

ANALISA PENURUNAN EFISIENSI MOTOR INDUKSI AKIBAT CACAT PADA CAGE BALL BANTALAN

*Fajar Septianto¹ Achmad Widodo² dan Nazaruddin Sinaga²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. (024) 7460053, 7460055 Fax. (024) 7460055

*E-mail: fajarseptianto2@gmail.com

Abstrak

Motor induksi merupakan perangkat mesin listrik yang menggunakan prinsip elektromagnetis yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik, kemudian energi mekanik tersebut selanjutnya dimanfaatkan sebagai tenaga penggerak pada berbagai mesin, misalnya untuk menggerakkan roda *impeller pada pompa*, kompresor, *crane*, generator dan lainnya. Motor induksi 3 fasa banyak digunakan dalam berbagai aplikasi, mulai dari aplikasi rumah tangga sampai aplikasi industri besar. Motor induksi merupakan salah satu peralatan penting dalam suatu proses produksi pada industri, karena jika motor induksi mengalami penurunan performansi maka suatu proses produksi atau proses kerja industri akan terganggu. Oleh karena itu penting untuk terus memantau performa dari motor tersebut, diantaranya adalah pemantauan adanya kerusakan pada motor dan efisiensi pada motor. Salah satu kerusakan yang biasanya terjadi pada motor induksi adalah kerusakan mekanis yang disebabkan karena adanya *overload* atau perubahan beban yang mendadak yang berakibat rusaknya bantalan, dan salah satu kerusakan pada bantalan adalah adanya kecacatan atau kerusakan pada *cage ball*. Tujuan dari penelitian ini adalah memantau dan menganalisa penurunan efisiensi motor induksi akibat kecacatan pada *cageball* bantalan tanpa mempengaruhi proses motor induksi yang sedang berjalan. Metode penelitian yang dilakukan adalah kajian pustaka dari berbagai literatur yang disesuaikan dengan perkembangan teknologi dan berdasarkan standar nasional maupun internasional. Penelitian ini menghasilkan penurunan efisiensi motor induksi pada ketiga *bearing* yaitu *bearing normal non thermal*, *normal thermal*, dan dengan kecacatan *cageball* mengalami penurunan sekitar 2-3% yang bisa dilihat pada grafik perbandingan rata-rata efisiensi dengan rata-rata *overall RMS*.

Kata Kunci : Penurunan efisiensi; motor induksi; *cage ball*; *bearing*; analisa efisiensi

Abstract

Induction motors are electric machine devices that use electromagnetic principles that converts electrical energy into mechanical energy, and mechanical energy is then used as a driving force on different machines, for example, to drive the impeller wheel on pumps, compressors, cranes, generators and others. 3-phase induction motors are widely used in various applications, ranging from household applications to large industrial applications. Induction motors are one of the important equipment in a production process in the industry, because if the induction motor has decreased the performance of a production process or industrial work process will be disrupted. It is therefore important to continue to monitor the performance of the motor, which are monitoring the damage to the motor and the efficiency of the motor. One of damage that usually occurs in the induction motor is mechanical damage due to an overload or sudden load changes which result in damage to bearings, and one of damage to the bearings is the presence of defects or damage to the ball cage. The aim of this study is to monitor and analyze the induction motor efficiency decrease due to defects in the bearings cageball without affecting the induction motor is running. The research method was a literature review of the literature that adapted to technological developments and based on national and international standards. This research resulted in decrease in the efficiency of the induction motor on the third bearing is normal bearing non-thermal, thermal normal, and with disability cageball decreased about 2-3% which can be seen on the graph comparison of the average efficiency with an average overall RMS.

Keywords: *Decreased efficiency; induction motor; cage ball; bearing; efficiency analysis.*

