

CIRI GETARAN MEKANIK DAN ARUS CATU PADA MOTOR LISTRIK INDUKSI 3-FASA AKIBAT EKSENTRISITAS CELAH UDARA

Indra Nurhadi ⁽¹⁾, Andi Isra Mahyuddin ⁽¹⁾, M. Ahmarudin ⁽²⁾

⁽¹⁾Laboratorium Dinamika PPAU-IR-ITB

Departemen Teknik Mesin, FTI-ITB

Jalan Ganesha 10, Bandung 40132

Telp. 022-2511529

e-mail : nurhadi@komputasi.ms. itb.ac.id

⁽²⁾Lulusan Program Pasca Sarjana Teknik Mesin ITB

Ringkasan

Makalah ini membahas kaji teoritik dan eksperimental untuk menentukan ciri arus catu stator dan getaran badan motor listrik induksi 3-fasa akibat sumbu rotor dan sumbu stator tak segaris (eksentris). Dari kaji teoritik dapat dirumuskan bahwa eksentrisitas ditandai oleh "getaran" arus stator sekaligus getaran mekanik pada frekuensi yang disebut "Principal Slot Harmonics (PSH)" dan "Dynamics Eccentricity Components (DEC)" yang bergantung pada jumlah slot pada stator dan rotor, jumlah pole dan slip. Eksperimen dilakukan untuk mengkaji penerapannya dalam praktek. Analisis spektrum pada motor uji menunjukkan bahwa sinyal arus stator dan sinyal getaran badan motor mengandung frekuensi PSH dan DEC yang amplitudonya meningkat karena eksentrisitas.

Abstract

This paper discusses theoretical and experimental study to determine the signature of stator supply current and stator vibration of 3-phase induction motor resulting from airgap eccentricity. Based on the theoretical study it can be formulated that the signature due to eccentricity is affected by number of slots on the rotor and the stator as well as slip, defined as "Principal Slot Harmonics (PSH)" and "Dynamics Eccentricity Components (DEC)". To study its feasibility for practical use a set of experiments was performed and the predicted signature was identified. Using the test rig, it was demonstrated that the magnitude of PSH and DEC in stator current and body vibration increase due to eccentricity.

Kata kunci : motor induksi, eksentrisitas celah udara, ciri getaran.

1. PENDAHULUAN

Pemantauan kondisi kesehatan mesin menjadi semakin penting perannya seiring dengan semakin meningkatnya jumlah instalasi mesin maupun proses produksi yang dioperasikan secara otomatis. Motor listrik, yang secara tradisi dianggap sangat terpercaya dan tidak memerlukan perhatian berlebih, menjadi bagian kritis dari berbagai peralatan otomatis tersebut. Oleh karena itu pemantauan kondisi motor listrik menjadi semakin penting untuk menghindari terhentinya proses produksi secara tak terjadwal akibat kerusakan motor.

Pada umumnya, pemantauan kondisi mesin rotasi dilakukan dengan memanfaatkan sinyal getaran mekanik pada saat mesin beroperasi. Untuk motor listrik, cara ini mungkin hanya cocok untuk memprediksi kondisi komponen mekaniknya saja. Untuk pemantauan kondisi motor listrik secara lengkap, analisis sinyal getaran arus catu stator kelihatannya diperlukan baik sebagai pembanding, pelengkap atau pengganti.

Studi Terdahulu

Penelitian tentang pemantauan kondisi motor listrik dengan memanfaatkan analisis getaran dan arus catu telah dilakukan oleh penulis bersama Prayoga [1] pada tahun 1996. Dengan berbekal landasan teori yang berasal dari buku acuan para praktisi, penelitian eksperimental pada motor induksi yang diberi eksentrisitas belum dapat menghasilkan temuan yang konklusif mengenai ciri getarannya. Spektrum getaran yang diperoleh menunjukkan sejumlah puncak yang secara konsisten muncul yang kemungkinan dapat dipakai sebagai ciri getaran. Dari sejumlah puncak tersebut, karena keterbatasan landasan teori, hanya beberapa yang teridentifikasi sebagai ciri eksentrisitas, dirumuskan sebagai getaran dengan frekuensi $2 \times$ frekuensi jala-jala listrik. Walaupun temuan ini sesuai dengan [2], pemanfaatannya untuk kegunaan praktis jauh dari mencukupi mengingat frekuensi tersebut dapat juga ditimbulkan oleh berbagai kerusakan lainnya.

Dasar dari semua teknik yang secara terpercaya dapat dipakai untuk mendiagnostik kerusakan motor listrik adalah

pemahaman perilaku listrik dan elektromagnetik pada motor tersebut, baik dalam keadaan normal maupun dalam keadaan rusak. Oleh karena itu untuk melanjutkan penelitian ini diperlukan kajian teoritis yang lebih komprehensif dan mendalam mengenai *Unbalanced Magnetic Pull* (UMP), yaitu suatu fenomena yang melandasi terjadinya eksitasi getaran pada motor listrik akibat eksentrisitas, yang secara ringkas disajikan berikut.

Eksentrisitas dapat terjadi dalam dua bentuk yaitu eksentrisitas statis (tidak berubah dengan waktu) dan dinamis (berubah dengan waktu). Contoh eksentrisitas statis misalnya yang terjadi karena ketakbulatan stator atau sumbu rotor yang tidak segaris dengan sumbu stator. Sedangkan eksentrisitas dinamis adalah yang terjadi karena ketakbulatan rotor.

Penelitian mengenai perilaku motor induksi yang beroperasi pada kondisi eksentris ternyata telah cukup banyak dilakukan dan dipublikasikan dalam makalah internasional seperti [3-9]. *Cameron, Thomson dan Dow* [3] telah melakukan analisis teoritik untuk memprediksi frekuensi ciri getaran arus stator dan getaran badan motor akibat eksentrisitas. Mereka juga melakukan eksperimen untuk memvalidasi model yang dikembangkan. *Toliat, Arefeen dan Parlos* [3] telah mencoba mengembangkan metoda untuk melakukan simulasi dinamik pengaruh eksentrisitas celah udara pada motor induksi. Metoda yang dikembangkan adalah berdasarkan pendekatan rangkaian magnetik terkopel. *Verma dan Natarajan* [4] telah mempelajari perubahan medan magnetik pada celah udara sebagai fungsi eksentrisitas statik. Mereka melakukan eksperimen dengan menggunakan *search coils* yang dipasang di stator.

