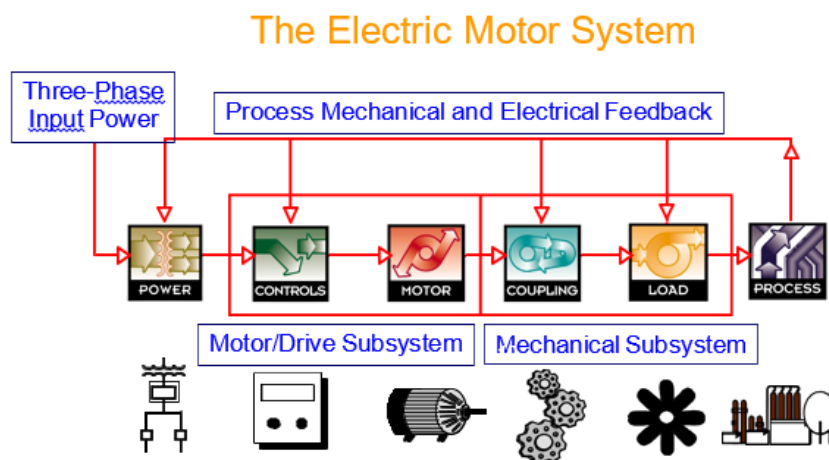


## BAB II DASAR TEORI

### 2.1 Motor Listrik

Motor listrik adalah mesin listrik yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Sebagian besar motor listrik beroperasi melalui interaksi antara medan magnet motor dan arus listrik dalam lilitan kawat untuk menghasilkan gaya dalam bentuk torsi yang diterapkan pada poros motor. Motor listrik dapat digerakkan oleh sumber arus searah (DC), seperti dari baterai, kendaraan bermotor atau penyearah, atau dengan sumber arus bolak-balik (AC), seperti jaringan listrik, inverter atau generator listrik. Generator listrik secara mekanis identik dengan motor listrik, tetapi beroperasi dengan aliran daya terbalik, mengubah energi mekanik menjadi energi listrik.

Motor listrik dapat diklasifikasikan berdasarkan pertimbangan seperti jenis sumber daya, konstruksi internal, aplikasi, dan jenis keluaran gerak. Selain tipe AC dan DC, motor dapat disikat atau tanpa sikat, mungkin dari berbagai fase (lihat fase tunggal, dua fase, atau tiga fase), dan dapat berupa berpendingin udara atau berpendingin cairan. Motor serba guna dengan dimensi dan karakteristik standar menyediakan tenaga mekanis yang nyaman untuk penggunaan industri. Motor listrik terbesar digunakan untuk penggerak kapal, kompresi pipa, dan aplikasi penyimpanan yang dipompa dengan rating mencapai 100 megawatt. Motor listrik ditemukan pada kipas industri, blower dan pompa, peralatan mesin, peralatan rumah tangga, perkakas listrik, dan drive disk. Motor kecil dapat ditemukan di jam tangan listrik.



**Gambar 2. 1** Sistem Motor Listrik

Sumber : ALL-TEST PRO® On-Line SeriesDesk Guide and Pattern Recognition Manual 2nd Edition

Motor listrik menghasilkan gaya linier atau putar ( torsi ) yang dimaksudkan untuk menggerakkan beberapa mekanisme eksternal, seperti kipas atau elevator. Motor listrik umumnya dirancang untuk putaran kontinu, atau untuk gerakan linier dalam jarak yang signifikan dibandingkan ukurannya. Solenoid magnetik menghasilkan gaya mekanis yang signifikan, tetapi pada jarak operasi yang sebanding dengan ukurannya. Transduser seperti penguas suara dan mikrofon mengubah antara arus listrik dan gaya mekanis untuk mereproduksi sinyal seperti suara. Jika dibandingkan dengan mesin pembakaran internal umum ICE (*Internal Combustion Engine*), motor listrik lebih ringan, secara fisik lebih kecil, menghasilkan lebih banyak output daya, lebih sederhana secara mekanis dan lebih murah untuk dibuat, sambil memberikan torsi instan dan konsisten pada kecepatan berapa pun, dengan lebih responsif, efisiensi keseluruhan yang lebih tinggi dan generasi panas yang lebih rendah. Namun, motor listrik tidak senyaman atau umum seperti ICE (*Internal Combustion Engine*) dalam aplikasi seluler (misalnya mobil dan bus) karena mereka membutuhkan baterai yang besar dan mahal, sedangkan ICE (*Internal Combustion Engine*) memerlukan tangki bahan bakar yang relatif kecil.

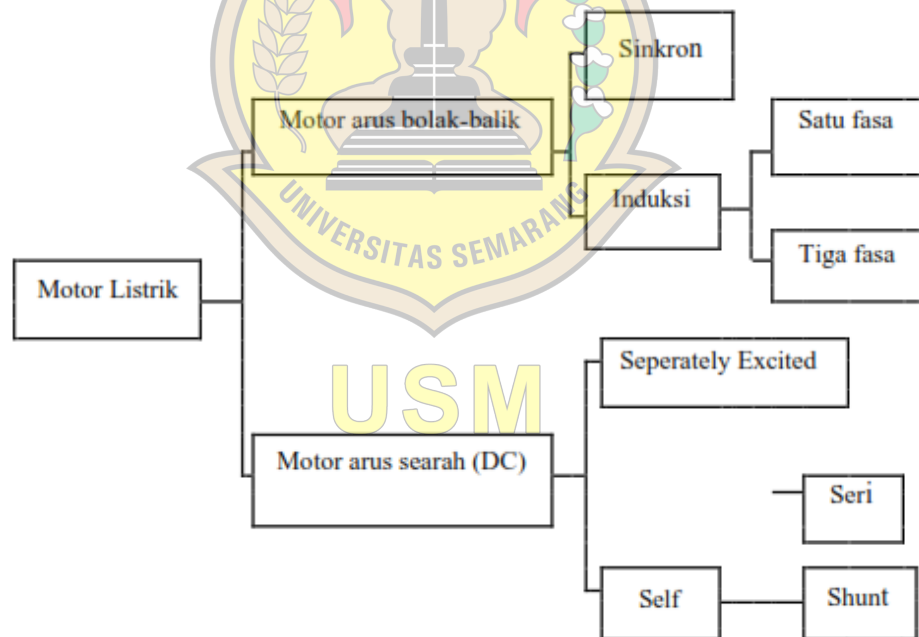
## 2.2 Motor Induksi

Motor Induksi adalah peralatan elektromekanik yang digunakan dalam berbagai aplikasi industri untuk mengubah tenaga listrik menjadi energi mekanik. Motor induksi digunakan di berbagai bidang seperti pada pembangkit tenaga listrik, industri kertas, ladang minyak dan pabrik. Penggunaannya sebagian besar untuk penggerak pompa, *conveyor*, mesin press, elevator dan masih banyak lagi. Diantara mesin listrik yang ada, motor induksi paling banyak digunakan karena kuat, kokoh, harganya cukup murah, handal, perawatannya mudah, dan efisiensi daya cukup tinggi.

Karena proses penuaan alami dan berbagai faktor lain yang terkait dengan pola operasi motor induksi kerusakan pada motor induksi dapat terjadi. Stres elektrik dan mekanik adalah contoh dari kerusakan akibat pola operasi. Stres mekanik terjadi akibat kelebihan beban dan perubahan beban yang tiba - tiba yang dapat

mengakibatkan kerusakan bearing dan patahnya rotor bar. Stress elektrik biasanya dihubungkan dengan permasalahan sumber tegangan. Sebagai contoh motor induksi yang bersumber pada AC drive memiliki kecenderungan mengalami stres elektrik akibat frekuensi tinggi dari komponen arus stator, *overvoltage* akibat panjang kabel antara motor dan AC drive akibat pantulan gelombang tegangan transien. Stres elektrik ini dapat menyebabkan hubung singkat belitan stator yang berarti kerusakan total motor induksi ,(I Gusti Putu Yudiastawan, 2009).

