\eta_{ub} = \frac{551}{551 + 228} 100 \% = 70,732 \%$$

Dengan metode analisis yang sama, diperoleh hasil analisis efisiensi motor pada tegangan tidak seimbang sebagaimana ditunjukkan pada tabel 3 berikut ini.

Tabel 3. Efisiensi motor pada tegangan tidak seimbang

F_v (%)	P_{ilu} (W)	η_{ub} (%)
0	219	71,559
1	228	70,732
2	238	69,835
3	250	68,789
4	266	67,442
5	287	65,752

C. Peningkatan Konsumsi dan Biaya Tenaga Listrik

Dengan persentase pembebanan 55,1 % dari beban nominal pada tegangan seimbang, daya listrik yang dikonsumsi motor atau daya masukan motor adalah:

$$P_i = 551 + 219 = 770 \text{ W}$$

Pada tegangan tidak seimbang, konsumsi daya listrik motor meningkat karena adanya peningkatan rugi daya. Berdasarkan persamaan (17) dan (18), peningkatan rugi daya dan persentase peningkatan rugi daya pada ketidakseimbangan tegangan 1 %, adalah:

$$P_{ii} = 1000 \cdot 0,551 \left(\frac{100}{70,732} - \frac{100}{71,559} \right) = 9 \text{ W}$$

$$LI = \frac{9}{219} 100 \% = 4,11 \%$$

Apabila motor beroperasi selama 6000 jam dalam satu tahun seperti waktu operasi industri, dan beroperasi pada 55,1 % dari beban nominal pada tegangan seimbang, maka konsumsi tenaga listrik motor pada tegangan seimbang adalah:

$$H_b = 770 \cdot 6000 = 4\,620\,000 \text{ Wh} = 4\,620 \text{ kWh}$$

Berdasarkan Peraturan Presiden Nomor 8 Tahun 2011 tentang tarif tenaga listrik yang disediakan PT Perusahaan Listrik Negara (PLN), tarif dasar listrik untuk industri dengan daya 200 kVA pada tegangan rendah adalah adalah Rp 800 per kWh. Jadi biaya tenaga listrik pada tegangan seimbang nominal adalah:

$$CST = 4620 \cdot 800 = \text{Rp } 3.696.000,-$$

Berdasarkan persamaan (19) dan (20), peningkatan konsumsi tenaga listrik dan peningkatan biaya tenaga listrik pada ketidakseimbangan tegangan 1 % adalah:

$$H_{ii} = 9 \cdot 6000 = 54\,000 \text{ Wh} = 54 \text{ kWh}$$

$$CST_{ii} = 54 \cdot 800 = \text{Rp } 43.200,-$$

Berdasarkan persamaan (21), persentase peningkatan biaya tenaga listrik pada ketidakseimbangan tegangan 1 % adalah:

$$CI = \frac{43200}{3\,696\,000} 100\% = 1,169 \%$$

Dengan metode analisis yang sama seperti diuraikan diatas, diperoleh persentase peningkatan rugi daya, peningkatan dan persentase peningkatan biaya tenaga listrik pada tegangan tidak seimbang sebagaimana ditunjukkan pada tabel 4 berikut ini.

Tabel 4. Persentase peningkatan rugi daya dan peningkatan biaya tenaga listrik pada tegangan tidak seimbang

F_v (%)	LI (%)	CST_{ii} (Rp)	CI (%)
0	0	0	0
1	4,110	43.200	1,169
2	8,676	91.200	2,468
3	14,155	148.800	4,026
4	21,461	225.600	6,107
5	31,050	326.400	8,831

D. Pembahasan

Dari uraian diatas dapat diketahui bahwa tegangan tidak seimbang pada motor induksi tiga fasa menyebabkan peningkatan rugi daya dan peningkatan biaya tenaga listrik. Pada tegangan seimbang nominal dengan beban 55,1 % dari beban nominal atau daya keluaran 551 W, motor menyerap daya listrik 770 W dengan rugi daya 219 W. Pada ketidakseimbangan tegangan 1 %, rugi daya meningkat dari 219 W menjadi 228 W atau rugi daya meningkat 4,110 % (tabel 4), dan efisiensi menurun dari 71,559

% menjadi 70,732 % (tabel 3). Dengan tarif listrik Rp 800 per kWh, biaya tenaga listrik pada tegangan seimbang nominal per tahun adalah Rp 3.696.000. Pada ketidakseimbangan tegangan 1 %, biaya tenaga listrik meningkat Rp 43.200 atau biaya tenaga listrik meningkat 1,169 % (tabel 4).