Motor listrik secara mekanik tidak berbeda dari mesin rotasi lainnya, yang terdiri atas komponen rotasi berupa rotor, poros dan bantalan serta stator. Rotor berputar karena ada interaksi antara rotor dan stator berupa gaya atau momen. Pada motor listrik gaya ini adalah gaya yang ditimbulkan oleh medan magnet pada celah udara antara rotor dan stator. Interaksi rotor-stator ini kemudian menjelma menjadi getaran pada arus catu stator dan getaran mekanik pada badan motor. Pembahasan gaya interaksi rotor-stator pada motor induksi dalam kondisi eksentrik diantaranya dapat ditemui pada literatur [10-14].

2. PREDIKSI TEORITIS

Distribusi Fluks pada Celah Udara dan Getaran Elektrik [2]

Jika pada motor induksi terjadi eksentrisitas antara rotor dan stator maka celah udara yang memisahkan keduanya menjadi tidak seragam. Ketakseragaman ini menyebabkan distribusi gaya magnetik radial antara rotor dan stator menjadi tidak seimbang. Model matematik disini dikaji untuk mengenali frekuensi yang timbul pada

badan motor maupun pada arus stator jika fenomena eksentrisitas ini terjadi.

Model matematik berikut ini diturunkan dengan menggunakan pendekatan gelombang permeansi celah udara. Ketakseragaman celah udara dalam arah longitudinal dianggap tidak ada.

Permeansi celah udara antara stator berslot dan rotor rata adalah

$$\phi_{st} = \sum_{n_{st}=0}^{\infty} \phi_{n_{st}} \cos n_{st} S \theta \quad (1)$$

dengan S = jumlah slot stator

$n_{st} = 0, 1, 2, \dots$

θ = sudut mekanik

$\phi_{n_{st}}$ = konstanta.

Permeansi celah udara antara stator rata dengan rotor berslot adalah

$$\phi_{rt}(\theta, t) = \sum_{n_r=0}^{\infty} \phi_{n_r} \cos(n_r R(\theta - \omega_r t)) \quad (2)$$

dengan ω_r = kecepatan sudut mekanik (rad/s)

R = jumlah slot rotor

Resultan dari kedua permeansi di atas dapat dinyatakan sebagai hasil kali antara konstanta dengan suatu harga cosinus sebagai berikut

$$\phi_{rt, st} = \sum_{n_r=0}^{\infty} \sum_{n_{st}=0}^{\infty} \phi_{n_r, n_{st}} \cos(n_r R \pm n_{st} S)\theta - n_r R \omega_r t \quad (3)$$

Jika terjadi eksentrisitas statik, maka jarak celah udara (*airgap*) hanya merupakan fungsi sudut θ saja (disebut sudut ruang).

Dengan mengasumsikan rotor - stator adalah lingkaran sempurna (rata, tidak berslot), maka permeansi eksentrisitas statik dapat dinyatakan sebagai

$$\phi_{se}(\theta) = \sum_{n_s=0}^{\infty} \phi_{n_s} \cos n_s \theta \quad (4)$$

Amplitudo dari harmonik gelombang permeansi di atas dapat ditentukan dengan analisis Fourier, sehingga

$$\phi_{n_s} = \frac{\mu_o}{g'} \frac{2 \left\{ 1 - \sqrt{1 - (\varepsilon')^2} \right\}^{n_s}}{(\varepsilon')^{n_s} \sqrt{1 - (\varepsilon')^2}} \quad (5)$$

dengan $n_s = 1, 2, 3, \dots$

μ_o = permeabilitas

ε' = eksentrisitas relatif efektif

g' = jarak celah udara efektif rata-rata dengan memperhitungkan adanya slot

Persamaan (5) menunjukkan bahwa jika tingkat eksentrisitas statik bertambah, maka besar ϕ_{ns} juga akan bertambah.

Jarak radial celah udara antara rotor dan stator, jika terjadi eksentrisitas dinamik adalah merupakan fungsi sudut ruang dan waktu. Gelombang permeansinya dapat dinyatakan sebagai

$$\phi_{de}(\theta, t) = \sum_{n_d=0}^{\infty} \phi_{n_d} \cos(n_d(\theta - \omega_r t)) \quad (6)$$

Fenomena saturasi dapat dinyatakan sebagai gelombang permeansi dengan dua kali jumlah kutub (*pole*) dan dua kali frekuensi gelombang dasar karena celah udara menjadi lebih besar pada daerah kepadatan flux magnetik maksimum. Dengan demikian, permeansi celah udara antara stator dan rotor rata yang konsentris dikombinasikan dengan terjadinya efek kejenuhan dapat dinyatakan sebagai berikut

$$\phi_{sa}(\theta, t) = \sum_{n_{sa}=0}^{\infty} \phi_{n_{sa}} \cos(n_{sa}(2p\theta - 2\omega_1 t)) \quad (7)$$

dengan ω_1 = kecepatan sudut (rad elek./s)
 p = jumlah pasangan kutub = $P/2$
 $n_{sa} = 0, 1, 2, \dots$
 $\phi_{n_{sa}}$ = konstanta.

Dengan menggabungkan persamaan (3), (4), (6) dan (7) (seperti cara untuk mendapatkan persamaan (3) dari persamaan (1) dan (2)), maka didapat

$$\phi_{tot}(\theta, t) = \sum_{n_r=0}^{\infty} \sum_{n_s=0}^{\infty} \sum_{n_d=0}^{\infty} \sum_{n_{sa}=0}^{\infty} \phi_{n_r, n_s, n_d, n_{sa}} \cos\{(n_r R \pm n_s S \pm n_d \pm 2n_{sa} P) \theta - ((n_r R \pm n_d) \omega_r \pm 2n_{sa} \omega_1) t\} \quad (8)$$

MMF yang dihasilkan oleh arus yang melalui kumparan stator dan rotor mempunyai banyak harmonik. Dengan mengabaikan sudut fasa dan *skew* maka MMF tersebut dapat dinyatakan sebagai

$$\begin{aligned} \mathcal{F}_{tot}(\theta, t) &= \sum_{n_{\theta s}=1}^{\infty} \sum_{n_{\omega s}=-\infty}^{\infty} F_{n_{\theta s}, n_{\omega s}} \cos(n_{\theta s} P \theta - n_{\omega s} \omega_1 t) \\ &+ \sum_{n_{\theta r}=1}^{\infty} \sum_{n_{\omega r}=-\infty}^{\infty} F_{n_{\theta r}, n_{\omega r}} \cos(n_{\theta r} P \theta - (n_{\omega r} \omega_1 + n_{\theta r} P \omega_r) t) \end{aligned} \quad (9)$$

