

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

DETEKSI KERUSAKAN BEARING DAN ECCENTRICITY PADA MOTOR INDUKSI TIGA FASA DENGAN CURRENT SIGNATURE ANALYSIS. Abstrak oleh I Gusti Putu Yudiastawan – Magister Fisika Kekhususan Instrumentasi Fmipa Universitas Indonesia Depok 2009.

Motor induksi telah mendominasi bidang konversi energy elektromekanik dengan penggunaan sekitar 80% dari berbagai jenis motor listrik yang digunakan. Salah satu metode yang digunakan untuk menganalisa kerusakan pada motor adalah current signature analysis. Sinyal arus motor dideteksi dengan current transducer, dilewatkan pada signal conditioning kemudian akuisisi data dan dianalisa oleh komputer dengan Fast Fourier Transform (FFT). Hasil analisis ini (signature) memperlihatkan kondisi dari motor, apakah normal atau terjadi kerusakan.

Keywords: motor induksi, current transducer, signal conditioning, akuisisi data, signal analysis.

ANALISA PENURUNAN EFISIENSI MOTOR INDUKSI AKIBAT CACAT +PADA CAGE BALL BANTALAN. Abstrak oleh Fajar Septianto – Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro Semarang 2015.

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 dengan rata-rata *overall RMS*.

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

2.2. Landasan Teori

2.2.1 Motor Induksi Tiga Fasa

Motor listrik berfungsi untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik yang berupa tenaga putar. Motor listrik terdiri dari dua bagian yang sangat penting yaitu stator atau bagian yang diam dan rotor atau bagian berputar. Pada motor AC, kumparan rotor tidak menerima energi listrik secara langsung, dari motor induksi sangat mempengaruhi efisiensinya. Kecepatan motor induksi akan menurun seiring dengan bertambahnya beban, tidak seperti motor DC atau motor shunt. Kopel awal mutunya rendah dibandingkan dengan motor DC shunt, tetapi secara induksi seperti yang terjadi pada energi kumparan transformator. Oleh karena itu motor AC dikenal dengan motor

induksi. Dilihat dari kesederhanaannya, konstruksinya yang kuat dan kokoh serta mempunyai karakteristik kerja yang baik, motor induksi tiga fasa yang cocok dan paling banyak digunakan dalam bidang industri. Penggunaan motor induksi yang banyak dipakai di kalangan industri mempunyai keuntungan sebagai berikut:

1. Bentuknya yang sederhana dan memiliki konstruksi yang kuat dan hampir tidak pernah mengalami kerusakan yang berarti.
2. Harga relatif murah dan dapat diandalkan.
3. Efisiensi tinggi pada keadaan berputar normal, tidak memerlukan sikat sehingga rugi - rugi daya yang diakibatkannya dari gesekan dapat dikurangi.
4. Perawatan waktu mulai beroperasi tidak memerlukan starting tambahan khusus dan tidak harus sinkron.

Namun disamping hal tersebut diatas, terdapat pula faktor –faktor kerugian yang tidak menguntungkan dari motor induksi yaitu sebagai berikut :

1. Pengaturan kecepatan.
 - a. Prinsip Kerja Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi 3 fasa memiliki prinsip kerja induksi elektromagnetik yaitu ketika kumparan stator diberi tegangan 3 fasa maka timbulah medan putar dengan kecepatan $n_s = \frac{120 \times f}{P}$. Medan putar stator tersebut akan memotong batang konduktor rotor. Akibatnya pada kumparan rotor timbul tegangan induksi (ggl). Karena kumparan rotor merupakan rangkaian yang tertutup, ggl akan menghasilkan arus (I).