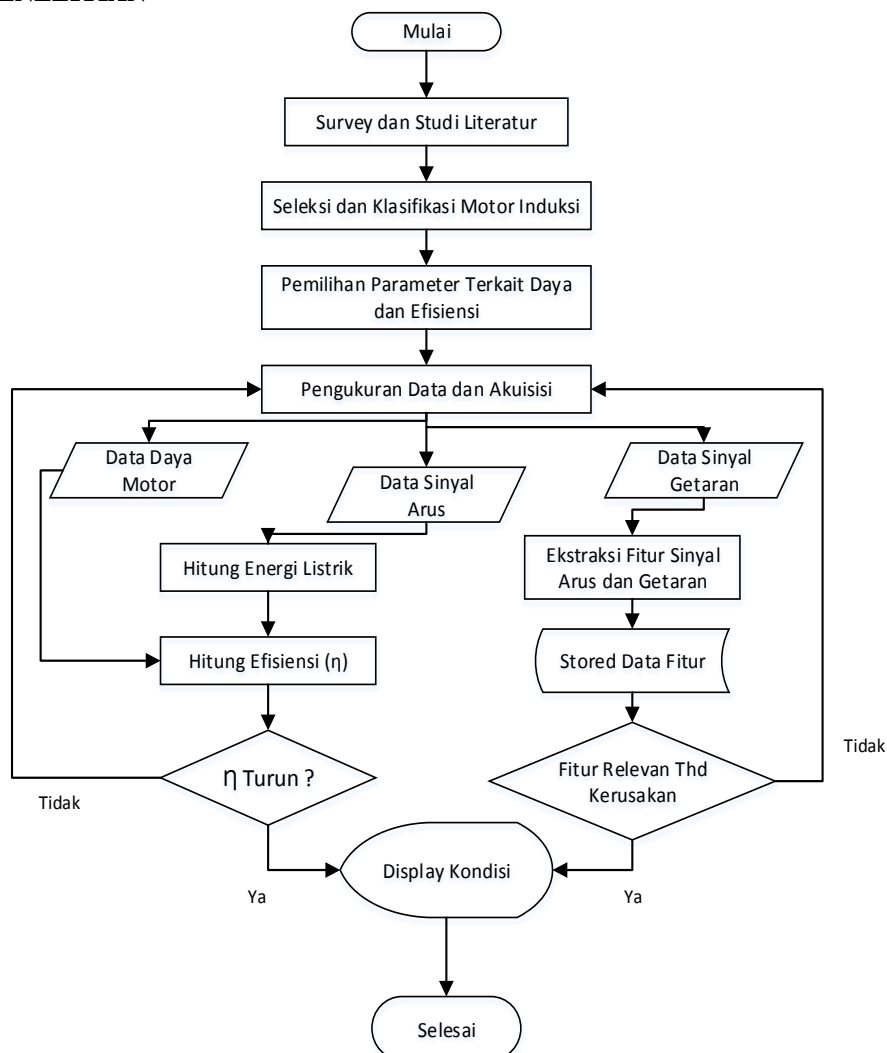
1 PENDAHULUAN

Motor induksi merupakan salah satu motor arus bolak balik. Arus yang timbul dalam motor ini bukan berasal langsung dari arus sumber, tetapi akibat dari adanya perbedaan antara putaran rotor dengan medan putar yang dihasilkan oleh arus rotor. Dengan sebab inilah, motor tersebut disebut sebagai motor induksi. Motor induksi merupakan perangkat mesin listrik yang menggunakan prinsip elektromagnetis yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik, kemudian energi mekanik tersebut selanjutnya dimanfaatkan sebagai tenaga penggerak pada berbagai mesin, misalnya untuk menggerakkan roda impeller pada pompa, kompresor, crane, generator dan lainnya.

Motor induksi 3 fasa banyak digunakan dalam berbagai aplikasi, mulai dari aplikasi rumah tangga sampai aplikasi industri besar. Hal ini dikarenakan motor induksi memiliki beberapa kelebihan, diantaranya adalah mempunyai konstruksi yang sederhana, harganya relatif lebih murah jika dibandingkan dengan jenis motor yang lainnya, menghasilkan putaran yang konstan, perawatan yang mudah. Walaupun demikian motor induksi merupakan salah satu peralatan penting dalam suatu proses produksi pada industri, karena jika motor induksi mengalami penurunan performansi maka suatu proses produksi atau proses kerja industri akan terganggu.

Oleh karena itu penting untuk terus memantau performa dari motor tersebut, diantaranya adalah pemantauan adanya kerusakan pada motor dan efisiensi pada motor. Salah satu kerusakan yang biasanya terjadi pada motor induksi adalah kerusakan mekanis yang disebabkan karena adanya overload atau perubahan beban yang mendadak yang berakibat rusaknya bantalan, dan salah satu kerusakan pada bantalan adalah adanya kecacatan atau kerusakan pada cageball. Kerusakan ini merupakan salah satu faktor adanya perubahan pada efisiensi motor insuksi, sehingga motor induksi tidak bekerja dengan ideal. Mesin dikatakan ideal pada prinsipnya apabila seluruh energi yang dihasilkan dapat diubah menjadi kerja. walaupun demikian tidak ada yang ideal dari hasil rancangan manusia karena sebagian energi akan terbuang menjadi energi yang lain. Tujuan dari penelitian ini adalah membuat analisa penurunan daya dan efisiensi motor induksi terhadap kecacatan *cageball* pada bantalan, menentukan kurva performa dari motor yaitu, daya, torsi, kecepatan dan efisiensi, dan membuat diagnose kerusakan motor induksi berdasarkan sinyal karakteristik penurunan efisiensi.

2 METODE PENELITIAN



Gambar 1. Diagram alir penelitian.

Penjelasan :

- Survey dan studi literatur dilakukan untuk memperoleh informasi mengenai penelitian-penelitian yang sudah pernah dilakukan guna menajamkan kontribusi dan pembaruanyang akan dicapai.
- Perlu dilakukan pemilihan dan klasifikasi obyek studi yaitu motor induksi berdasarkan kapasitas daya, pabrikan (maker) dalam atau luar negeri.
- Pemilihan parameter-parameter yang terkait dengan kapasitas daya dan efisiensi.Selanjutnya menetapkan parameter-parameter yang dominan pengaruhnya terhadapkapasitas daya dan efisiensi.
- Pengukuran dan data akuisisi dilakukan di laboratorium, yaitu pengukuran daya, pengukuran sinyal arus dan pengukuran sinyal getaran. Pengukuran daya bisa dilakukan dengan dinamometer arus Eddy, prony brake atau jenis lainnya. Pengukuran sinyal arus dilakukan dengan sensor arus (current probe), Sedangkan sensor akselerometer akan digunakan untuk mengukur sinyal getaran.
- Pengukuran arus dilakukan untuk menghitung energi yang dipakai motor listrik, sedangkan daya bisa dihitung dengan mengukur torsi melalui dinamometer. Data sinyal getaran bisa dipakai untuk verifikasi terjadinya kerusakan pada motor induksi dengan cara menganalisa sinyal domain frekuensi.
- Pencarian hubungan antara kapasitas daya dan efisiensi terhadap umur pemakaian dapat dilakukan dengan menguji motor induksi dalam waktu yang lama (endurance test), dimana secara simultan dilakukan pengukuran daya dan efisiensi motor untuk berbagai umur/lama operasi.
- Penurunan daya dan efisiensi dapat dijadikan sebagai ‘alarm’ saat awal mula terjadinya kerusakan pada motor induksi. Hal ini bisa diverifikasi dengan kondisi fitur yangdiekstrak dari sinyal arus ataupun sinyal getaran.
- Konfirmasi kondisi motor induksi (kerusakan) dengan memakai parameter penurunan daya atau efisiensi dan fitur sinyal arus dan getaran.