Distribusi kerapatan flux magnetik pada celah udara adalah hasil kali MMF dengan permeansi, sehingga penggabungan persamaan (8) dan (9) menghasilkan

$$B(\theta, t) = \sum_{m_s, \Omega_s} B_{m_s, \Omega_s} \cos(m_s \theta - \Omega_s t) + \sum_{m_r, \Omega_r} B_{m_r, \Omega_r} \cos(m_r \theta - \Omega_r t)$$

$$+ \sum_{m_r, \Omega_r} B_{m_r, \Omega_r} \cos(m_r \theta - \Omega_r t) \quad (10)$$

dengan

$$\begin{aligned} m_s &= n_{rt} R \pm n_{st} S \pm n_s \pm n_d \pm 2n_{sa} P \pm n_{\theta s} P \\ \Omega_s &= (n_{rt} R \pm n_d) \omega_r \pm 2n_{sa} \omega_1 \pm n_{\omega s} \omega_1 \\ m_r &= n_{rt} R \pm n_{st} S \pm n_s \pm n_d \pm 2n_{sa} P \pm n_{\theta r} P \\ \Omega_r &= (n_{rt} R \pm n_d \pm n_{\theta r} P) \omega_r \pm 2n_{sa} \omega_1 \pm n_{\omega r} \omega_1 \end{aligned}$$

Ciri Eksentrisitas pada Spektrum Arus Stator

Distribusi rapat flux magnetik adalah fungsi sudut ruang dan waktu. Komponen waktu tersebut dapat dimanfaatkan untuk memperkirakan kandungan frekuensi pada flux magnetik tersebut. Komponen waktu pertama pada persamaan (10) adalah

$$\Omega_s = (n_{rt} R \pm n_d) \omega_r \pm 2n_{sa} \omega_1 \pm n_{\omega s} \omega_1 \quad (11)$$

sedangkan komponen waktu kedua pada persamaan (11) adalah

$$\Omega_r = (n_{rt} R \pm n_d \pm n_{\theta r} P) \omega_r \pm 2n_{sa} \omega_1 \pm n_{\omega r} \omega_1 \quad (12)$$

Putaran poros dengan putaran sinkron dihubungkan oleh persamaan

$$n_r = (1-s)n_s \quad (13)$$

dengan n_r adalah putaran poros (rad mekanik/s), s adalah slip dan n_s = putaran sinkron (rad mekanik/s) yang dirumuskan sebagai

$$n_s = \frac{120f_1}{P} = \frac{60f_1}{p} \quad (14)$$

dengan f_1 adalah frekuensi jala-jala (frekuensi sinkron) dalam Hz. Substitusikan persamaan (14) ke persamaan (13) sehingga menjadi

$$\begin{aligned} n_r &= \frac{60(1-s)f_1}{p} \\ \text{atau } \omega_r &= \frac{2\pi(1-s)f_1}{p} \end{aligned} \quad (15)$$

Substitusikan persamaan (15) ke persamaan (11) sehingga didapatkan

$$\begin{aligned} \Omega_s &= (n_{rt} R \pm n_d) \frac{2\pi(1-s)f_1}{p} \pm 2n_{sa} \omega_1 \pm n_{\omega s} \omega_1 \\ &= (n_{rt} R \pm n_d) \frac{2\pi(1-s)f_1}{p} \pm 2n_{sa} 2\pi f_1 \pm n_{\omega s} 2\pi f_1 \\ &= ((n_{rt} R \pm n_d) \frac{(1-s)}{p} \pm 2n_{sa} \pm n_{\omega s}) 2\pi f_1 \end{aligned} \quad (16)$$

Frekuensi gelombang kerapatan fluks magnetik pertama adalah

$$f_{sh1} = \frac{\Omega_s}{2\pi} = ((n_{rt} R \pm n_d) \frac{(1-s)}{p} \pm 2n_{sa} \pm n_{\omega s}) f_1 \quad (17)$$

Dengan cara yang sama — substitusikan persamaan (15) ke persamaan (12) kemudian bagi dengan 2π — maka frekuensi gelombang kerapatan fluks magnetik kedua adalah

$$f_{sh2} = \{(n_{rt}R \pm n_d \pm n_{\theta}P) \frac{(1-s)}{p} \pm 2n_{sa} \pm n_{\omega}S\}f_1 \quad (18)$$

dengan n_{rt} , n_d , n_{sa} , n_{ω} , n_{θ} , dan n_{ω} adalah konstanta integer.

Gelombang harmonik B (kerapatan fluks magnetik) di atas bergerak relatif terhadap stator, sehingga gelombang tersebut akan menginduksikan arus pada stator dengan harmonik dan frekuensi yang sama, sehingga seseorang dapat mendeteksi terjadinya eksentrisitas dengan cara menganalisis spektrum arus stator.

Pada persamaan (17) dan (18) harga f_{sh1} dan f_{sh2} untuk $n_d = 0$ disebut frekuensi PSH (*principal slot harmonic*), sedangkan untuk $n_d \neq 0$ disebut frekuensi DEC (*dynamic eccentricity component*). Frekuensi PSH merupakan ciri adanya eksentrisitas statik, sedangkan frekuensi DEC merupakan ciri adanya eksentrisitas dinamik.