Pada ketidakseimbangan tegangan 2 %, rugi daya meningkat 8,676 %, efisiensi menurun dari 71,559 % menjadi 69,835, dan biaya tenaga listrik meningkat Rp 91.200 atau meningkat 2,468 %. Pada ketidakseimbangan tegangan 5 %, rugi daya meningkat 31,050 %, efisiensi menurun menjadi 65,752 %, dan biaya tenaga listrik meningkat Rp 326.400 atau meningkat 8,831 %.

Dengan demikian, makin besar persentase ketidakseimbangan tegangan, rugi daya pada motor induksi tiga fasa makin meningkat, efisiensi makin menurun dan biaya tenaga listrik makin meningkat.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa tegangan masukan yang tidak seimbang pada motor induksi tiga fasa menyebabkan peningkatan rugi daya, penurunan efisiensi dan peningkatan biaya tenaga listrik yang dikonsumsi motor. Pada ketidakseimbangan tegangan 1 %, rugi daya meningkat 4,110 % dan biaya tenaga listrik meningkat Rp 43.200 atau meningkat 1,169 %. Pada ketidakseimbangan tegangan 5 %, rugi daya meningkat 31,050 % dan biaya tenaga listrik meningkat Rp 326.400 atau meningkat 8,831 %.

Untuk memperkecil kerugian yang ditimbulkan ketidakseimbangan tegangan pada motor induksi tiga fasa yang banyak dioperasikan di industri, disarankan beban-beban satu fasa didistribusikan secara seimbang pada ketiga fasa yang melayani beban-beban satu fasa tersebut.

Disamping itu disarankan adanya penelitian yang lebih komprehensif mengenai dampak ketidakseimbangan tegangan motor induksi tiga fasa pada industri, baik ditinjau dari segi teknis maupun dari segi ekonomi.

V. DAFTAR PUSTAKA

Bureau of Energy Efficiency. 2006. *Best Practice Manual Electric Motors*. India: Devki Energy Consultancy

Chakrasali, R.L, Shelavant, V.R. & Nagaraja, H.N. 2011. "A Novel Method of Starting Induction Motor: A Comparative Study". *International Journal of Power Electronic and Drive System*, Vol. 1 (1), pp. 41-46.

Ebadi, A.,Mirzaie, M. and Gholamian, A. 2012. "A Comparison Between Electrical Circuit and Finite Element Modeling Methods for Performance Analysis of a Three-Phase Induction Motor under Voltage

unbalance”. *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*, Vol. 8 (2), pp. 188-194.

IEC Standard 60034-31. 2009 : *Rotating Electric Machines*.

Kostic, M. and Nikolic, A. 2010. “Negative Consequence of Motor Voltage Asymmetry and Its Influence to the Unefficient Energy Usage”. *WSEAS Transaction on Circuits and Systems*, Vol. 9(8), pp.547-556

Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 8 Tahun 2011 tentang Tarif Tenaga Listrik PT. PLN (Persero).

Pillay, P., Hofmann, P. and Manyage, M. 2002. “Derating of Induction Motors Operating With a Combination of Unbalanced Voltages and Over or Undervoltages”. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.17 (4), pp. 485-491.

Plummer, I. 2011 “Asymmetry In Distribution Systems: Causes, Harmful Effects and Remedies,” M.S.thesis, Dept. Electrical and Computer Eng., Louisiana State University, USA.

Rao, A.N.M, Reddy, K.R. and Ram, B.V.S. 2011. “Power Quality Disturbance on Performance of Vector Controlled Variable Frequency Induction Motor”. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, Vol.1 (5), pp.149-157.

Schneider Electric. 2006. “Monitoring Induction Motors for Power Quality (Part 1)”. *Power Logic Solutions*, Vol. 8 (1), pp.1-5.

_____ 2006. “Monitoring Induction Motors for Energy Saving (Part 2)”. *Power Logic Solutions*, Vol. 8 (2), pp.1-4.

Sen, P. C. 1997. *Principles of Electric Machines And Power Electronics*. New York: John Wiley & Sons.

Shandu, K.S. and Chaudhary, V. 2009. “Steady State Modelling of Induction Motor Operating With Unbalanced Supply System”. *WSEAS Trans.Circuits and Systems*, Vol. 8 (2), pp. 197-205.

Quispe, E.C. et-al. 2011. “Experimental Study of the Effect of Positive Sequence Voltage on the Derating of Induction Motors under Voltage Unbalance”. *IEEE International Machines & Drive Conference (IEMDC)*.