2.1 Bahan dan Alat

Bahan pada penelitian ini adalah 6 buah *bearing* SKF 6308, sedangkan alat pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

Tabel 1. Alat Penelitian

No	Nama	Jumlah	Spesifikasi
1	Motor Induksi	1 Buah	KSB Etaline-GN/50-160/752 G7
2	Powermeter	1 Unit	Schneider Powermeter
3	Dynometer	1 Unit	Trial
4	Voltage Regulator	1 Buah	Custom
5	Sensor Termokopel	1 Buah	Land and Sea
6	Kamera	1 Unit	Sony Xperia
7	Timbangan Digital	1 Unit	20-50 kg max
8	SpectraPad	1 Set	VibraQuest
9	Accelerometer	3 Buah	VibraQuest
10	Tachometer	1 Buah	Custom

2.2 Persiapan Bantalan

Penuaan bearing menggunakan panas yang telah direkomendasikan oleh IEEE (IEEE std 117: IEEE Standard Test Procedure for Evaluation of Systems of Insulating Materials for Random-Wound AC Electric Machinery Degradation and Testing Plan):

- Panaskan bearing menggunakan oven pada suhu 140°C untuk 72 jam.



Gambar 2. Proses pemanasan bantalan

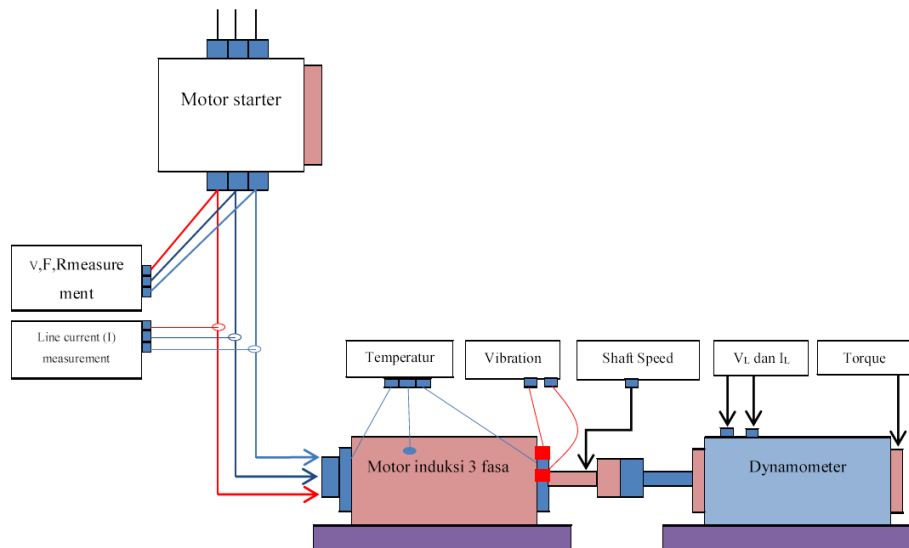
- Setelah 72 jam keluarkan bearing dari oven dan biarkan terkena udara selama 6 jam.
- Setelah 6 jam masukkan bearing ke dalam air selama 15 menit



Gambar 3. Proses pencelupan bantalan kedalam air

- Segera masukkan kembali bearing ke dalam oven dan kembali dipanaskan selama 72 jam.
- Setelah itu dikeluarkan dan dibiarkan selama 18 jam sebelum pengujian dengan bearing dimulai.

2.3 Rancangan proses penelitian



Gambar 4. Set up peralatan pengujian

2.4 Proses Pengambilan Data

Setelah Rig disiapkan, langkah selanjutnya adalah pengambilan data, pengujian yang pertama menggunakan bantalan normal, pengujian kedua menggunakan bantalan normal dengan perlakuan thermal aging, pengujian ketiga menggunakan bantalan dengan kecacatan padacage ball dengan perlakuan thermal aging. ketiga tahap percobaan tersebut adalah sama, yaitu:

- Merangkai alat dengan mengkopel motor dengan dynamometer.
- Memasang sensor-sensor yang dibutuhkan, akselerometer, tachometer, termokopel dan powermeter.
- Menyalakan sensor-sensor pada rangkaian rig tes.
- Menyalakan motor.
- Tunggu hingga motor berputar dalam keadaan steady.
- Amati PLV(powermeter) dan mencatat hasil I dan V 3 fasa yang terbaca pada powermeter untuk nanti mencari nilai Pin.
- Kemudian mengamati pembebanan yang terjadi pada dynamometer untuk mendapatkan gaya yang dipakai untuk menghitung nilai Pout.
- Amati suhu stator dan suhu dynamometer.
- Amati rpm motor listrik.
- Rekam data sinyal getaran.

- Hitung Daya, Torsi, dan Efisiensi motor.

2.5 Proses Perhitungan

2.5.1 Efisiensi dan Torsi Motor

Torsi

Torsi adalah gaya yang dibutuhkan untuk memutar lengan (*shaft*) dengan panjang tertentu sesuai dengan axis dari putaran tersebut, rumus dari torsi itu sendiri adalah:

$$T = Fr \quad (1)$$

dimana F adalah gaya dalam newton (N) yang terapkan pada *shaft* dan r adalah panjang lengan dari gaya. [1-4]

Efisiensi Motor

Efisiensi sebuah mesin adalah suatu ukuran seberapa baik mesin dapat mengubah energi masukan listrik ke energi keluaran mekanik. Efisiensi berhubungan langsung dengan rugi-rugi motor induksi terlepas dari desain mesin itu sendiri.

$$\eta = \frac{P_{mech}}{P_{elec}} = \frac{P_{mech}}{P_{mech} + \sum \text{losses}} \quad (2)$$

maka penghitungan efisiensi sangat mudah dilakukan yaitu hanya dengan menghitung hasil pengukuran *output power* dibagi dengan *input power*. Karena kita membagi hasil pengukuran yang besarnya hampir sama, kesalahan kecil dalam pengukuran dapat menyebabkan kesalahan besar pada hasil akhir efisiensi [2].