Frekuensi Ciri pada Spektrum Getaran Badan Motor

Gaya radial pada stator adalah sebanding dengan kuadrat kerapatan flux magnetik [7,9,12,13]. Gaya radial persatuan luas dapat dinyatakan sebagai :

$$\sigma(\theta, t) = \frac{B^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (19)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (10) kedalam persamaan (13) dihasilkan

$$\sigma(\theta, t) = \sum_{m, \Omega} \sigma_{m, \Omega} \cos(m\theta - \Omega t) \quad (20)$$

dimana :

$$m = n'_{rt}R \pm n'_{st}S \pm n'_s \pm n'_d \pm 2n'_{sa}P \pm n'_{\theta}P$$

$$\Omega = (n'_{rt}R \pm n'_d)\omega_r \pm 2n'_{sa}\omega_1 \pm n'_{\omega}S\omega_1$$

Komponen waktu pada persamaan (20) memberikan jalan untuk memprediksi kandungan frekuensi pada harmonik fungsi gaya magnetik tak seimbang (*unbalanced magnetic pull* (UMP)) yang merupakan gaya pemaksa pada frame stator. Komponen waktu tersebut adalah

$$\Omega = (n'_{rt}R \pm n'_d)\omega_r \pm 2n'_{sa}\omega_1 \pm n'_{\omega}S\omega_1 \quad (21)$$

Dengan cara sama seperti pada penurunan persamaan (17) dan (18) — substitusikan persamaan (15) ke persamaan (21) kemudian dibagi dengan 2π — maka frekuensi gaya pemaksanya adalah

$$f_{sv} = \{(n'_{rt}R \pm n'_d) \frac{(1-s)}{p} \pm 2n'_{sa} \pm n'_{\omega}S\}f_1 \quad (22)$$

yang mana f_{sv} didefinisikan sebagai frekuensi getaran harmonik slot getaran (*frequency of vibration slots harmonic*), n'_{rt} , n'_d , n'_{sa} , dan n'_{ω} adalah bilangan integer. Gaya pemaksa tersebut akan ditransmisikan oleh stator ke bagian permukaannya pada frekuensi yang sama (persamaan (22)). Dengan demikian getaran yang dirasakan oleh sensor yang dipasang di permukaan stator mempunyai kandungan frekuensi yang merupakan ciri dari eksentrisitas statik dan dinamik.

Seperti halnya pada persamaan (17) dan (18), maka harga f_{sv} pada persamaan (22) untuk $n'_d = 0$ disebut frekuensi PSH (*principal slot harmonic*), sedangkan untuk $n'_d \neq 0$ disebut frekuensi DEC (*dynamic eccentricity component*). Frekuensi PSH merupakan ciri adanya eksentrisitas statik, sedangkan frekuensi DEC merupakan ciri adanya eksentrisitas dinamik.

Penentuan Nilai Konstanta untuk Menghitung Frekuensi Ciri Eksentrisitas

Walaupun secara teoritis konstanta pada persamaan (17), (18) dan (19) dapat diberi harga bervariasi dari 0 sampai dengan ∞ , secara praktis hal tersebut tidak dimungkinkan karena konstanta berharga tinggi akan menghasilkan frekuensi tinggi di luar jangkauan alat ukur yang digunakan (seperti MSA). Disamping itu, adanya eksentrisitas dapat ditunjukkan hanya dengan satu frekuensi PSH dan dua frekuensi DEC yang mengapitnya.

Berdasarkan penurunan persamaan (17), (18) dan (22), secara teoritik amplitudo getaran pada frekuensi ciri eksentrisitas akan makin kecil untuk harga konstanta (n_{rt} , n_d , n_{sa} , n_{ω} , n_{θ} , n_{ω} dan n'_{rt} , n'_d , n'_{sa} , dan n'_{ω}) yang makin besar karena konstanta tersebut muncul dari deret Fourier yang biasanya mempunyai amplitudo yang makin kecil untuk suku-suku orde tinggi.

Dalam penelitian ini, penulis menggunakan harga konstanta yang bervariasi dari 0 sampai dengan 2 untuk persamaan-persamaan tersebut, walaupun getaran dengan frekuensi PSH dan DEC masih dapat ditemui dengan jelas untuk harga konstanta sampai dengan 7. Hasil prediksi teoritis tertulis dalam tabel 1 berikut.

Tabel 1. DEC dan PSH Hasil Prediksi Teoritis.

Beban	Low DEC	PSH	HighDEC
2,0 kW	1008,75 Hz	1033,33 Hz	1057,9 Hz
4,0	989,90	1014,00	1038,1
5,6	977,55	1001,33	1025,1

3. KAJI EKSPERIMENTAL

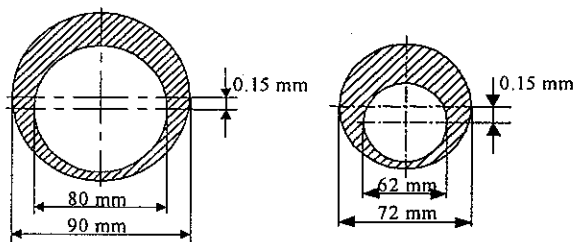
Perangkat Percobaan

Untuk melaksanakan percobaan dibuatlah benda uji berupa *motor-generator set* yang dilengkapi peralatan pengukuran dan analisis getaran. Motor uji dipilih dari jenis 3 fasa dengan kapasitas yang tidak terlalu kecil (5,5 kW) supaya dimensinya cukup besar untuk memudahkan penyetelan eksentrisitas. Motor yang cukup besar selain memudahkan penyetelan eksentrisitas juga diharapkan dapat membangkitkan sinyal getaran listrik dan mekanik yang cukup besar sehingga lebih mudah dideteksi.

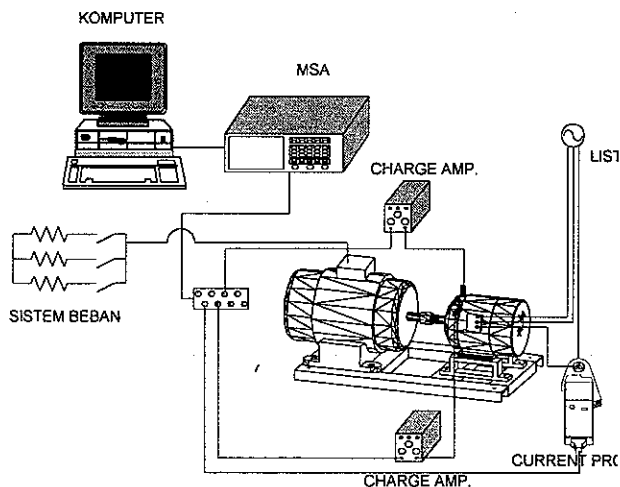
Benda uji harus dirancang dan dibuat sedemikian rupa sehingga sinyal getaran yang tidak diinginkan (*background signal*) dapat diminimalkan. Dengan demikian sinyal

getaran yang berasal dari eksentrisitas menjadi dominan. Untuk mencapai tujuan ini frekuensi pribadi benda uji harus berada di atas putaran kerjanya (pengukuran frekuensi pribadi dengan FRF dan exciter menghasilkan frekuensi terendah 81 Hz). Motor dan generator dihubungkan dengan kopling fleksibel sehingga getaran karena *misalignment* kopling dapat ditekan. Rancangan fundasi motor dan generator harus memberikan kemudahan dalam bongkar-pasang serta penyetelan *alignments* yang pasti sehingga tidak mengganggu keterulangan hasil pengukuran akibat proses bongkar-pasang.