Apabila kerusakan pada motor induksi tidak dideteksi pada tahap permulaan akan dapat mengakibatkan kerusakan yang sangat parah dengan berbagai tipe kerusakan. Kerusakan motor yang tidak terdeteksi dapat mengakibatkan *shutdown* dari proses produksi yang tentunya menyebabkan hilangnya waktu produktif akibat perbaikan mesin yang cukup lama, biaya pemeliharaan yang besar akibat banyaknya komponen yang harus diganti, dan kerugian bahan baku produksi yang seharusnya bisa diolah namun harus terbuang karena mesin berhenti beroperasi.



**Gambar 2. 2** Klasifikasi motor listrik

Sumber: <http://elektronika-dasar.web.id/jenis-jenis-motor-listrik/>

### 2.2.1 Motor Listrik Arus Bolak-Balik AC

Motor listrik arus bolak-balik adalah jenis motor listrik yang beroperasi dengan sumber tegangan arus listrik bolak balik (AC, Alternating Current). Motor

listrik arus bolak-balik AC ini dapat dibedakan lagi berdasarkan sumber dayanya sebagai berikut:

1. Motor sinkron, adalah motor AC bekerja pada kecepatan tetap pada sistem frekwensi tertentu. Motor ini memerlukan arus searah (DC) untuk pembangkitan daya dan memiliki torque awal yang rendah, dan oleh karena itu motor sinkron cocok untuk penggunaan awal dengan beban rendah, seperti kompresor udara, perubahan frekwensi dan generator motor. Motor sinkron mampu untuk memperbaiki faktor daya sistem, sehingga sering digunakan pada sistem yang menggunakan banyak listrik.
2. Motor asinkron (motor induksi), merupakan motor listrik AC yang bekerja berdasarkan induksi medan magnet antara rotor dan stator. Motor induksi dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok utama sebagai berikut :
  1. Motor induksi satu fase. Motor ini hanya memiliki satu gulungan stator, beroperasi dengan pasokan daya satu fase, 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 fan angin, mesin cuci dan pengering pakaian, dan untuk penggunaan hingga 3 sampai 4 Hp.
  2. Motor induksi tiga fase. Medan magnet yang berputar dihasilkan oleh pasokan tiga fase 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. Tersedia dalam ukuran 1/3 hingga ratusan Hp.

### 2.2.2 Motor Listrik Arus Searah DC

Motor listrik arus searah adalah jenis motor listrik yang beroperasi dengan sumber tegangan arus listrik searah (DC, *Direct Current*). Motor listrik arus searah DC ini dapat dibedakan lagi berdasarkan sumber dayanya sebagai berikut :

1. Motor DC sumber daya terpisah/ *Separately Excited*. Adalah jenis motor DC yang sumber arus medan disupply dari sumber terpisah, sehingga motor listrik DC ini disebut motor DC sumber daya terpisah (*separately excited*).
2. Motor DC sumber daya sendiri / *Self Excited*. Adalah jenis motor DC yang sumber arus medan disupply dari sumber yang sama dengan kumparan motor listrik, sehingga motor listrik DC ini disebut motor DC sumber daya sendiri (*self excited*).

Motor DC sumber daya sendiri / *self excited* ini dibedakan lagi menjadi 3 jenis berdasarkan konfigurasi supply medan dengan kumparan motornya sebagai berikut:

1. Motor DC shunt, Pada motor DC shunt gulungan medan (medan shunt) disambungkan secara paralel dengan gulungan motor listrik. Oleh karena itu total arus dalam jalur merupakan penjumlahan arus medan dan arus dinamo.
2. Motor DC Seri, Pada motor DC seri, gulungan medan (medan shunt) dihubungkan secara seri dengan gulungan kumparan motor (A). Oleh karena itu, arus medan sama dengan arus dinamo.
3. Motor DC Kompon/Gabungan, Motor Kompon DC merupakan gabungan motor seri dan shunt. Pada motor kompon, gulungan medan (medan shunt) dihubungkan secara paralel dan seri dengan gulungan motor listrik. Sehingga, motor kompon memiliki torque penyalan awal yang bagus dan kecepatan yang stabil.

Jenis dari motor-motor listrik tersebut sangatlah banyak seperti pada gambar diatas, namun yang akan dikaji pada laporan ini yaitu motor induksi 3 fasa karena motor ini banyak dimanfaatkan di industri. Fungsi dari motor induksi 3 fasa ini pada PLTGU Semarang sebagai penggerak pompa air ketel, motor penggerak pompa air ketel, motor penggerak pompa air pendingin kondensor, motor penggerak kipas penghisap dan kipas penekan udara ketel, motor pemutar poros turbin, motor

penggerak pompa sirkulasi minyak pelumas yang memberi pelumasan ke bantalan turbin dan bantalan generator, motor penggerak penyemprot bahan bakar ke ruang ketel. Berikut adalah nama motor-motor yang ada di PT Indonesia Power Semarang PGU.

Sumber : PT Indonesia Power Semarang PGU

**Tabel 2. 1** Motor listrik di PT Indonesia Power Semarang PGU

Motor 400 Volt			
1	Auxiliary Oil Pump	9	Turbine Shell & Exh. Frame Blower
2	Condensate Circulating Pump	10	LP Circulating Pump
3	Condensate Pump	11	Circulating Water Booster Pump
4	Circulating water Pump	12	Motor Crangking
5	HP Circulating Pump	13	Motor CCW
6	HP Transfer Pump	14	Motor Fan Cooling
7	Vacum Pump	15	Vacum Primming Pump
8	Water Cooling Pump	15	88 CR

### 2.3 Motor Water Cooling Pump (Sistem Air Pendingin)

System air pendingin yang dipergunakan dengan system tertutup dan bertekanan cukup besar kira – kira  $5 \text{ kg/cm}^2$  atau kira – kira 70 psig, system ini didesign untuk dapat mengakomodasikan dan menghilangkan panas yang dibutuhkan pada system minyak pelumasan pada bearing – bearing Gas Turbine dan Generator, pada System Hydrogen pendingin Generator, juga sebagai air pendingin di *Atomizing air precooler*, maupun sebagai pendingin *Turbine Support legs*, ( Kaki - kaki penyangga Turbine ). System air pendingin ini terdiri dari dua bagian:

Bagian yang pertama adalah komponen – komponen pendingin yang berada di bagian dalam dari Gas Turbine dan Generator, antara lain :

1. Pendingin – pendingin Hydrogen system pendingin Generator.
2. Lube Oil Heat Exchanger ( pendingin minyak pelumas ).
3. Atomizing Precooler ( pendingin udara untuk atomizing air ).
4. Turbine Support Legs ( pendingin kaki – kaki penyangga Turbine ).



Sedang bagian yang kedua adalah bagian dari komponen - komponen yang berada diluar Gas Turbine dan Generatornya, antara lain :

1. Sebuah module pendingin air ( Cooling Module / Radiator ) dengan empat buah kipas pendingin yang digerakkan oleh masing – masing motor penggeraknya ( 88 FC – 1 s/d 88 FC – 4 ).
2. Dua buah pompa air pendingin yang dipasang sejajar ( 88 WC – 1 dan 88 WC – 2 ).
3. Beberapa valve dan dua buah peralatan pengatur besaran aliran air pendingin. VTR 1 dan VTR 2.