Adanya arus di dalam medan magnet menimbulkan gaya (F) pada rotor. Bila kopel mula yang dihasilkan oleh gaya (F) cukup besar untuk memikul kopel beban, rotor akan berputar searah dengan medan putar stator. Supaya timbul tegangan induksi maka harus ada perbedaan relatif antara kecepatan medan putar stator (n_s) dengan kecepatan medan putar rotor (n_r). Perbedaan antara N_s dengan N_r disebut slip (s). Bila $n_s = n_r$, tegangan tidak akan terinduksikan arus tidak mengalir pada kumparan jangkar rotor, dengan demikian tidak dihasilkan kopel. Kopel motor akan ditimbulkan apabila $n_r < n_s$.

b. Klasifikasi Motor Induksi Tiga Fasa

Motor listrik AC memiliki beberapa jenis, yang jenis ini membedakan berdasarkan beberapa faktor utama yang antara lain berdasarkan prinsip kerja, berdasarkan macam arus dan berdasarkan kecepatan.

1. Berdasarkan Prinsip Kerja

a. Motor Sinkron.

Biasa (tanpa *slip ring*)

Super (dengan *slip ring*)

b. Motor Asinkron.

Motor Induksi (*Squirrel Cage Rotor & Winding Rotor*)

2. Berdasarkan Macam Arus

a. Satu phasa

Motor ini hanya memiliki satu gulungan stator, beroperasi dengan pasokan daya satu phasa, memiliki sebuah rotor kandang tupai, dan memerlukan sebuah alat untuk menghidupkan motornya. Sejauh ini motor ini merupakan jenis motor yang paling umum digunakan dalam peralatan rumah tangga, seperti kipas angin, mesin cuci dan pengering pakaian, dan untuk penggunaan hingga 3 sampai 4 Hp.

b. Tiga phasa

Medan magnet yang berputar dihasilkan oleh pasokan tiga phasa yang seimbang. Motor tersebut memiliki kemampuan daya yang tinggi, dapat memiliki kandang tupai atau gulungan rotor (walaupun 90% memiliki rotor kandang tupai); dan penyalaan sendiri. Diperkirakan bahwa sekitar 70% motor.

di industri menggunakan jenis ini, sebagai contoh, pompa, kompresor, belt conveyor, jaringan listrik, dan grinder.

3. Berdasarkan Kecepatan

a. Kecepatan konstan: Kecepatan putaran motor tetap, tidak dapat diubah-ubah dan tidak dapat diatur.

- b. Kecepatan berubah: Terjadi perbedaan kecepatan motor pada saat awal dan akhir
 - c. Kecepatan diatur : Kecepatan putaran pada motor dapat diatur/diubah-ubah.
4. Bagian-Bagian Motor Induksi Tiga Fasa

Bagian – bagian motor listrik terdiri dari :

a. Rotor

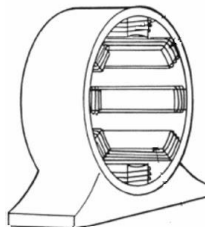
Rotor merupakan bagian utama motor yang berputar dan tempat dimana kumparan jangkar berada. Kumparan jangkar ini berfungsi membawa arus yang timbul akibat induksi tegangan dan menghasilkan putaran pada motor.



Gambar 2.1 Rotor Motor Induksi Tiga Fasa

b. Stator

Stator merupakan bagian utama pada motor yang diam dan tempat dimana kumparan medan berada. Kumparan medan ini berfungsi untuk menghasilkan medan magnet dari sumber tegangan AC 3 fasa. Ujung dari tiap kumparan medan ini disambungkan ke terminal box.



Gambar 2.2 Stator Motor Induksi Tiga Fasa

Konstruksi stator terdiri dari :

- 1) Rumah stator yang terdiri dari besi tuang
- 2) Inti stator yang terbuat dari besi lunak atau baja silicon
- 3) Terdapat slot untuk menempatkan kawat belitan

4) Belian stator yang terbuat dari tembaga

c. Bearing

Bearing atau bantalan merupakan komponen yang berfungsi menopang poros motor agar rotor dapat berputar. Selain itu bearing juga berfungsi sebagai penstabil posisi poros terhadap gaya horizontal dan gaya vertikal poros motor.