2.5.2 Monitoring Getaran

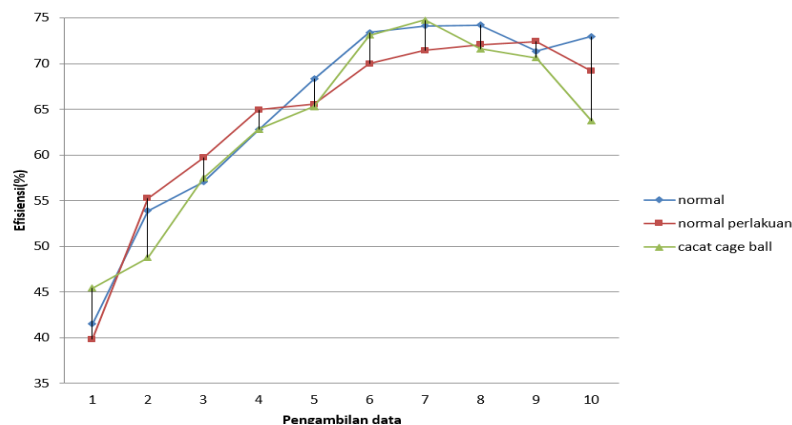
Tabel 2. Frekuensi mekanik kerusakan bearing

Kerusakan rumah <i>bearing</i> (FTF)	$= \frac{1}{2} fr \left(1 + \frac{d}{D \cdot \cos \alpha} \right)$
Kerusakan lintasan luar (BPFO)	$= \frac{N}{2} fr \left(1 - \frac{d}{D \cdot \cos \alpha} \right)$
Kerusakan lintasan dalam (BPFI)	$= \frac{N}{2} fr \left(1 + \frac{d}{D \cdot \cos \alpha} \right)$
Kerusakan bola <i>bearing</i> (BSF)	$= \frac{D}{2d} fr \left(1 - \frac{d^2 \cos^2 \theta}{D^2} \right)$

3. Hasil dan Pembahasan

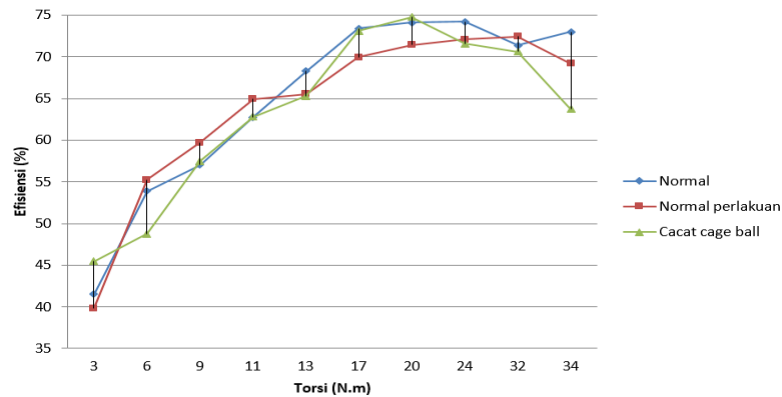
3.1 Efisiensi, Torsi dan Kecepatan Motor

Grafik dibawah ini merupakan grafik yang didapatkan dari data penelitian dan perhitungan dengan menggunakan rumus yang sudah diberikan diatas sebelumnya



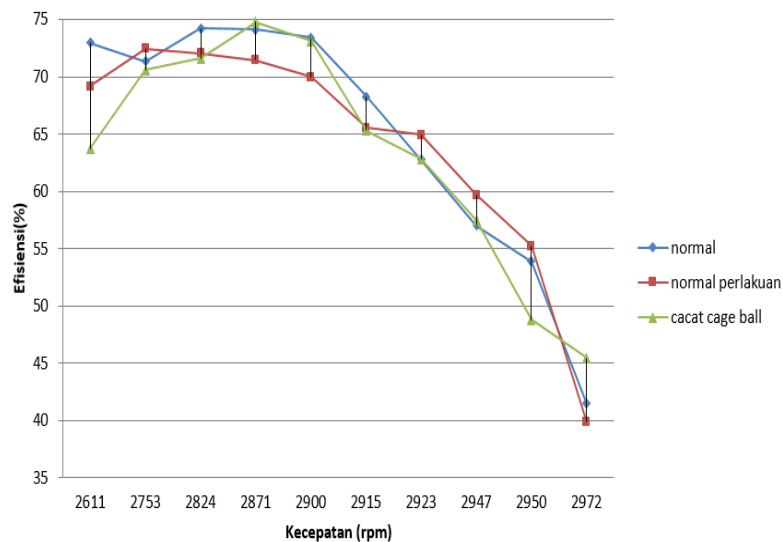
Gambar 5. Grafik perbandingan efisiensi seluruh bantalan

Nilai efisiensi dari ketiga bearing tersebut diperlihatkan bahwa bearing dengan cacat pada *cage ball* rata-rata memiliki efisiensi yang lebih rendah dibandingkan dengan *bearing* normal dan *bearing* normal yang diberi perlakuan *thermal aging*. walaupun pada beberapa titik pengambilan sampel, pengujian *bearing* dengan cacat pada *cage ball* memiliki nilai yang lebih tinggi dari *bearing* normal dengan perlakuan *thermal aging* yang. Hal ini dapat disebabkan karena pengaruh cacat pada *bearing* yang mengakibatkan putaran rotor pada motor induksi menjadi terganggu.