**Gambar 2. 3** Motor Water Pump Cooling Pump  
(Dokumentasi Pribadi)

**Tabel 2. 2** Spesifikasi Motor Water Cooling Pump

Nama Peralatan	Auxiliary Oil Pump
Daya	75 KW
Tegangan	380 Volt
Arus Normal	131 Amps
Rotasi	2960 RPM
Frekuensi	50 Hz

Air yang berada pada system air pendingin ini disirkulasikan sebagai perantara pendinginan bagi beberapa peralatan-peralatan pada Gas Turbine maupun Generatornya, dan menjaga agar temperatur minyak pelumas masih berada dalam keadaan wajar, atau masih berada pada batas-batas yang diijinkan. Kapanpun juga,

selama system air pendingin ini diperlukan harus dalam keadaan ber tekanan, karena untuk menjamin agar tercukupinya kebutuhan pendinginannya.

Air pendingin tersebut disirkulasikan pertama-tama melalui keempat pendingin Hydrogen system pendinginan Generator, yang mana penukar panasnya berada dibagian atas casing Generator, panas dari Gas Hydrogen pendingin Generator tersebut terserap oleh aliran air pendingin disemua tempat penukar panas (*Heat Exchanger*) tersebut. Selanjutnya aliran air pendingin dialirkan masuk melalui pendingin minyak pelumas, (*Lube Oil Heat Exchanger*), pendingin udara untuk Atomizing air (*Atomizing Air Precooler*), dan pendingin kaki – kaki penyangga Turbine (*Support Legs Water Jacket*). Tiga system pendingin yang terakhir ini terpasang parallel, sedangkan untuk mengatur besarnya aliran yang diperlukan dimasing-masing pendinginnya dipasang orifice-orifice dengan ukuran yang sesuai.

Air pendingin menjaga temperatur minyak pelumas agar masih berada pada temperatur yang diijinkan, dengan begitu pelumasan terhadap semua bearing-bearing Turbine dan Generator bisa lebih efektif. Pendinginan pada kaki – kaki penyangga Turbine (*Turbine Support Legs*) sangatlah diperlukan, sebab bermaksud untuk mencegah terjadinya pemuaiian yang berlebihan pada kedua kaki penyangga Turbine tersebut sehingga dapat menyebabkan poros Turbine tidak lagi segaris lurus terhadap poros generatornya (*misalignment*). Sebagian dari udara yang di kompresikan oleh Turbine Compressor dikirimkan dengan melalui *Atomizing Air Precooler* terlebih dahulu sebelum dikompresikan lebih lanjut oleh *Atomizing Air Booster Compressor*, hal ini dengan maksud udara yang akan dimasukkan ke *Atomizing Air Booster Compressor* akan jauh lebih rapat dan jauh lebih dingin keadaannya, sehingga hasil udara yang dikompresinya akan bertekanan jauh lebih besar.

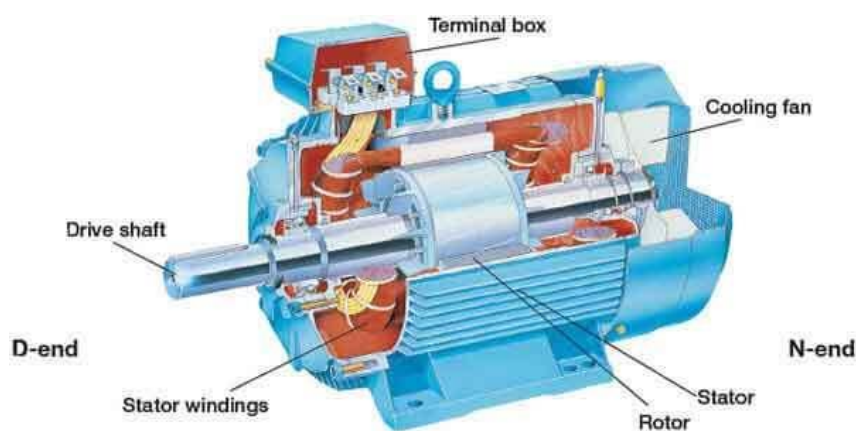
Disitu disediakan dua buah penukar panas (*Heat Exchanger*) yang terpasang berjajar dan berfungsi sebagai pendingin untuk minyak pelumasnya, salah satunya dipergunakan ketika Gas Turbine normal beroperasi, sedang satu lainnya dapat dilakukan pem bersihan, perawatan, ataupun diposisikan standby. Ketika salah satu dari pendingin tersebut dibutuhkan untuk perawatan, hal tersebut pelaksanaannya dapat dilakukan dengan menutup isolasi valve-valve untuk supply air pendingin yang menuju dan kembali dari pendingin tersebut. Sedangkan pendingin untuk udara



*atomizing (Atomizing Air Precooler)*, hanya terpasang satu buah saja. Valve - valve pengatur aliran air pendingin juga terpasang dikedua system pendingin tersebut dan keduanya telah diset untuk sesuai kebutuhan pendinginannya, VTR 1 sebagai pengatur aliran air pendingin di (*Heat Exchanger*) pendingin minyak pelumas, sedangkan VTR 2 sebagai pengatur aliran air pendingin di (*Heat Exchanger*) pendingin udara atomizing (*Atomizing Air Precooler*). Air pendingin yang telah melakukan pendinginan tersebut mengalir kembali menuju ke Cooling Module yang mana ia berfungsi sebagai pelepas panas yang diserap oleh air pendingin di beberapa tempat pendinginan (*Heat Exchanger*). Pada bagian atas *Cooling Module* terdapat tangki tandon air pendingin dan berfungsi lain sebagai penyedia tempat pemuai air panas dikarenakan terjadinya uap didalam pipa – pipa *Heat Exchanger*, ia juga akan memberikan alarm bilamana level air pendingin dalam tangki tandon sangat rendah.

#### 2.4 Konstruksi Motor Induksi

Pada dasarnya motor induksi terdiri dari suatu bagaian yang tidak berputar (stator) dan bagian yang bergerak memutar (rotor). Secara ringkas stator terdiri dari blok – blok dinamo yang berisolasi pada satu sisinya dan mempunyai ketebalan 0,35 – 0,5 mm, disusun menjadi sebuah paket blok yang berbentuk gelang. Disisi dalamnya dilengkapi dengan alur – alur. Didalam alur ini terdapat perbedaan antara motor asinkron dengan lilitan sarang (rotor sarang atau rotor hubung pendek) dan gelang seret dengan lilitan tiga fasa. Atau dari sisi lainnya bahwa inti besi stator dan rotor terbuat dari lapisan (email) baja silikon tebalnya 0,35 - 0,5 mm, tersusun rapi, masing – masing terisolasi secara elektrik dan diikat pada ujung – ujungnya.



**Gambar 2. 4** Konstruksi Motor Induksi

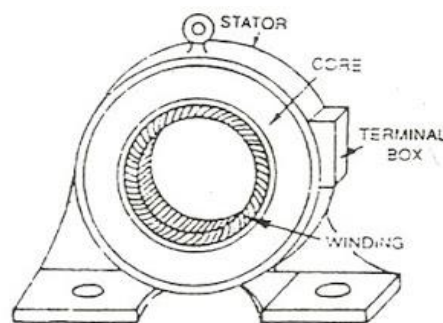
Sumber: <https://www.plcdroid.com/2019/03/motor-induksi.html>

Lamel inti besi stator dan rotor bagian motor dengan garis tengah bagian motor, dengan garis tengah bagian luar dari stator lebih dari 1 m. Bagi motor dengan garis tengah yang lebih besar, lamel inti besi merupakan busur inti segmenyang disambung – sambung menjadi satu lingkaran. Celah udara antara stator dan rotor pada motor yang kecil adalah 0,25 – 0,75 mm, pada motor yang besar sampai 10 mm. Celah udara yang besar ini disediakan bagi kemungkinan terjadinya perenggangan pada sumbu sebagai akibat pembebanan transversal pada sumbu atau sambungannya. Tarikan pada pita (belt) atau beban yang tergantung tersebut akan menyebabkan sumbu motor melengkung.