Dari hasil pengukuran diketahui bahwa diameter dalam stator rata-rata adalah 142,94 mm dan diameter luar rotor rata-rata adalah 142,06 mm, sehingga lebar celah udara adalah sebesar 0,44 mm. Celah sekecil ini cukup menimbulkan kesulitan dalam merancang cara pemberian eksentrisitas. Eksentrisitas dibuat dengan mengganti bantalan di kedua ujung poros dengan diameter luar yang lebih kecil dan menggantinya memakai *bushing* eksentris seperti pada gambar 1 sehingga diperoleh eksentrisitas sebesar



Gambar 1. Dua buah *bushing* eksentrik untuk menyetel eksentrisitas.



Gambar 2. Skema perangkat percobaan dan instrumentasinya.

0,15 mm. Sisa celah udara terkecil sebesar 0,19 mm diperlukan untuk mengantisipasi terjadinya eksentrisitas dinamik pada rotor dalam keadaan berputar.

Instrumentasi

Getaran mekanik diukur dengan dua buah accelerometer yang dipasang pada badan motor di dekat rumah bantalan dengan arah vertikal dan horisontal. Trafo arus (*clip on current transformer*) digunakan untuk mengukur "getaran" arus catu stator. Alat ini bekerja berdasar induksi elektromagnetik dan mempunyai sensitivitas 10 mV/A dengan jangkauan frekuensi sampai 50 kHz.

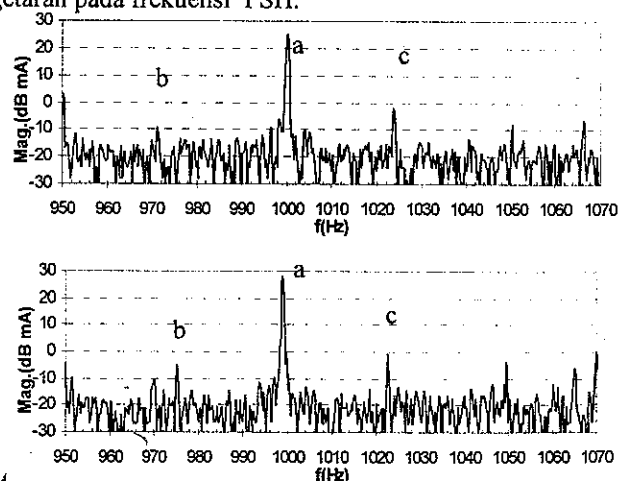
Kabel dari *accelerometer* dan trafo arus dihubungkan dengan charge amplifier dan selanjutnya dihubungkan dengan perangkat data akuisisi dan pemroses sinyal berupa komputer PC dan MSA HP 35650A. Fasilitas ini memungkinkan sinyal getaran diolah menjadi berbagai-bagai bentuk keluaran yang sesuai dengan keperluan.

4. HASIL DAN ANALISIS

Salah satu hal penting dalam pengukuran getaran adalah keterulangan hasil yang diperoleh. Data yang dihasilkan dalam penelitian ini telah diperiksa keterulangannya, yang secara rinci dapat dibaca pada [15].

Arus Stator

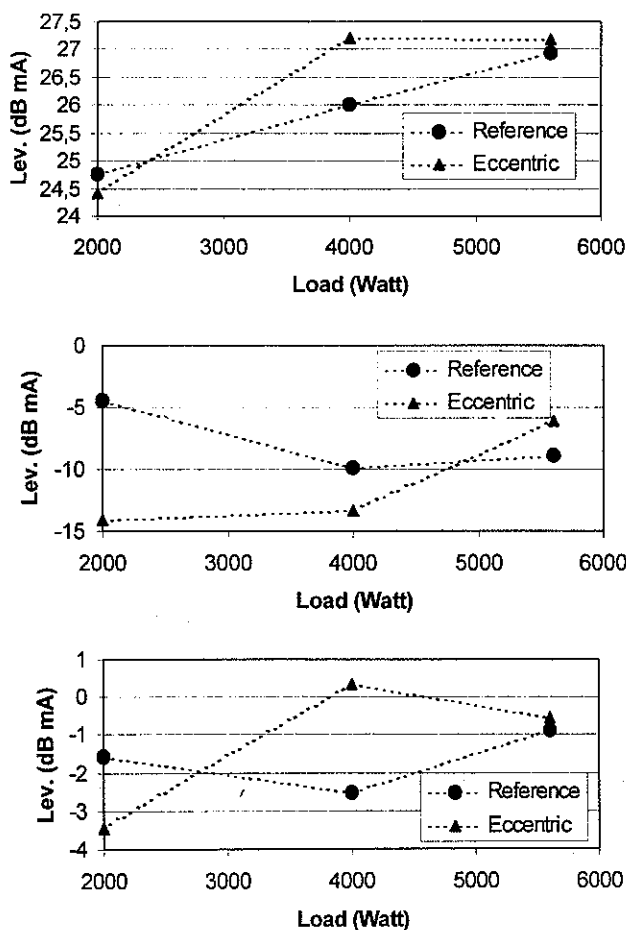
Pengaruh eksentrisitas statik pada getaran secara teoritik dapat dilihat pada persamaan (5). Penambahan eksentrisitas statik akan memperbesar harga amplitudo gelombang permeansi yang kemudian akan menambah kepadatan medan magnetik sehingga menambah besar arus yang diinduksikan ke stator. Dengan kata lain penambahan eksentrisitas statik akan menaikkan amplitudo komponen getaran pada frekuensi PSH.