Gambar 6. Grafik perbandingan torsi dengan efisiensi seluruh bantalan

Terlihat *bearing* dengan cacat pada *cage ball* memiliki nilai rata-rata efisiensi yang lebih rendah dibandingkan kedua *bearing* lainnya. Hal ini sesuai dengan prediksi sebelum dilakukan pengujian bahwa *bearing* dengan kecacatan akan bekerja tidak optimal dan akan mengganggu torsi dan efisiensi pada motor induksi yaitu mempengaruhi pembebanan dari rotor pada motor induksi, sehingga bila beban pada rotor terganggu sehingga mempengaruhi nilai dari torsi motor induksi tersebut. Terbukti dari grafik dan hasil pengujian dengan sampel 10 kali pengambilan data dengan lama pengambilan data adalah 10 menit. Walaupun pada beberapa titik penurunan efisiensi dan torsi tidak terlalu signifikan tapi kita dapat mengambil kesimpulan bahwa nilai torsi dan efisiensi *bearing* dengan cacat pada *cage ball* mengalami penurunan setelah kita melihat grafik pada Gambar 6.



Gambar 7. Grafik perbandingan efisiensi dengan rpm pada seluruh bantalan

Terlihat bahwa ketiga *bearing* memiliki penurunan efisiensi yang hampir seragam. Walaupun penurunan yang terjadi pada *bearing* dengan kecacatan *cage ball* tidak signifikan, mungkin ini karena kecacatan *cageball* pada bearing tidak terlalu besar. Ada titik dimana *bearing* dengan kecacatan pada *cage ball* memiliki efisiensi yg lebih rendah dari 2 *bearing* lainnya, yaitu pada rpm 2611, 2753, dan yang terendah dari dua *bearing* lainnya yaitu rpm 2950. Tetapi bisa dilihat efisiensi *bearing* dengan kecacatan *cageball* selalu dibawah efisiensi yang dimiliki *bearing* normal non perlakuan. Hal ini dapat terjadi karena kecacatan pada *cage ball* mempengaruhi kerja rotor motor induksi dan hasil ini

menunjukkan bahwa prediksi bahwa *bearing* dengan cacat akan memiliki penurunan pada nilai efisiensi dan putaran rotor.

3.2 Sinyal Getaran

Sinyal Getaran dapat dihitung dengan menggunakan rumus frekuensi mekanik kerusakan *bearing* yang sudah diberikan diatas sebelumnya. Setelah diketahui besarnya harga dari semua komponen dari rumus tersebut yaitu: $N = 8$, $d = 23\text{mm}$, $D = 77.7\text{ mm}$, $\text{cosa} = 1$ maka untuk mencari fr pada rpm 2950. Satuan rpm diubah terlebih dahulu dalam bentuk Hz dengan rumus:

$$fr = \frac{2950}{60} = 49,17\text{ Hz}$$

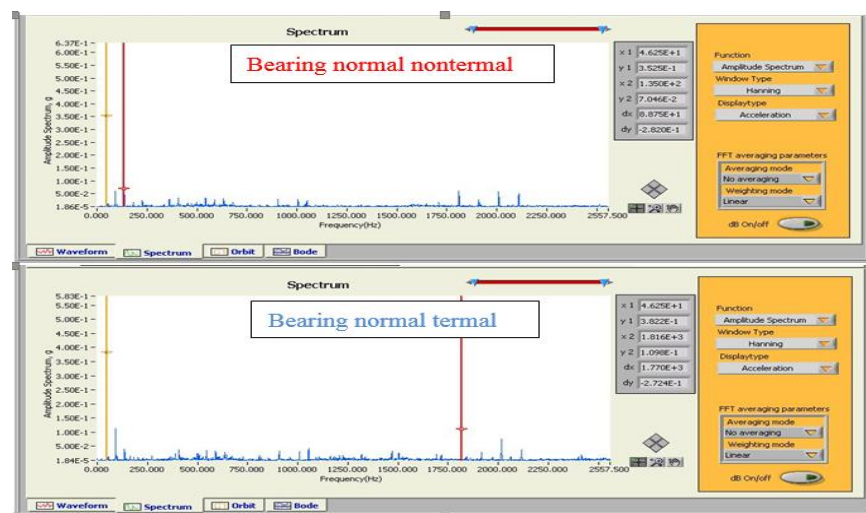
$$BPFO = 139.64\text{ Hz}$$

$$BPFI = 253,71\text{ Hz}$$

$$BSF = 75.17\text{ Hz}$$

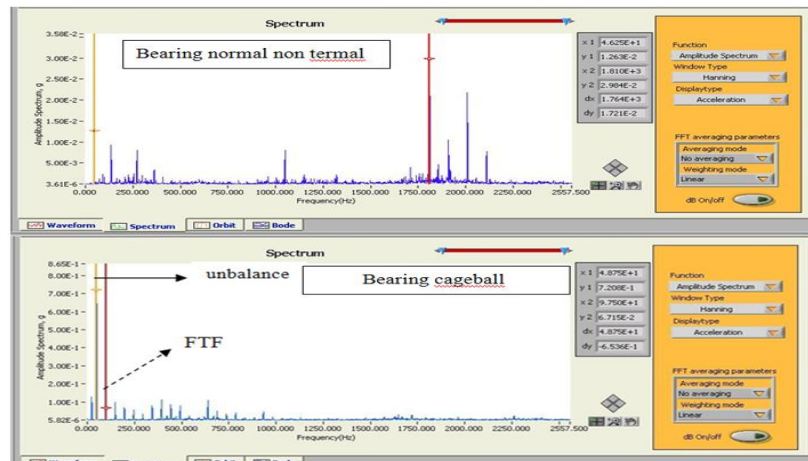
$$FTF = 31.7$$

Gambar dibawah adalah Gambar perbandingan grafik FFT padabantalan normal dengan bantalan normal termal. Grafik ini diambil dengan sensor *accelerometer* pada chanel axial. Bisa terlihat pada Gambar diatas, grafik FFT pada kedua bantalan tidak terlalu berbeda, keduanya sama-sama mengalami adanya unbalance yang terjadi ketika motor induksi berputar. Kemudian kedua bantalan juga tidak menunjukkan adanya ciri atau karakteristik kecacatan yang lainnya.

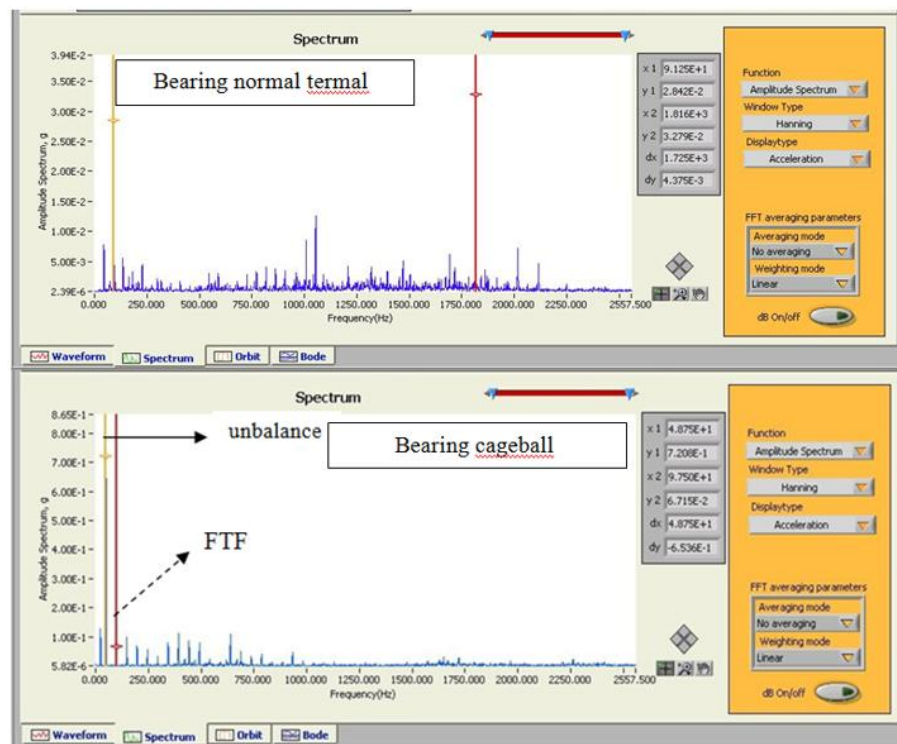


Gambar 8. Perbandingan FFT *bearing* normal dengan normal termal pada chanel vertikal

Gambar diatas adalah Gambar perbandingan grafik FFT padabantalan normal dengan bantalan normal termal. Grafik ini diambil dengan sensor *accelerometer* pada chanel axial. Bisa terlihat pada Gambar diatas, grafik FFT pada kedua bantalan tidak terlalu berbeda, keduanya sama-sama mengalami adanya unbalance yang terjadi ketika motor induksi berputar. Kemudian kedua bantalan juga tidak menunjukkan adanya ciri atau karakteristik kecacatan yang lainnya.



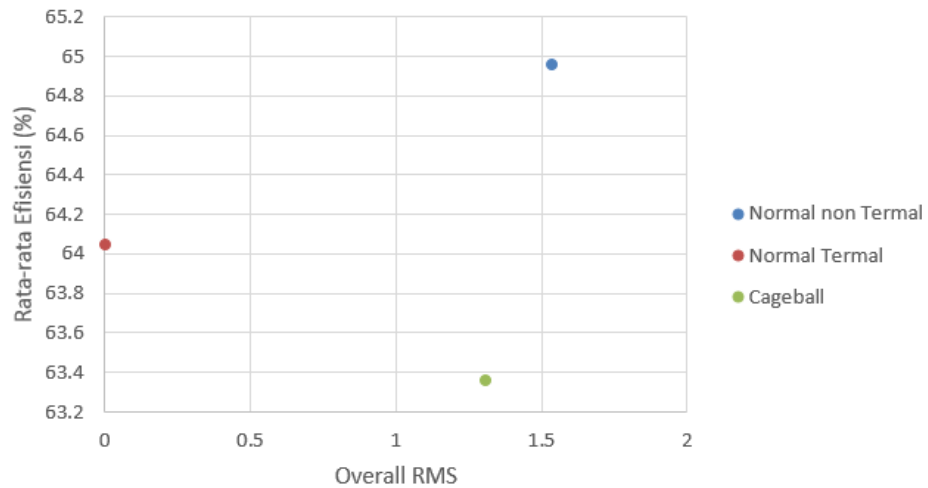
Gambar 9. Perbandingan FFT pada *bearing* normal non termal dengan *bearing cageball* pada chanel vertikal
 Gambar diatas merupakan perbandingan diagram FFT pada *bearing* normal non termal dengan *bearing* yang diberi kecacatan pada bagian *cageball* yang diambil oleh sensor *accelerometer* pada chanel vertikal. Terlihat pada Gambar diatas, pada kedua *bearing* mempunyai unbalance yang relatif sama yaitu pada *bearing* normal non termal terletak pada frekuensi 46.25 Hz dan untuk *bearing cageball* terletak pada frekuensi 48.75, tetapi unbalance yang terjadi pada *bearing cageball* mempunyai amplitudo yang lebih tinggi pada 0.25g. Kemudian pada *bearing* normal nontermal tidak mempunyai ciri kerusakan FTF seperti pada *bearnng* yang diberi kecacatan *cageball* yang muncul pada amplitudo 0.06g pada frekuensi berkisar 97.5 Hz yang merupakan 3x harmonic dari FTF.