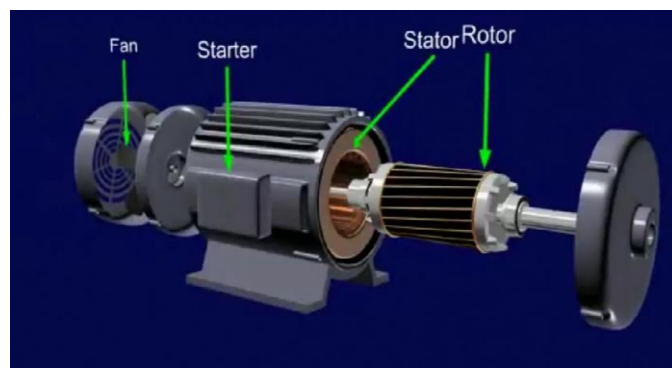


Gambar 2.3 Bearing Motor Induksi Tiga Fasa

d. Poros (*shaft*)

Poros merupakan batangan material yang berbentuk silindris dan tempat diletakkannya rotor. Selain berhubungan langsung dengan rotor, poros juga berhubungan langsung dengan bearing.

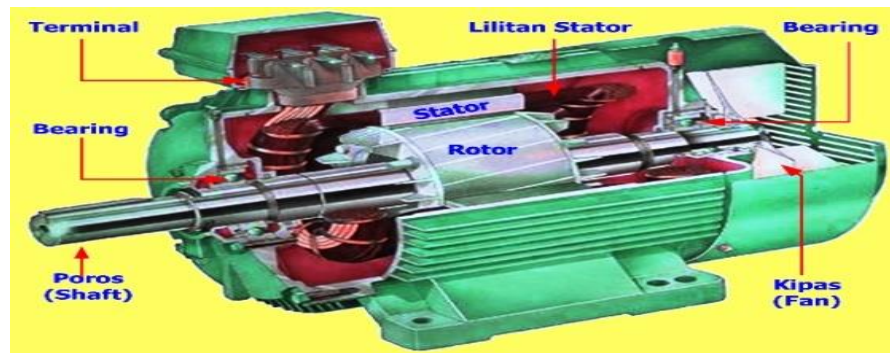
e. Kipas Pendingin/ *Fan motor*



Gambar 2.4 Posisi *Fan* Pada Motor

Kelengkapan pendingin suatu motor tergantung kepada kapasitasnya, makin besar kapasitasnya. Kipas yang ditempatkan pada poros berputar sesuai kecepatan poros bersama tutup kipas mengekskspansikan udara paksa ke sirip-sirip pendingin yang berada pada badan stator untuk melepaskan energi panas yang timbul pada motor ke udara bebas.

Bagian – bagian motor listrik bisa dilihat pada gambar 2.5



Gambar 2.5 Bagian – Bagian Motor Listrik

2.2.2 Daya Pada Motor Induksi

Pada motor induksi terjadi perubahan energi listrik menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran rotor. Pada motor induksi daya mekanik yang dihasilkan digunakan untuk berbagai keperluan sesuai dengan yang diinginkan. Daya pada motor listrik dapat dihitung menggunakan perhitungan perfasa maupun tiga fasa dan dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \phi \dots\dots\dots(2.1)$$

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V \cdot \cos \phi} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana :

P3 : Daya aktif tiga fasa (W)

V : Tegangan (V)

I : Arus (A)

$\cos \phi$: Faktor daya

2.2.3 Rugi – Rugi pada Motor Induksi 3 Fasa

Seperti kita ketahui bahwa motor-motor listrik adalah suatu alat untuk mengkonversikan energi listrik menjadi energi mekanis. Keadaan ideal dalam sistem konversi energi, yaitu mempunyai daya output tepat sama dengan daya input yang dapat dikatakan efisiensi 100%. Tetapi pada keadaan yang sebenarnya, tentu ada kerugian energi yang menyebabkan efisiensi dibawah 100%. Dalam sistem konversi energi elektro mekanik yakni dalam operasi motor –motor listrik terutama pada motor induksi, total daya yang diterima sama dengan daya yang diberikan, ditambah dengan kerugian daya yang terjadi, atau

$$P_{in} = P_{out} + P_{rugi} \dots \dots \dots (2.3)$$

Dimana :

P_{in} : Total daya yang diterima motor

P_{out} : Daya yang diterima motor untuk melakukan kerja

$P_{rugi} - rugi$: Total kerugian daya yang dihasilkan oleh motor

Motor listrik tidak pernah mengkonversikan semua daya yang diterima menjadi daya mekanik, tetapi selalu timbul kerugian daya yang semuanya berubah menjadi energi panas yang terbuang.