Pada dasarnya inti besi stator dan belitan rotor motor tak serempak ini sama dengan stator dan belitan stator mesin serempak. Kesamaan ini dapat ditunjukkan bahwa pada rotor mesin tak serempak yang dipasang / sesuai dengan stator mesin tak serempak akan dapat bekerja dengan baik.

#### 2.4.1 Stator (bagian motor yang diam)

Pada bagian stator terdapat beberapa slot yang merupakan tempat kawat (konduktor) dari tiga kumparan yang masing – masing berbeda fasa dan menerima arus dari tiap fasa tersebut yang disebut kumparan stator. Stator terdiri dari plat – plat besi yang disusun sama besar dengan rotor dan pada bagian dalam mempunyai banyak alur yang diberi kumparan kawat tembaga yang berisolasi. Jika kumparan stator mendapatkan suplai arus tiga fasa maka pada kumparan tersebut akan timbul flux magnet putar. Karena adanya flux magnet putar pada kumparan stator, mengakibatkan rotor berputar karena adanya induksi magnet dengan kecepatan putar rotor sinkron dengan kecepatan putar stator. Bentuk konstruksi stator motor induksi dapat kita lihat pada gambar 2.5 di bawah ini:



**Gambar 2. 5** Stator

Sumber: <https://www.plcdroid.com/2019/03/motor-induksi.html>

### 1. Outer Frame

Ini adalah bagian luar motor. Fungsi utamanya adalah untuk mendukung inti stator dan melindungi bagian dalam alat berat. Untuk mesin kecil, rangka luar dicor, tetapi untuk mesin besar, itu dibuat.

### 2. Stator Core

Inti stator dibuat dari baja tatanan silikon bermutu tinggi. Fungsi utamanya adalah untuk membawa medan magnet bolak-balik yang menghasilkan histeresis dan kerugian arus eddy. Stempel dipasang pada bingkai stator. Setiap stamping terisolasi dari yang lain dengan lapisan pernis tipis. Ketebalan cap biasanya bervariasi dari 0,3 hingga 0,5 mm.

### 3. Stator windings

Inti stator membawa belitan tiga fase yang biasanya disuplai dari sistem pasokan tiga fase. Enam terminal belitan (dua dari setiap fase) terhubung dalam kotak terminal mesin. Stator motor terluka untuk sejumlah kutub tertentu, tergantung pada kecepatan motor. Jika jumlah kutub lebih besar, kecepatan motor akan lebih sedikit dan jika jumlah kutub kurang dari kecepatan akan tinggi.

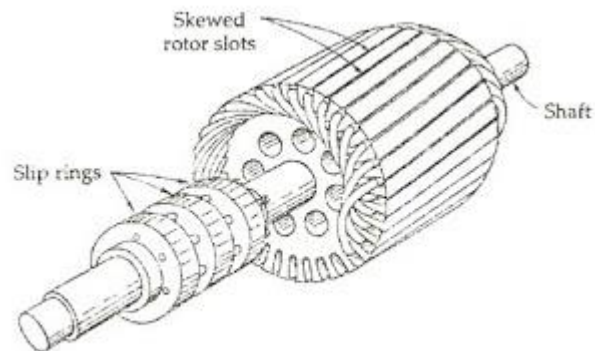
#### 2.4.2 Rotor (bagian motor yang bergerak)

Berdasarkan hukum Faraday tentang imbas magnet, maka medan putar yang secara relatif merupakan medan magnet yang bergerak terhadap penghantar rotor akan mengibaskan gaya gerak listrik (ggl). Frekuensi ggl imbas ini sama dengan frekuensi jala – jala.

Besar ggl imbas ini berbanding lurus dengan kecepatan relatif antara medan putar dan penghantar rotor. Penghantar - penghantar dalam rotor yang membentuk suatu rangkaian tertutup, merupakan rangkaian melaju bagi arus rotor dan searah dengan hukum yang berlaku yaitu hukum Lenz.

Arahnya melawan fluksi yang mengimbas, dalam hal ini arus rotor itu ditimbulkan karena adanya perbedaan kecepatan yang berada diantara fluksi atau medan putar stator dengan penghantar yang diam. Rotor akan berputar dalam arah yang sama dengan arah medan putar stator, untuk mengurangi beda kecepatan diatas.

Jika rotor dibebani, maka putaran rotor akan turun sehingga terjadi perbedaan putaran antara rotor dan stator, perbedaan kecepatan putaran ini disebut slip.

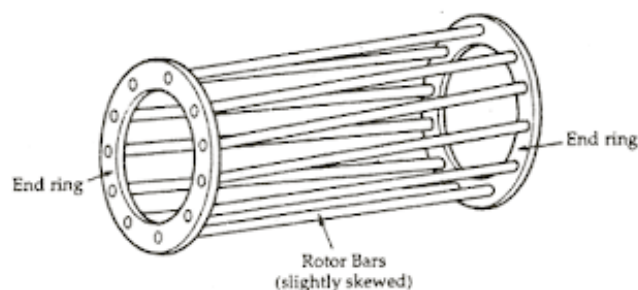


**Gambar 2. 6** Bentuk Rotor Belit

Sumber: <https://www.plcdroid.com/2019/03/motor-induksi.html>

### 2.4.3 Motor Rotor Sangkar

Motor rotor sangkar konstruksinya sangat sederhana, yang mana rotor dari motor sangkar adalah konstruksi dari inti berlapis dengan konduktor dipasangkan paralel, atau kira – kira paralel dengan poros yang mengelilingi permukaan inti. Konduktornya tidak terisolasi dari inti, karena arus rotor secara alamiah akan mengalir melalui tahanan yang paling kecil konduktor rotor. Pada setiap ujung rotor, konduktor rotor semuanya dihubungkan dengan cincin ujung. Batang rotor dan cincin ujung sangkar yang lebih kecil adalah coran tembaga atau aluminium dalam satu lempeng pada inti rotor. Bentuk motor rotor sangkar sendiri dapat dilihat pada gambar 2.7. Dalam motor yang lebih besar, batang rotor tidak dicor melainkan dibenamkan kedalam alur kemudian dilas ditempatkan paralel terhadap poros motor tetapi kerap kali dimiringkan. Hal ini menghasilkan torsi yang lebih seragam dan juga mengurangi derau dengung magnetik sewaktu motor sedang jalan.



**Gambar 2. 7** Bentuk rotor sangkar

Sumber: <https://www.plcdroid.com/2019/03/motor-induksi.html>

Motor induksi jenis ini mempunyai rotor dengan kumparan yang terdiri dari beberapa batang konduktor yang disusun sedemikian rupa sehingga menyerupai sangkar tupai yang terlihat pada gambar dibawah ini, konstruksi rotor seperti ini sangat sederhana bila dibandingkan dengan rotor jenis mesin listrik lainnya.

Dengan demikian harganya pun murah karena konstruksinya yang demikian, padanya tidak mungkin diberikan pengaturan tahanan luar seperti pada motor induksi dengan rotor belitan. Untuk membatasi arus mula yang besar, tegangan sumber harus dikurangi dan biasanya digunakan oto transformator atau saklar Y – D. Tetapi berkurangnya arus akan berakibat berkurangnya kopel mula, untuk mengatasi hal ini dapat digunakan jenis rotor dengan sangkar ganda.

## 2.5 Prinsip Kerja Motor Induksi

Motor Induksi 3 Fasa bekerja seperti kita memiliki sumber AC 3 fasa yang terhubung dengan stator pada motor. Karena stator terhubung dengan sumber AC maka arus dapat masuk ke stator melalui kumparan stator. Sekarang kita hanya melihat 1 kumparan stator saja. Sesuai hukum faraday bahwa apabila terdapat arus yang mengalir pada suatu kabel maka arus itu dapat menghasilkan fluks magnet pada kabel tersebut, dimana arahnya mengikuti kaidah tangan kanan. Medan magnet yang berputar mengarah ke arah berlawanan arah jarum jam. Medan magnet yang berputar memiliki polaritas yang bergerak. Polaritas medan magnet bervariasi dengan memperhatikan setengah siklus positif dan negatif dari suplai. Perubahan polaritas membuat medan magnet berputar.