Gambar 10. Perbandingan FFT pada *bearing* normal termal dengan *bearing cageball* pada chanel vertikal

Selanjutnya pada perbanding diagram fft diatas yang diambil pada channel vertikal *accelerometer* terlihat puncak tertinggi FTF pada *bearing cageball* terlihat pada frekuensi berkisar 97.5 Hz pada amplitudo 0.06g yang merupakan 3x harmonic,. Sedangkan pada *bearing* normal termal tidak mempunyai ciri kerusakan FTF.

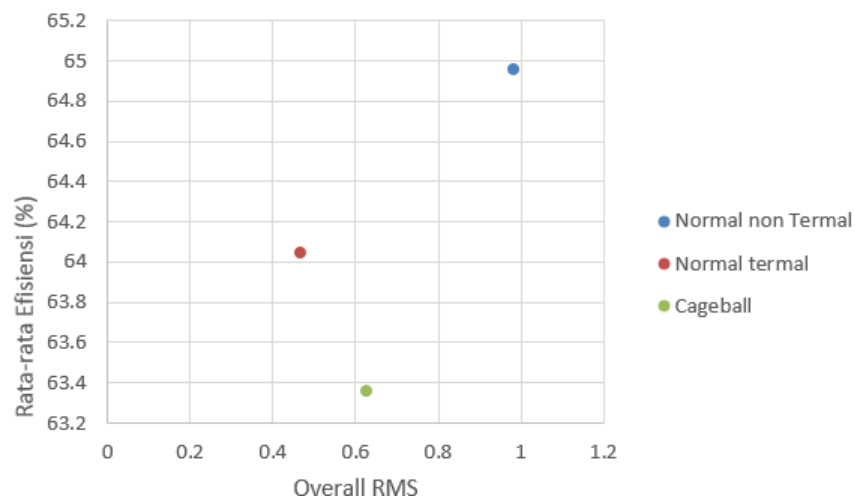
3.3 Grafik Perbandingan Efisiensi dan Amplitudo



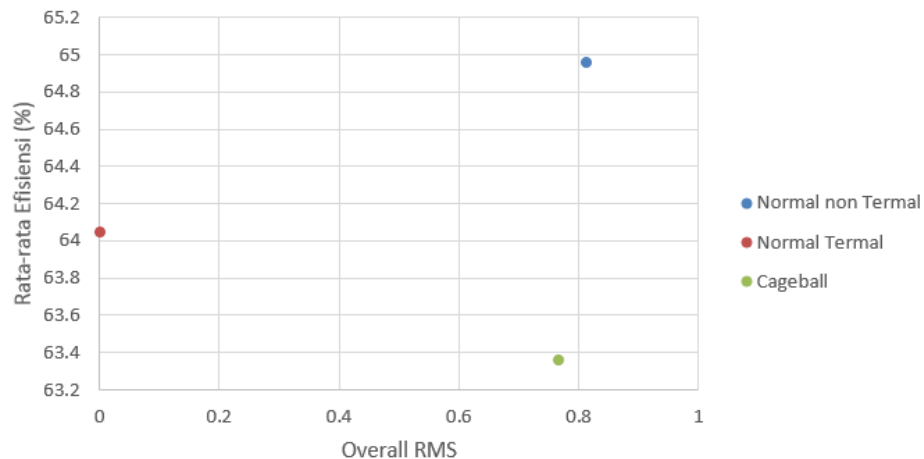
Gambar 11. Grafik perbandingan efisiensi dan *overall RMS* sumbu vertikal

Pada Gambar 11 diatas memperlihatkan perbandingan rata-rata efisiensi dengan *overall RMS* pada sumbu vertikal. Grafik ini menunjukkan hubungan antara efisiensi dengan nilai *overall RMS* pada ketiga *bearing* yang dimana juga menunjukkan adanya penurunan efisiensi yang terjadi pada ketiga *bearing*. Dapat terlihat titik biru menunjukkan *bearing* normal non *thermal* dengan nilai rata-rata efisiensi kurang lebih 64.9 % dengan besar nilai amplitude kurang lebih 1.5g, sedangkan titik merah menunjukkan *bearing* normal dengan perlakuan *thermal aging* yang memiliki rata-rata efisiensi lebih rendah daripada *bearing* normal yaitu sekitar 64.1 % dengan besar amplitude 0.0046g. Lalu titik dengan warna hijau menunjukkan *bearing* dengan kecacatan *cageball*, *bearing* ini mempunyai nilai rata-rata efisiensi paling rendah dari pada kedua *bearing* lainnya yaitu 63.3 % dengan nilai amplitudo 1.311g. Untuk nilai amplitude, *bearing* normal *termal* memiliki nilai yang palng terkecil dari pada *bearing* lainnya.