Gambar 3. Spektrum frekuensi arus stator pada beban 5,6 kW. Atas:Kondisi referensi Bawah:Kondisi eksentrik (a = PSH, b = Lo-Dy, c = Hi-Dy)

Pada gambar 3 dapat dilihat perbandingan antara spektrum frekuensi hasil pengujian pada kondisi referensi dan pada kondisi eksentrik. Pada kondisi referensi amplitudo getaran PSH terekam sebesar 25,44 dB sedangkan pada kondisi eksentrik amplitudo tersebut naik menjadi 28,49 dB. Hasil ini sesuai dengan teori di atas yaitu bahwa amplitudo PSH akan naik jika eksentrisitas statik bertambah. Amplitudo komponen *Low-Dynamic* pada kondisi referensi tercatat sebesar -8,94 dB, sedangkan pada kondisi eksentrik komponen tersebut naik menjadi -4,94 dB. Sementara komponen *High-Dynamic* pada kondisi referensi mempunyai amplitudo sebesar -2 dB, sedang pada kondisi eksentrik komponen tersebut naik menjadi -0,42 dB.

Pengujian spektrum frekuensi dilakukan sebanyak lima kali baik pada kondisi referensi maupun kondisi eksentrik. Perbandingan amplitudo rata-rata komponen getaran pada frekuensi *PSH*, *Low* dan *High DEC* terhadap kenaikan beban pada kelima pengujian tersebut dapat dilihat pada gambar 4 berikut.



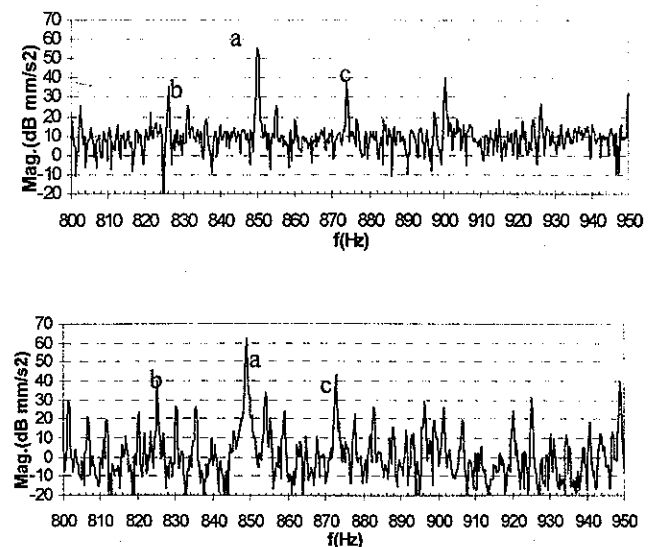
Gambar 4. Amplitudo rata-rata getaran ciri eksentrisitas pada arus stator vs. beban, atas=PSH, tengah=Low-DEC, bawah=High-DEC

Terlihat pada gambar 4, amplitudo rata-rata pada kondisi eksentrik untuk beban 4 kW dan 5,6 kW secara umum lebih tinggi bila dibandingkan dengan kondisi referensi, akan tetapi pada beban 2 kW hal sebaliknya terjadi. Gejala ini dapat terjadi karena variasi tegangan catu yang tidak dapat dihindari selama pengujian berlangsung. Analisa ini didasarkan atas logika bahwa untuk harga impedansi yang tetap (motor tidak mengalami perubahan jumlah lilitan atau pun harga tahanan) maka penurunan tegangan akan mengakibatkan penurunan arus listrik. Data perbandingan tegangan jala-jala selengkapnya dapat dilihat pada [15]. Pada gambar 4 juga dapat dilihat bahwa level rata-rata frekuensi ciri secara umum naik untuk beban yang makin bertambah.

Getaran Horisontal

Besar gaya eksitasi magnetik pada badan motor sebanding dengan kuadrat permeansi eksentrisitas statik. Ini berarti secara teoritik penambahan besar eksentrisitas juga akan menaikkan amplitudo PSH pada spektrum getaran badan motor baik dalam arah horisontal maupun vertikal.

Gambar 5 menunjukkan perbandingan salah satu hasil pengujian spektrum frekuensi getaran horisontal pada kondisi referensi dan kondisi eksentrik. Dari gambar tersebut dapat dibaca amplitudo getaran pada frekuensi PSH (850 Hz) pada kondisi referensi adalah sebesar 55,42 dB dan pada kondisi eksentrik bertambah menjadi 62,04 dB. Kecenderungan ini sesuai dengan prediksi teoritis di atas.



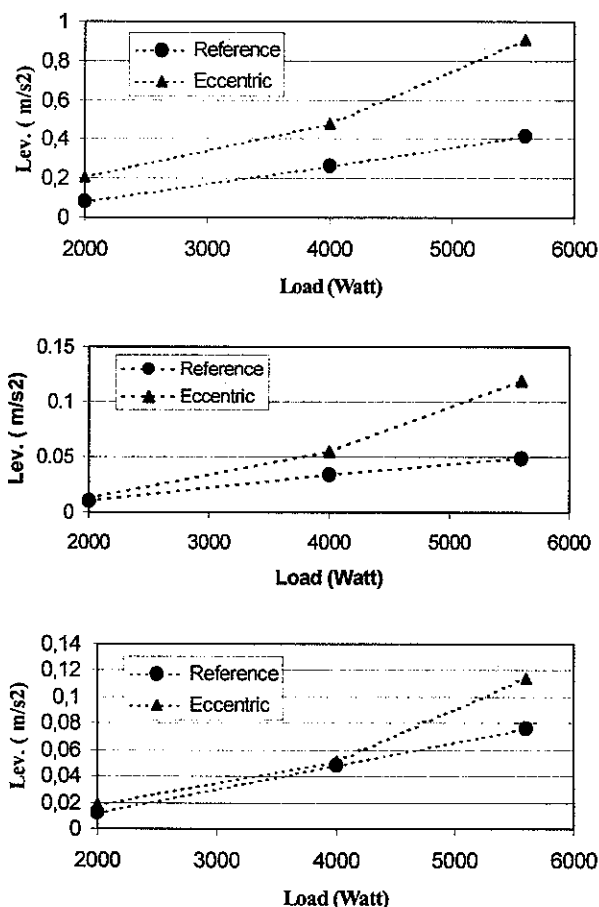
Gambar 5. Spektrum frekuensi getaran horisontal pada beban 5,6 kW. Atas=Kondisi referensi, bawah=Kondisi eksentrik (a = PSH, b = Lo-DEC, c = Hi-DEC)

Masih mengacu gambar 5, amplitudo getaran pada frekuensi *low DEC* (826,25 Hz) pada kondisi referensi adalah sebesar 35,43 dB, sedangkan pada kondisi eksentrik

naik menjadi 40,15 dB. Sementara amplitudo komponen getaran pada frekuensi *high DEC* (873,75 Hz) pada kondisi referensi sebesar 37,84 dB, dan pada kondisi eksentrik naik menjadi 43,31 dB. Pengujian yang dilakukan oleh *Cameron et al.* [2] menunjukkan hal yang sama.