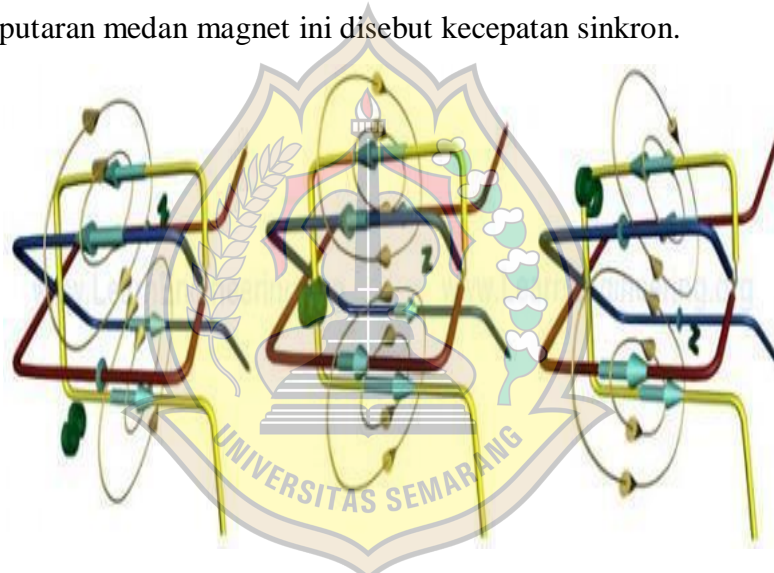


**Gambar 2. 8** Arus pada kabel menghasilkan fluks

Sumber: <http://www.insinyoer.com/prinsip-kerja-motor-induksi-3-fasa/>



Setiap fasa dalam kumparan stator akan mengalami hal yang sama karena setiap fasa dialiri arus, namun besarnya fluks yang dihasilkan tidak sama di setiap waktu. Hal ini disebabkan besarnya arus yang berbeda-beda pada tiap fasa di tiap waktunya. Misalkan fasa-fasa ini diberi nama a, b, dan c. Ada kalanya arus pada fasa a maksimum sehingga menghasilkan fluks maksimum dan arus fasa b tidak mencapai maksimum, dan ada kalanya arus pada fasa b maksimal sehingga menghasilkan fluks maksimum dan arus pada fasa a tidak mencapai maksimum. Hal ini mengakibatkan fluks yang dibangkitkan lebih cenderung pada fasa mana yang mengalami kondisi arus paling tinggi. Secara tidak langsung dapat dikatakan bahwa medan magnet yang dibangkitkan juga ikut “berputar” seiring waktu. Kecepatan putaran medan magnet ini disebut kecepatan sinkron.



**Gambar 2. 9** Gambar Medan magnet berputar

Sumber: <http://www.insinyoer.com/prinsip-kerja-motor-induksi-3-fasa/>

Sekarang ditinjau kasus rotor sudah dipasang dan kumparan stator sudah dialiri arus. Akibat adanya fluks pada kumparan stator maka arus akan terinduksi pada rotor. Anggap rotor dibuat sedemikian sehingga arus dapat mengalir pada rotor (seperti rotor tipe *squirrel cage*). Akibat munculnya arus pada rotor dan adanya medan magnet pada stator maka rotor akan berputar mengikuti hukum lorentz. Hal yang menarik disini ialah kecepatan putaran rotor tidak akan pernah mencapai kecepatan sinkron atau lebih. Hal ini disebabkan karena apabila kecepatan sinkron dan rotor sama, maka tidak ada arus yang terinduksi pada rotor sehingga tidak ada gaya yang terjadi pada rotor sesuai dengan hukum lorentz. Akibat tidak adanya gaya pada rotor maka rotor jadi melambat akibat gaya-gaya kecil (seperti gaya gesek



dengan sumbu rotor atau pengaruh udara). Namun saat rotor melambat kecepatan sinkron dan kecepatan rotor jadi berbeda. Akibatnya pada rotor akan terinduksi arus sehingga rotor mendapatkan gaya berdasarkan hukum lorentz. Dari gaya itulah motor dapat menambah kecepatannya kembali. Fenomena perbedaan kecepatan ini dikenal sebagai slip.

### 2.5.1 Tegangan dan Arus

Motor Induksi disuplai oleh sistem 3 fasa dimana Tegangan ketiga fasa tersebut berbeda sebesar  $120^0$  atau  $2\pi/3$  radian.

$$V_a = V_m \cos(\omega t) \dots\dots\dots(2.1)$$

$$V_b = V_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \dots\dots\dots(2.2)$$

$$V_c = V_m \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana  $V_a$  adalah arus fasa A dan  $V_b$  adalah fasa B dan  $V_c$  adalah fasa C,  $V_m$  adalah nilai puncak dari frekuensi fundamental dari masing fasa,  $\omega$  adalah frekuensi elektrik fundamental (rad/s). Karena perbedaan fasa simetris maka penjumlahan ketiga fasa adalah nol.

$$I_a + I_b + I_c = 0 \dots\dots\dots(2.4)$$

Arus juga berbeda fasa  $120^0$ :

$$I_a = I_m \cos(\omega t - \phi) \dots\dots\dots(2.5)$$

$$I_b = I_m \cos(\omega t - \phi - \frac{2\pi}{3}) \dots\dots\dots(2.6)$$

$$I_c = I_m \cos(\omega t - \phi + \frac{2\pi}{3}) \dots\dots\dots(2.7)$$

dimana  $I_a$  adalah arus fasa A dan  $I_b$  adalah fasa B dan  $I_c$  adalah fasa C,  $I_m$  adalah nilai puncak dari frekuensi fundamental dari masing arus fasa,  $\omega$  adalah frekuensi elektrik fundamental (rad/s),  $\phi$  adalah faktor daya lagging, dan  $t$  adalah waktu (s). Karena pergesern fasa yang simetris sebesar  $120^0$  penjumlahan ketiga fasa adalah nol.

### 2.5.2 Kecepatan Sinkron, Asinkron dan Slip

Kecepatan dari medan putar disebut kecepatan sinkron. Untuk motor induksi dengan  $p$  kutub, kecepatan sinkron dalam rpm adalah:

$$n_{sync} = \frac{120 f}{p} \dots\dots\dots(2.8)$$

Dimana f adalah frekuensi stator Hertz,  $n_{sync}$  adalah kecepatan sinkron. Karena rotor berputar pada kecepatan asinkron yang biasanya lebih lambat dari kecepatan sinkron. Perbedaan kecepatan disebut dengan kecepatan slip dimana:

$$n = n_{sync} - n_{async} \dots\dots\dots(2.9)$$

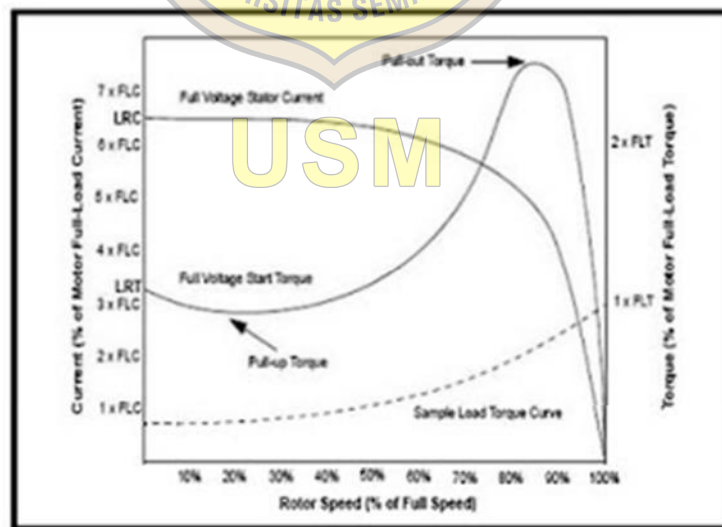
$n_{sync}$  adalah kecepatan rotor dalam rpm dan  $n_s$  adalah kecepatan slip. Kecepatan slip dapat di tulis sebagai s yaitu slip per unit :

$$s = \frac{n_{sync} - n_{async}}{n_{sync}} \dots\dots\dots(2.10)$$

Kecepatan sinkron tergantung pada frekuensi dari tegangan sumber dan jumlah kutub. Kecepatan asinkron atau kecepatan rotor tidak hanya tergantung pada frekuensi dan jumlah kutub tetapi juga terpengaruh pada torsi beban motor. Semakin tinggi torsi beban maka slip menjadi lebih tinggi dan kecepatan rotor menjadi lebih lambat (da Silva, 2006).