Pada Gambar 12 dibawah memperlihatkan perbandingan rata-rata efisiensi dengan *overall RMS* pada sumbu Horizontal. Grafik ini menunjukkan hubungan antara efisiensi dengan nilai *overall RMS* pada ketiga *bearing* yang dimana juga menunjukkan adanya penurunan efisiensi yang terjadi pada ketiga *bearing*. Dapat terlihat titik biru menunjukkan *bearing* normal non *thermal* dengan nilai rata-rata efisiensi kurang lebih 64.9 % dengan besar nilai amplitude kurang lebih 1.5g, sedangkan titik merah menunjukkan *bearing* normal dengan perlakuan *thermal aging* yang memiliki rata-rata efisiensi lebih rendah daripada *bearing* normal yaitu sekitar 64.1 % dengan besar amplitude 0.002g. Lalu titik dengan warna hijau menunjukkan *bearing* dengan kecacatan *cageball*, *bearing* ini mempunyai nilai rata-rata efisiensi paling rendah dari pada kedua *bearing* lainnya yaitu 63.3 % dengan nilai amplitudo 0.626g. Untuk nilai amplitude, *bearing* normal *termal* memiliki nilai yang palng terkecil dari pada *bearing* lainnya.



Gambar 12. Grafik perbandingan efisiensi dan *overall RMS* sumbu horizontal



Gambar 13. Grafik perbandingan efisiensi dan *overall RMS* sumbu axial

Pada Gambar 13 diatas memperlihatkan perbandingan rata-rata efisiensi dengan *overall RMS* pada sumbu axial. Grafik ini menunjukkan hubungan antara efisiensi dengan nilai *overall RMS* pada ketiga *bearing* yang dimana juga menunjukkan adanya penurunan efisiensi yang terjadi pada ketiga *bearing*. Dapat terlihat titik biru menunjukkan *bearing* normal non *thermal* dengan nilai rata-rata efisiensi kurang lebih 64.9 % dengan besar nilai amplitudo kurang lebih 0.814g, sedangkan titik merah menunjukkan *bearing* normal dengan perlakuan *thermal aging* yang memiliki rata-rata efisiensi lebih rendah daripada *bearing* normal yaitu sekitar 64.1 % dengan besar amplitudo 0.002g. Lalu titik dengan warna hijau menunjukkan *bearing* dengan kecacatan *cageball*, *bearing* ini mempunyai nilai rata-rata efisiensi paling rendah dari pada kedua *bearing* lainnya yaitu 63.3 % dengan nilai amplitudo 0.76g. Untuk nilai amplitudo, *bearing* normal *termal* memiliki nilai yang paling terkecil dari pada *bearing* lainnya.

4. KESIMPULAN

Dari penelitian yang sudah dilakukan dapat diambil kesimpulan bahwa, Penurunan efisiensi motor induksi pada ketiga *bearing* yaitu *bearing* normal non *thermal*, normal *thermal*, dan dengan kecacatan *cageball* mengalami penurunan sekitar 2-3% yang bisa dilihat pada grafik perbandingan rata-rata efisiensi dengan rata-rata *overall RMS* di Gambar 11, 12, dan 13, dimana *bearing* dengan kecacatan pada *cageball* memiliki efisiensi lebih kecil dibandingkan pada kedua *bearing* lainnya yaitu *bearing* normal non *thermal* dan *bearing* normal *thermal*. Perbandingan nilai efisiensi dari ketiga *bearing* yaitu, *bearing* normal non *thermal*, *bearing* normal *thermal*, dan *bearing* *cageball* sesuai dengan grafik yang telah disajikan menghasilkan penurunan efisiensi yang tidak terlalu besar, dimana *bearing* dengan kecacatan *cageball* memiliki efisiensi terkecil. Perbandingan ketiga *bearing* efisiensi, daya, torsi dan kecepatan putar (rpm) tidak terlalu jauh berbeda satu dengan yang lain. Pada bantalan di channel vertikal, bantalan *cageball* memiliki karakteristik FTF pada frekuensi 97,5 Hz dengan amplitudo 0.06 g yang merupakan 3x harmonic, sedangkan pada bantalan normal non *termal* terdapat puncak tertinggi pada frekuensi 46.25 Hz dengan amplitudo 0.35g yang menandakan adanya unbalance. Pada bantalan normal *termal*, puncak tertinggi terletak pada frekuensi 46 Hz dengan amplitudo 0.38g. Pada bantalan di channel horizontal, bantalan *cageball* memiliki adanya karakteristik 13x harmonic FTF pada frekuensi 393 Hz dengan amplitudo 0.1g. Pada bantalan normal non *termal* memiliki puncak amplitudo tertinggi sebesar 0.1g pada frekuensi 1050 yang mendekati 5x harmonic BPFI. Pada bantalan normal non *termal* memiliki puncak tertinggi pada frekuensi 1050 Hz dengan amplitudo 0.1g yang mendekati 5x harmonic BPFI. Pada bantalan di channel axial, bantalan *cageball* memiliki ciri FTF yang muncul pada 8x harmonic pada frekuensi 245 Hz dengan amplitudo 0.094g, Sedangkan untuk bantalan normal non *termal* dan normal *termal* tidak terlalu berbeda.

5 REFERENSI

- [1] N. A. O. Demerdash, "Design and Analysis of Electric Motors in Adjustable Speed Drives," Marquette University, Milwaukee, WI, EECE 185 Class Notes 2005.
- [2] FACT SHEET, "Determining electric motor load and efficiency", a program of the U.S Department of Energy.
- [3] R.R. Schoen, T.G. Habetler, F. Kamran, R.G. Bartheld, "Motor bearing damage detection using stator current monitoring", *IEEE Trans. Industry Applications*, 31(6), pp. 1274-1279, 1995.

- [4] P. L. Cochran, *Polyphase Induction Motors: Analysis, Design, and Applications*. New York: Marcel Dekker, 1989.