Kurva perbandingan amplitudo rata-rata (dari 5 kali pengujian) komponen getaran *PSH*, *low DEC* dan *high DEC* dalam arah horisontal dapat dilihat pada gambar 6. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa amplitudo ketiga komponen getaran tersebut pada kondisi eksentrik lebih tinggi dibandingkan pada kondisi referensi dan bertambah dengan kenaikan beban.

Dengan membandingkan gambar 4 dengan gambar 6



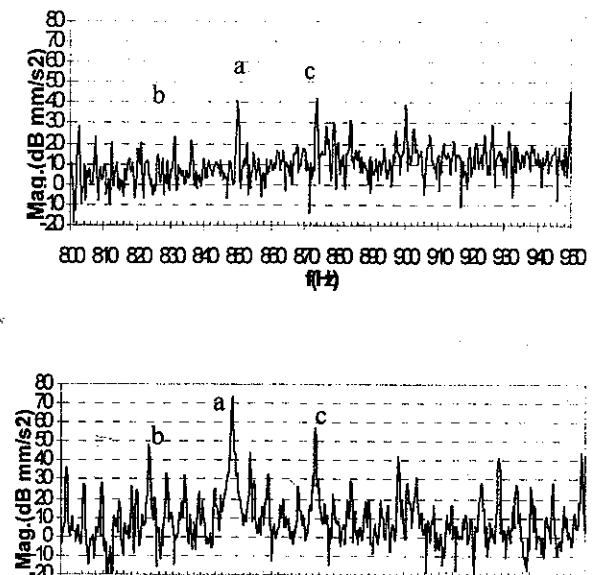
Gambar 6. Amplitudo rata-rata getaran ciri eksentrisitas (pada badan motor arah horisontal) vs. beban, atas=PSH, tengah=Lo-DEC, bawah=Hi-DEC

terlihat bahwa variasi tegangan arus catu lebih berpengaruh pada spektrum frekuensi arus stator daripada spektrum getaran horisontal.

Getaran Vertikal

Seperti yang terjadi pada getaran horisontal, penambahan eksentrisitas juga menaikkan amplitudo PSH pada spektrum getaran vertikal. Perbedaan antara spektrum getaran horisontal dan vertikal adalah pada harga dan besar kenaikan amplitudonya.

Gambar 7 menunjukkan perbandingan salah satu hasil pengujian spektrum frekuensi getaran vertikal pada kondisi referensi dan kondisi eksentrik. Pada gambar tersebut amplitudo getaran pada frekuensi PSH (850 Hz) pada kondisi referensi adalah sebesar 41,07 dB, sedangkan pada kondisi eksentrik bertambah menjadi 73,74 dB. Hal ini menunjukkan gejala yang sama dengan spektrum getaran horisontal dan arus stator, yaitu bahwa penambahan eksentrisitas statik akan menaikkan amplitudo getaran PSH.



Gambar 7 Spektrum frekuensi getaran vertikal pada beban 5,6 kW. Atas=Kondisi referensi, bawah=Kondisi eksentrik (a = PSH, b = Lo-DEC, c = Hi-DEC)

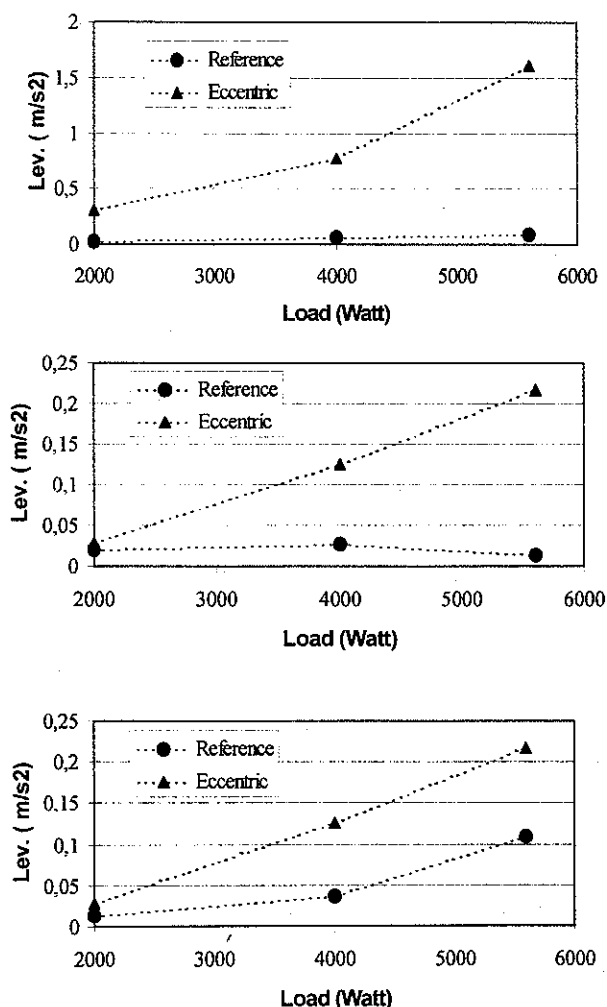
Selanjutnya, amplitudo komponen getaran pada frekuensi *low DEC* (826,25 Hz) pada kondisi referensi adalah sebesar 14,43 dB dan pada kondisi eksentrik amplitudo getaran tersebut naik menjadi 47,94 dB. Sedangkan amplitudo komponen getaran pada frekuensi *high DEC* (873,75 Hz) pada kondisi referensi sebesar 42,34 dB, dan pada kondisi eksentrik naik menjadi 56,99 dB. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan eksentrisitas statik juga menaikkan amplitudo komponen getaran pada frekuensi *low-dynamic* dan *high-dynamic* arah vertikal. Perlu diingat bahwa hal yang sama juga terjadi pada spektrum frekuensi getaran horisontal.