**2.6 Karakteristik Motor Induksi 3 phasa**

Hubungan antara beban, kecepatan dan torsi pada motor induksi 3 phasa dengan arus yang sudah ditetapkan dapat ditunjukkan kedalam satu gambar *torque-kecepatan* motor seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.10.



**Gambar 2. 10** Hubungan torque dan kecepatan motor induksi 3 phasa  
<http://www.habetec.com/news/54/Jenis-Jenis-Motor-AC-Arus-Bolak-Balik>

Pada grafik 2.1 Hubungan torque dan kecepatan diatas terdapat 3 kondisi yaitu :

- a. Bila motor mulai menyala ternyata terdapat arus start awal yang tinggi dan torsi yang rendah (pull-up torque).
- b. Bila motor mencapai 80% kecepatan penuh, torsi berada pada tingkat tertinggi (pull-out torque) dan arus mulai menurun.
- c. Bila motor pada kecepatan penuh atau kecepatan sinkron, arus torsi dan stator turun ke nol.

## 2.7 Kerusakan Pada Motor Induksi

Meskipun termasuk peralatan elektromekanis yang paling umum digunakan di industri karena memiliki tingkat kehandalan yang tinggi, bukan berarti motor induksi bebas dari gangguan dan kemungkinan kerusakan. Kerusakan yang sering terjadi di motor induksi dapat terletak pada bagian stator maupun rotornya. Faktor – faktor yang dapat menyebabkan sebuah motor bisa mengalami kerusakan, dapat berasal dari beberapa sebab seperti dari gerakan peralatan, jaringan suplai yang termasuk dalam sistem kerja motor maupun keadaan lingkungan sekitar seperti faktor suhu, tekanan, dan mekanis, yang mempengaruhi sebuah motor tidak dapat menjalankan fungsinya secara normal. Kerusakan akibat gerakan peralatan dapat disebabkan oleh kopel yang terlalu besar dan naik turun, serta pengasutan dan pengereman yang terlalu sering dan juga terlalu lama. Sedangkan jaringan suplai dapat menimbulkan kerusakan pada motor dikarenakan besar tegangan yang kurang cocok, yakni terlalu tinggi atau terlalu rendah, serta tegangan fasa yang tak seimbang bagi motor tiga fasa. Keadaan lingkungan sekitar pun menjadi salah satu penyebab yang sering ditemukan pada beberapa kasus kerusakan motor, antara lain akibat suhu lingkungan yang terlalu tinggi, kurangnya udara pendingin, serta pengaruh getaran – getaran.

Menurut survei dari *Electric Power Research Institute* (EPRI) yang mensurvei 6312 motor dan survei dari *Motor Reliability Working Group IEEEIAS* yang mensurvei 1141 motor, hasilnya seperti tabel 3.4 (I Gusti Putu Yudiastawan, 2009). Kerusakan bearing berdasarkan lokasinya dapat dikategorikan sebagai kerusakan inner-race dan outer-race. Penyebab utama dari kerusakan bearing adalah tercemarnya pelumas, hilangnya minyak pelumas, beban yang berlebih dan panas yang berlebih.

**Tabel 2. 3** Prosentase kerusakan berdasarkan komponen motor

FAILED COMPONENT	PERCENTAGE OF FAILURES (%)	
	IEEE-IAS	EPRI
BEARINGS RELATED	44	41
WINDINGS RELATED	26	36
ROTOR RELATED	8	9
OTHERS	22	14

Sumber : *Electric Power Research Institute (EPRI) dan Motor Reliability Working Group IEEEIAS*

Kerusakan pada belitan dapat terjadi akibat panas berlebih atau voltage stress, vibrasi mekanik, abrasi atau gesekan antara stator dan rotor. Lemahnya isolasi belitan dapat menyebabkan hubung singkat antar belitan ataupun belitan dengan ground. Ada dua tipe dari kerusakan rotor. Yang dihubungkan dengan rotor sendiri seperti retak atau patahnya rotor bar akibat panas berlebih, hot-spot atau fatigue stress saat operasi transien (start-up). Tipe kedua adalah yang berhubungan dengan *air-gap eccentricity*. *Air-gap eccentricity* adalah akibat permasalahan mekanik seperti beban tak seimbang atau *misalignment* poros. Beban tak seimbang yang berlangsung lama dapat mengakibatkan kerusakan bearing dan rumah bearing yang akan mempengaruhi simetrisnya air-gap. Shaft misalignment berarti misalignment arah horizontal, vertikal atau radial antara poros motor dan beban yang dikopel. Karena adanya misalignment rotor akan berubah posisi dari posisi normal akibat gaya radial yang konstan (I Gusti Putu Yudiastawan, 2009).

## 2.8 Deteksi Kerusakan Motor Induksi

Ada beberapa metode yang sudah digunakan untuk mendeteksi dan mendiagnosa kerusakan motor induksi. (Huang, 2005) mengelompokkan menjadi 5 yaitu:

### a) *Noise monitoring*

Spektrum sinyal akustik *noise* dari *air-gap eccentricity* digunakan untuk menganalisa kerusakan. Namun pengukuran noise ini secara praktek di lapangan tidak akurat karena banyaknya noise dari lingkungan tempat mesin berada.

b) *Torque monitoring*

Hampir semua kerusakan motor menyebabkan harmonisa dengan frekuensi tertentu dalam torsi airgap. Pada penelitian mengenai torsi airgap ini digunakan parameter tegangan terminal, data rotor, poros dan beban mekanik dari motor untuk menghitung torsi airgap. Metode ini berhasil digunakan untuk mendeteksi retak rotor bar, stator unbalance akibat kerusakan belitan. Meski demikian metode ini menjadi tidak cukup akurat ketika reaktansi magnetik bocor dan alur magnetik dari ketiga fasa menjadi tidak simetris.

c) *Flux monitoring*

Flux airgap dari motor induksi mengandung banyak harmonisa. Pengamatan terhadap flux memberikan informasi yang akurat mengenai kondisi mesin. Adanya perubahan pada airgap, belitan, tegangan dan arus tercermin dalam spektrum harmonisa. Fluks airgap diukur dengan menggunakan coil yang dipasang pada inti stator. Karena struktur tertutup dari motor induksi metode ini memerlukan pemutusan tegangan sumber untuk pemasangan sensor, sehingga sangat tidak praktis dan tidak ekonomis ketika motor sudah beroperasi terlebih dahulu. Karena airgap yang kecil pemasangan lilitan memerlukan modifikasi desain sehingga tidak mudah untuk diimplementasikan.

d) *Vibration monitoring*

Metode ini berhasil digunakan untuk mendeteksi kerusakan mekanik, karena kerusakan mekanik menciptakan harmonisa yang unik dengan frekuensi berbeda dan level daya dalam sinyal vibrasi. Sinyal vibrasi diukur dengan menggunakan sensor vibrasi yang dipasang pada frame stator dan spektrum yang dihitung dengan *Fast Fourier Transform* (FFT). Harmonisa spesifik diamati untuk menentukan kerusakan apa yang terjadi. Kelemahan utama dari metode ini adalah beayanya. Sensor vibrasi khususnya accelerometer harganya mahal.

e) *Current monitoring*

Metode ini paling ekonomis dibanding metode yang lain. Pada aplikasi yang umum arus stator dari motor sudah diukur untuk proteksi mesin terhadap

arus lebih, arus ke tanah yang sangat merusak. Sehingga current monitoring dilakukan tanpa perlu peralatan tambahan. Ada tiga metode yang sudah digunakan yaitu *Park's vector*, *zero-sequence* dan *negative sequence* dan *Current Spectral Analysis*. Dari ketiga metode monitoring arus *Current Spectral Analysis* atau sering disebut *Current Signature Analysis (CSA)* adalah yang paling banyak dipakai.