Efisiensi motor listrik dapat didefinisikan dari bentuk diatas, sebagai perbandingan dimana :

$$\text{Efisiensi} = P_{out}/P_{in} \times 100\% \dots \dots \dots (2.4)$$

Dari persamaan diatas, perlu dipelajari faktor – faktor yang menyebabkan efisiensi selalu dibawah 100%. Untuk itu perlu diketahui kerugian daya apa saja yang timbul selama motor beroperasi.

1. Belitan dalam motor yang dinamakan rugi – rugi listrik (rugi – rugi belitan).
2. Kerugian daya yang timbul langsung karena putaran motor, yang dinamakan rugi –rugi rotasi

Rugi – rugi rotasi ini terbagi menjadi dua jenis yaitu :

- a. Rugi – rugi mekanis akibat putaran.
- b. Rugi – rugi inti besi akibat kecepatan putaran dan fluks medan.

1. Rugi - rugi Inti

Rugi – rugi inti diperoleh pada besi magnetis didalam stator dan rotor akibat timbulnya efek histeris dan arus pusar (*eddy current*). Timbulnya rugi – rugi inti, ketika besi jangkar atau struktur rotor mengalami perubahan fluks terhadap waktu. Rugi – rugi ini tidak tergantung pada beban, tetapi merupakan fungsi dari pada fluks dan kecepatan motor. Pada umumnya rugi –rugi inti berkisar antara 20 – 25% dari total kerugian daya motor pada keadaan nominal.

Rugi inti :

$$P_i = 3.E_1^2 . G_c = \frac{3.E_1^2}{R_c} \dots\dots\dots (2.5)$$

Rugi - rugi arus eddy tergantung pada kuadrat dari kerapatan fluks dan frekuensi. Pada keadaan mesin normal besarnya dapat didekati dengan :

$$P_e = K_e f^2 B_{maks}^2 \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana:

- P_e = Rugi-rugi arus eddy
 B_{maks} = Kerapatan fluks maksimum
 F = Frekuensi
 K_e = Ketetapan pembanding

Harga K_e tergantung pada satuan yang digunakan, volume besi dan resistensi vitas besi. Ragam dari rugi - rugi histerisis dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan secara empiris saja. Persamaan yang banyak dipergunakan adalah :

$$P_h = K_h f B_{maks}^n \dots\dots\dots (2.7)$$

Pada mesin induksi, Rugi - rugi intinya terdapat di stator dan rotor hampir boleh diabaikan karena frekuensi di rotor relatif kecil.

Jadi total rugi – rugi inti adalah sebagai berikut :

$$P_i = P_h + P_i \dots \dots \dots (2.8)$$

Atau

$$P_i = Prugi - rugi . 0,25 \dots \dots \dots (2.9)$$

2. Rugi - rugi Mekanik

Rugi - rugi gesekan dan angin adalah energi mekanik yang dipakai dalam motor listrik untuk menanggulangi gesekan batalan poros, gesekan sikat melawan komutator atau slip ring, gesekan dari bagain yang berputar terhadap angin, terutama pada daun kipas pendingin. Kerugian energi ini selalu berubah menjadi panas berubah menjadi panas seperti pada semua rugi - rugi lainnya.