Amplitudo rata-rata (dari 5 kali pengujian) komponen getaran pada frekuensi PSH dan DEC arah vertikal sebagai

fungsi beban dapat dilihat pada gambar 8. Terlihat bahwa amplitudo pada kondisi eksentrik lebih tinggi bila dibandingkan dengan amplitudo pada kondisi referensi, dan bertambah sesuai dengan kenaikan beban.

5. KESIMPULAN DAN PENGEMBANGAN SELANJUTNYA

Melalui kaji literature secara mendalam telah dapat diperoleh persamaan-persamaan yang menyatakan hubungan antara eksentrisitas dan kandungan frekuensi pada getaran arus catu stator dan getaran badan motor induksi akibat eksentrisitas celah udara, yang didefinisikan sebagai PSH



Gambar 8. Amplitudo rata-rata getaran ciri eksentrisitas (pada badan motor arah vertical) vs. beban
Atas=PSH Tengah=Lo-DEC Bawah=Hi-DEC

dan DEC yang merupakan fungsi dari jumlah slot rotor, jumlah slot stator dan slip. Frekuensi ciri yang diprediksi

secara teoritis juga teridentifikasi pada perangkat percobaan yang disiapkan untuk validasi.

Seperti yang diharapkan, amplitudo getaran pada frekuensi tersebut bertambah untuk harga eksentrisitas dan beban yang makin besar, sedangkan harga frekuensinya menurun bila beban membesar. Namun demikian, fenomena yang terjadi pada getaran mekanik ini tidak sepenuhnya terjadi pada arus stator karena adanya kemungkinan pengaruh fluktuasi tegangan pada jala-jala listrik. Ini menuntut dilakukannya pengukuran dan analisis arus catu dengan memasukkan fluktuasi tegangan sebagai parameter sehingga pengaruhnya dapat dirumuskan.

Eksentrisitas akan terjadi pada motor listrik sedikit demi sedikit sesuai dengan laju kerusakan pada bantalan. Secara ekonomis motor listrik yang mengalami kerusakan seperti ini hanya akan dihentikan bila ambang batas eksentrisitasnya dicapai. Penelitian tentang ambang batas ini perlu dilakukan supaya teknik ini dapat diterapkan di industri.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Jenderal Perguruan Tinggi Departemen Pendidikan Nasional Indonesia yang telah membiayai penelitian ini melalui HIBAH TIM III kontrak No. 032/HTTP-III/URGE/1997, 17 Maret 1997, Addendum I No. 032/ADD.1/HTTP-III/URGE/1997, 17 April 1997.

Pustaka

1. Prayoga, S., "Kaji Eksperimental Sinyal Getaran Arus Listrik dan Mekanik pada Motor Listrik Induksi", Tugas Sarjana, Jurusan Teknik Mesin, ITB 1996.
2. Tavner, P. J. dan Penman, J., "Condition Monitoring of Electrical Machines", Research Studies Press Ltd. & John Wiley & Sons Inc., Great Britain, 1987.
3. Cameron, J.R., Thomson, W.T., dan Dow, A.B., "Vibration and Current monitoring for Detecting Airgap Eccentricity in Large Induction Motors", IEE Proceedings, Vol. 133, Pt. B, No. 3, May 1986, hal. 155 - 163.
4. Toliyat, H. A., dan Arefeen, M. S., dan Parlos, A. G., "A Method for Dynamic Simulation of Air - Gap Eccentricity in Induction Machines", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, no. 4, July/August 1996, hal. 910 - 918.
5. Verma, S.P., dan Natarajan, R., "Effects of Eccentricity in Induction Motors", Proceedings of International Conference on Electrical Machines, 3, Budapest, Hungary, Sept. 1982, hal. 930-933.
6. Nandi, S., dan Toliyat, H. A., "Detection of Rotor Slot and Other Eccentricity Related Harmonics in a Three Phase Induction Motor with Different Rotor", International Conf. on Power Electronics Drives and Energy System for Industrial Growth, Vol. I, Perth, December 1998, hal. 135 - 140.
7. Nandi, S., Bharadwaj, R., Toliyat, H. A., dan Parlos, A.G., "Performance Analysis of a Three Phase

- Induction Motor under Mixed Eccentricity Condition* ", International Conf. on Power Electronics Drives and Energy System for Industrial Growth, Vol. I, Perth, December 1998, hal. 123 – 128.
8. Dorrel, D.G., dan Thomson, W.T. , " *Analysis of Airgap Flux, Current, and Vibration Signals as a Function of the Combination of Static and Dynamic Airgap Eccentricity in 3-Phase Induction Motors* ", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 33, no. 1, January/February 1997, hal. 24 – 34.
 9. Rajagopal, K.R., Singh, B. dan Singh, B.P. , " *Effects of Non- Uniform Airgap and Hysteresis on Performance of Hybrid Stepper Motor* ", International Conf. on Power Electronics Drives and Energy System for Industrial Growth, Vol. I, Perth, December 1998, hal. 270 – 275.
 10. Verma, S. P., dan Balan, A. , " *Determination of Radial-Forces in Relation to Noise and Vibration Problems of Squirrel-Cage Induction Motors*", IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 9, No. 2, June 1994, hal.404 – 412.
 11. Smith, A.C., dan Dorrell, D.G. , " *Calculation and Measurement of Unbalanced Magnetic Pull in Cage Induction Motors with Eccentric Rotors. Part 1 : Analytical model* ", IEE Proceedings, Electr. Power Application, vol. 143, No. 3, May 1996, hal. 193 – 201.
 12. Smith, A.C., dan Dorrell, D.G. , " *Calculation and Measurement of Unbalanced Magnetic Pull in Cage Induction Motors with Eccentric Rotors. Part 2 : Experimental investigation* ", IEE Proceedings, Electr. Power Application, vol. 143, No. 3, May 1996, hal. 202 – 210.
 13. Bradford, M. , " *Unbalanced Magnetic Pull in a 6 – Pole Induction Motor*", IEE Proceedings, vol. 115, no. 11, November 1968, hal. 1619 – 1627.
 14. Dorrell, D. G. dan Smith, A. C. , " *Calculation of U. M. P. in Induction Motors with Series or Parallel Winding Connections* ", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 9, no. 2, June 1994, hal. 304 – 310.
 15. Ahmarudin M., " *Kaji Teoritik dan Eksperimental Sinyal Arus Stator dan Getaran Badan Motor pada Motor Induksi Akibat Eksentrisitas*", Thesis Magister, Jurusan Teknik Mesin ITB, 2000.