*Fast Fourier Transform (FFT)* adalah metode yang biasanya digunakan dalam aplikasi praktis untuk *Current Signature Analysis (CSA)*. Sangat banyak penelitian dilakukan dengan metode *FFT*. Menacer (2004) menggunakan *current signature analysis* dengan *FFT* untuk menganalisa kerusakan *rotor bar*. Menacer (2004) memodelkan motor induksi secara matematis dengan menghitung induktansi dari rotor dan stator yang kemudian memodelkan motor induksi dengan model *Mesh*. Model secara matematis tersebut disimulasikan dengan program Matlab. Metode ini mampu mengenali kerusakan rotor bar dengan baik. Simulasi untuk aplikasi di dunia industri sangat tidak cocok karena terkadang data-data motor seperti nilai resistansi, induktansi dan data material motor sulit untuk diketahui dan harus melakukan pengukuran tersendiri yang tentunya tidak praktis dari segi waktu dan biaya.

Szabò, Dobai dan Birò (2003) membuat instrumentasi maya untuk mendeteksi kerusakan rotor. Instrumentasi maya yang digunakan adalah software Labview dengan analisa sinyal arus dengan *FFT*. Penelitian mengenai deteksi kerusakan motor induksi dengan instrumentasi maya juga dilakukan oleh Pillay dan Xu (1996). Thomson dan Fenger (2001) melakukan studi kasus terhadap berbagai motor yang digunakan dalam industri menggunakan alat ukur CSMeter yaitu instrumen khusus dari Iris Power Engineering untuk analisa arus (CSA) dengan *FFT* dan mampu mendeteksi kerusakan *rotor bar*, *airgap eccentricity*, pengaruh dari gearbox. Penrose (2003) juga menggunakan CSA dengan *FFT* untuk mendeteksi berbagai kerusakan pada motor induksi dengan alat ukur berbeda yaitu ALL-TEST PRO 2000 dan EMCAT.

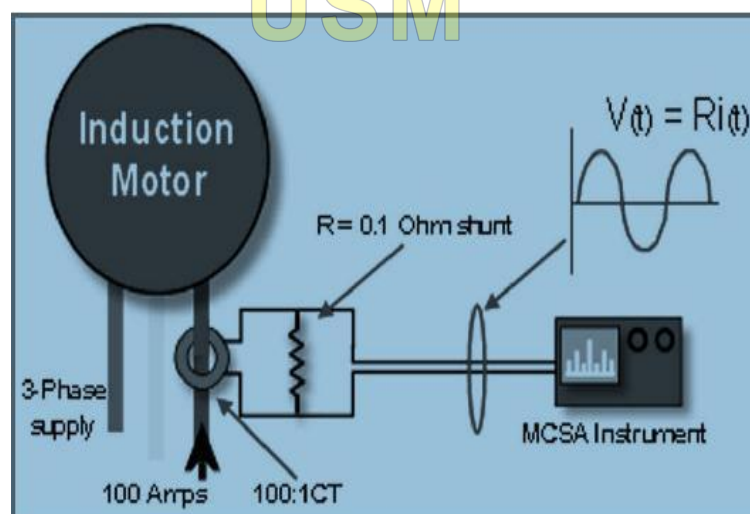
Berbagai metode analisa sinyal selain *FFT* juga banyak digunakan untuk *current signature analysis* untuk studi kasus tertentu. Ayhan (2005) mendeteksi patahnya rotor bar dengan menggunakan CSA dengan *Notch filter*, *Discrete time*



*fourrier transform* (DTFT) dan *Auto Regressive based spectrum*. Supangat (2004) menggunakan CSA dengan Continuous Wavelet Transform (CWT) untuk menganalisa arus mula dari motor induksi untuk mendeteksi kerusakan pada rotor bar. Önel, Dalci dan Senol (2005) menggunakan *Radial Basis Function Neural Network* untuk mendeteksi kerusakan bearing dimana metode CSA yang dipakai adalah *Park's transform*. Metode kecerdasan buatan secara praktik di industri belum banyak dipakai karena banyaknya parameter yang dipakai dan dengan hardware yang berkembang sekarang belum cukup cepat dan praktis (I Gusti Putu Yudiastawan,2009).

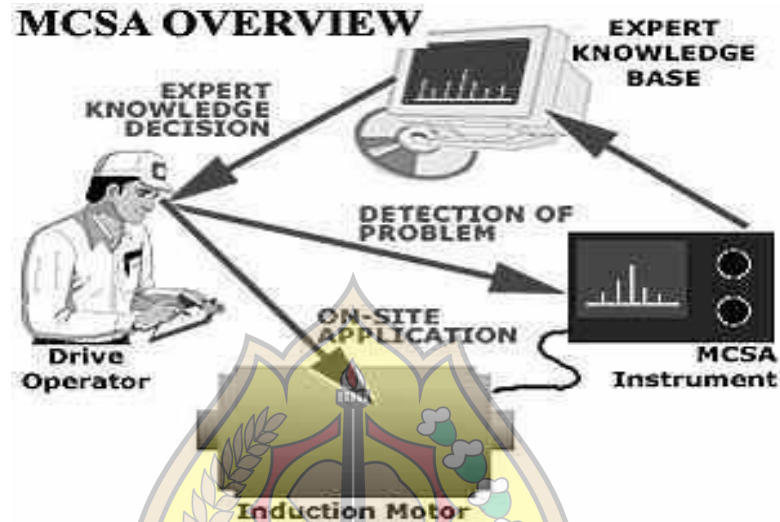
## 2.9 MCSA (Motor Current Signature Analysis)

Motor Current Signature Analysis (MCSA) telah terbukti sebagai peranti perawatan yang prediktif dan berharga. Meskipun tergolong teknologi yang masih muda, metode ini semakin berkembang pesat dan dapat diterima di banyak lini industri saat ini. Kegagalan mekanik yang berhubungan dengan sekrap, sabuk, stator, dan rotor, serta seluruh elemen mesin yang membutuhkan keselarasan, lebih mudah ditemukan melalui penggunaan spektrum saat didemodulasi pada MCSA. Teknik MCSA dapat digunakan bersama dengan analisa vibrasi dan analisa yang berkenaan dengan Thermography untuk mengkonfirmasi keputusan diagnostik mesin. MCSA digunakan pada prinsip bahwa motor induksi dalam keadaan operasi, pada pokoknya dipandang sebagai suatu transducer. Dengan clamping sensor arus *Hall effect* baik pada sirkuit primer maupun sirkuit sekunder, fluktuasi arus didalam motor dapat diamati.