Rugi – rugi mekanik dianggap konstan dari beban nol hingga beban penuh dan ini adalah masuk akal tetapi tidak sepenuhnya tepat seperti halnya pada rugi –rugi inti. Macam – macam ketidak tepatan ini dapat dihitung dalam rugi – rugi *stray load*. Rugi – rugi mekanik biasanya berkisar antara 10 –15% dari total rugi – rugi daya motor pada keadaan beban nominal.

$$P_m = Prugi - rugi . 0,15 \dots \dots \dots (2.10)$$

3. Rugi – rugi Belitan

Rugi – rugi belitan sering disebut rugi – rugi tembaga tetapi pada saat sekarang sudah tidak begitu. Banyak motor listrik, terutama motor ukuran sangat kecil diatas 750 W, mempunyai belitan stator dari kawat alumunium yang lebih tepat disebut rugi –rugi I^2R yang menunjukkan besarnya daya yang berubah menjadi panas oleh tahanan dari konduktor tembaga atau aluminium. Total kerugian I^2R adalah jumlah dari rugi – rugi I^2R primer (stator) dan rugi - rugi I^2R sekunder (rotor).

Rugi –rugi I^2R dalam belitan sebenarnya tidak hanya tergantung pada arus, tetapi juga pada tahanan belitan di bawah kondisi operasi. Sedang tahanan efektif dari belitan selalu berubah dengan perubahan temperatur, skin effect dan sebagainya. Sangat sulit untuk menentukan nilai yang sebenarnya dari tahanan belitan dibawah kondisi operasi. Kesalahan pengukuran kerugian belitan dapat dimasukkan ke dalam kerugian *stray load*. Pada umumnya rugi –

rugi belitan ini berkisar antara 55 -60% dari total kerugian motor pada keadaan beban nominal.

$$P_b = P_{\text{rugi}} - \text{rugi. } 0,55 \dots \dots \dots (2.11)$$

4. Rugi-rugi *Stray Load*

Kita telah melihat bahwa beberapa macam kerugian selalu dianggap konstan dari keadaan beban nol hingga beban penuh walaupun kita tahu bahwa rugi – rugi tersebut sebenarnya berubah, secara kecil terhadap beban. Sebagai tambahan, kita tidak dapat menghitung berapa besar kerugian ini seperti yang diakibatkan oleh perubahan fluks terhadap beban, geometri konduktor sehingga arus terbagi sedikit tidak merata dalam konduktor bertambah, mengakibatkan pertambahan tahanan konduktor dan karena itu rugi-rugi konduktor harus bertambah. Dari semua kerugian yang relatif kecil ini, baik dari sumber yang di ketahui maupun yang tidak diketahui, disatukan menjadi rugi – rugi *stray load* yang cenderung bertambah besar apabila beban meningkat (berbanding kuadrat dengan arus beban). Pada umumnya kerugian ini berkisar 1-5% dari total kerugian daya motor pada keadaan beban nominal.

$$P_s = P_{\text{rugi}} - \text{rugi. } 0,05 \dots \dots \dots (2.12)$$

Tabel 2.1 Jenis rugi-rugi pada motor induksi (BEE India, 2004)

Jenis Rugi-rugi	Persentase rugi-rugi total (%)
Rugi-rugi tetap atau rugi-rugi inti	25
Rugi-rugi variabel: rugi-rugi pada stator	34
Rugi-rugi variabel: rugi-rugi pada rotor	21
Rugi-rugi gesekan	15
Rugi-rugi beban menyimpang(<i>stray load</i>)	5

a. Gejala dan Penyebab Kerusakan Motor Induksi 3 Fasa

Salah satu gejala dan penyebab kerusakan motor induksi 3 fasa adalah tekanan/stress yang terjadi pada motor saat operasi bisa disebabkan dari beberapa hal pada data berikut:

Tabel 2.2 *Stator Stresses*

STATOR STRESSES [12]

• Thermal Stresses - Thermal Aging - Voltage Variation - Cycling - Loading - Ventilation - Ambient	• Mechanical Stresses - Coil Movement - Rotor Strikes - Defective Rotor - Flying Objects - Lugging of Leads
• Electrical Stresses - Dielectric Aging - Tracking - Corona - Transients	• Environmental Stresses - Moisture - Chemical - Abrasion - Damaged Parts - Excessive Ambient - Restricted Ventilation

Tabel 2.3 *Rotor Assembly stresses*

ROTOR ASSEMBLY STRESSES [14]

• Thermal - Thermal Overload - Thermal Unbalance - Excessive Rotor Losses - Hot Spots - Sparking • Magnetic - Rotor Pullover - Noise - Vibration - Off Magnetic Center - Saturation of Lamination - Circulating Currents • Residual - Stress Concentrations - Uneven Bar Stress • Dynamic - Vibration - Rotor Rub - Overspeeding - Cyclic Stresses - Centrifugal Force	• Environmental - Contamination - Abrasion - Foreign Particles - Restricted Ventilation - Excessive Ambient Temperature • Mechanical - Casting Variations - Loose Laminations - Incorrect Shaft/Core Fit - Fatigue or Part Breakage - Poor Rotor to Stator Geometry - Material Deviations • Other - Misapplications - Poor Design Practices - Manufacturing Variation - Loose Bars, Core - Transient Torques - Wrong Direction of Rotation
---	--

Terdapat macam-macam tekanan/stress pada motor induksi 3 fasa yang bisa menyebabkan motor rusak/berhenti beroperasi yaitu:

Tabel 2.4 *Motor Components/ Stresses*

MOTOR COMPONENT/STRESSES

TYPE OF STRESS	STATOR WINDING	ROTOR ASSEMBLY	BEARINGS	SHAFT
Thermal	√	√	√	√
Electrical/ Dielectric	√	√	√	
Mechanical	√	√	√	√
Dynamic		√	√	√
Shear				√
Vibration/Shock	√	√	√	√
Residual		√		√
Electro-Magnetic	√	√	√	√
Environmental	√	√	√	√

Tabel 2.5 *Summary of Analysis Motor*

SUMMARY OF METHODOLOGY FOR ANALYSIS

MOTOR COMPONENT	FAILURE MODE/CLASS	FAILURE PATTERN
Stator Winding	Turn to Turn Phase to Phase Phase to Ground Coil to Coil Open Circuit	Symmetrical Single Phased Non-Symmetrical & Grounded Non-Symmetrical & No Ground
Rotor Assembly	Shaft Bearing Lamination Squirrel Cage Vent. System	Thermal Magnetic Residual Dynamic Mechanical Environmental
Ball Bearings	Fatigue Spalling Fretting Smearing Skidding Wear Lub. Failure Electric Pitting Fluting Cracks Seizures	Thermal Vib. & Noise Lubricant Quality Mounting/Fits Contamination Mechanical Damage Electrical Damage Load Pattern
Shaft	Overload Fatigue Corrosion	Ductile Brittle Beach Marks Conchoidal Marks Chevron Marks Ratchet Marks Cup/Cone Shear Lips Fretting

Selain tekanan/stress yang terjadi pada motor induksi 3 fasa, salah satu faktor penyebab kerusakan pada motor induksi 3 fasa sendiri yaitu telah habisnya masa lifetime motor.

Menurut *IEEE Petro-Chemical Paper PCIC-94-01* presentase distribusi kerusakan motor induksi 3 fasa bisa dilihat dari tabel berikut

Tabel 2.6 Presentase Penyebab kerusakan motor induksi 3 fasa

Failure	IEEE	EPRI
1. Bearings	44%	41%
2. Stator	26%	36%
3. Rotor	8%	9%
4. Others	22%	14%

Pada tabel 2.6 menunjukan bahwa presentase penyebab kerusakan pada motor induksi 3 fasa menurut IEEE dan EPRI yang pertama terdapat pada bearings dengan persentase 44% dan 41% dan yang kedua terdapat pada stator dengan persentase 26% dan 36% dan ketiga adalah rotor dengan persentase 8% dan 9% dan yang ke empat karena pengaruh lainnya dengan persentase 22% dan 14%.

2.3 Kerangka Pemikiran