**Gambar 2. 11** Dasar Sistem Instrumentasi MCSA  
Sumber : [http://www.mcsamotor.com/mcsa\\_frame.asp](http://www.mcsamotor.com/mcsa_frame.asp)

Pada gambar 2.11 diatas menunjukkan prosedur MCSA yaitu pengambilan arus dari winding stator menggunakan sensor dari current transformator dalam probe MCSA kemudian data dianalisa dan disimpan di *ATPOL II* dalam bentuk sinyal, apabila terjadi gangguan maka dianalisa lagi menggunakan software *ALL Test Pro 6.5*. Berikut bagan proses pengambilan data MCSA sesuai gambar 2.12.



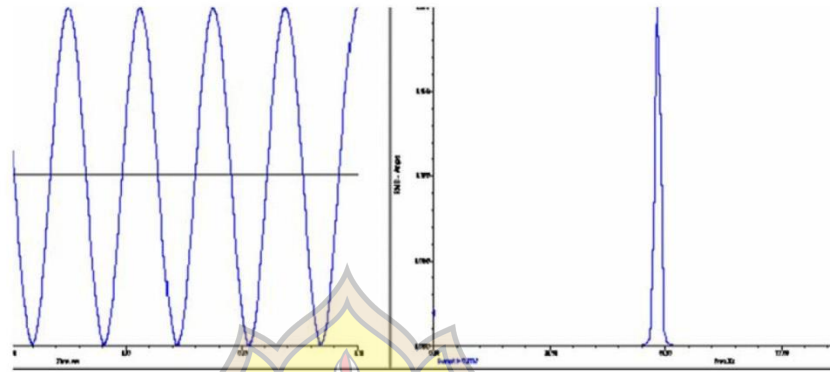
**Gambar 2. 12** Overall MCSA Strategy

Sumber : [http://www.mcsamotor.com/mcsa\\_frame.asp](http://www.mcsamotor.com/mcsa_frame.asp)

MCSA merupakan proses dimana pembacaan arus motor dicatat dan dianalisis dalam domain frekuensi. Metode tersebut menyatakan bahwa adanya perbedaan yang signifikan pada spektrum harmonisa antara arus stator motor induksi dalam keadaan normal atau sehat dan pada kondisi rusak. Metode ini telah ada sejak tahun 1985 dan telah terpercaya selama bertahun – tahun dalam menemukan kesalahan rotor dan masalah celah udara (air gap) di motor. Selain itu, beberapa kondisi lain yang mampu dideteksi dengan menggunakan MCSA antara lain Analisa sesuai hasil MCSA akan membantu teknisi dalam mengidentifikasi :

1. Kondisi lilitan incoming
2. Kondisi gulungan stator
3. Kondisirotor
4. Air gap static dan dynamic eccentricity
5. Kondisi coupling, termasuk belt sistem dan gear sistem
6. Kondisi Pembebanan
7. sistem dan effisiensi beban
8. Kesehatan bearing

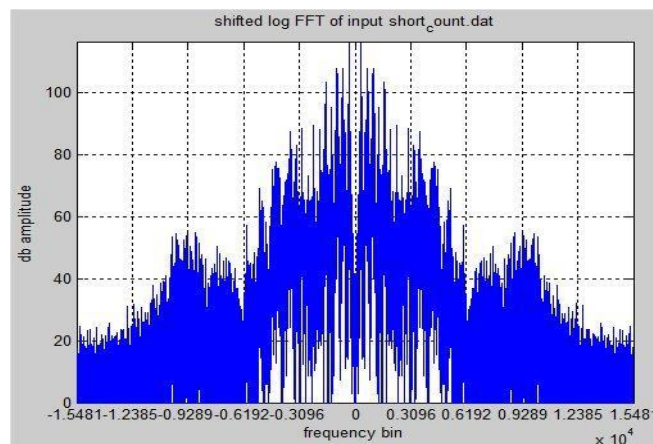
Suatu sinyal arus motor idealnya suatu gelombang sinusoidal sempurna pada 50Hz. Dengan gambar, kita dapat menghadirkan arus dalam kaitan dengan waktu seperti halnya frekuensi. Pada gambar 2.13 menampilkan gambar yang pertama (gambar 2.13 a) yaitu hubungan arus dan waktu, sedangkan gambar kedua (gambar 2.13 b) menampilkan hubungan arus dan frekuensi.



(a). Hubungan arus dan waktu (b). Hubungan arus dan frekuensi

**Gambar 2. 13** Sinyal 50 Hz dalam domain time dan frequency

Amplitudo dari puncak frekuensi adalah sama dengan RMS amplitudo dari gelombang sinus. Ini adalah suatu teoritis dengan tidak adanya suatu harmonisa, kita dapat melihat hanya ada satu puncak dalam spektrum frekuensi. Konversi arus dari waktu ke daerah frekuensi dicapai dengan menggunakan algoritma *Fast Fourier Transform (FFT)*. Selama motor beroperasi, akan banyak sinyal harmonisa hadir di motor. Suatu sinyal akan menunjukkan banyak peak yang mencakup line frekuensi dan harmonisanya. Hal inilah yang dikenal dengan sebagai *motors current signature*. Penelitian harmonisa ini setelah pengaruh amplifikasi dan kondisi sinyal akan memungkinkan identifikasi berbagai kesalahan pada motor.



**Gambar 2. 14** *Fast Fourier Transform (FFT)*

Pada tahun 1960, J. W. Cooley dan J. W. Tukey, berhasil merumuskan suatu teknik perhitungan algoritma *Fourier Transform* yang efisien. Teknik perhitungan algoritma ini dikenal dengan sebutan Fast Fourier Transform atau lebih populer dengan istilah *FFT* yang diperkenalkan oleh J.S.Bendat dan A.G.Piersol pada 1986. *Fast Fourier Transform* dalam bahasa Indonesia adalah Transformasi Fourier Cepat adalah sumber dari suatu algoritma untuk menghitung *Discrete Fourier Transform* (transformasi Fourier diskrit atau DFT) dengan cepat. *Fast Fourier Transform (FFT)* diterapkan dalam beragam bidang dari pengolahan sinyal digital dan memecahkan persamaan *diferensial parsial* menjadi algoritma-algoritma untuk penggandaan bilangan integer dalam jumlah banyak. Ada pun kelas dasar dari algoritma *FFT* yaitu *decimation in time (DIT)* dan *decimation in frequency (DIF)*. Garis besar dari kata *Fast* diartikan karena formulasi *FFT* jauh lebih cepat dibandingkan dengan metode perhitungan algoritma *Fourier Transform*.

Metode *FFT* memerlukan sekitar 10000 operasi algoritma matematika untuk data dengan 1000 observasi, 100 kali lebih cepat dibandingkan dengan metode sebelumnya. Penemuan *FFT* dan perkembangan personal komputer, teknik *FFT* dalam proses analisa data menjadi populer, dan merupakan salah satu metode baku dalam analisa data. Satu bentuk transformasi yang umum digunakan untuk merubah sinyal dari domain waktu ke domain frekuensi adalah *Transformasi Fourier*.  
Persamaan dari bentuk sinyal  $x(t)$  :

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt$$

Persamaan.....(2.11)

*FFT* dalam pengolahan isyarat meliputi Periode dan frekuensi:

#### 1. Periode

Secara umum periode didefinisikan sebagai waktu yang dibutuhkan untuk sebuah isyarat atau gelombang mencapai suatu gelombang penuh dan dapat menentukan nilai periodesitasnya. Perlu dicermati bahwa pengertian ini berlaku untuk isyarat monokromatis, isyarat yang dimaksud adalah gelombangnya bersifat tunggal, pasti memiliki sebuah periode. Dengan demikian isyarat itu dikenal

dengan istilah priodis, pengamatan dapat dilakukan dengan memantau gelombang kita dapat mengetahui nilai nilai yang terkandung dalam isyarat serta periodenya.

## 2.Frekuensi

Ada periode, maka ada frekuensi diartikan sebagai jumlah gelombang yang terjadi dalam 1 detik. Frekuensi didefinisikan secara sederhana sebagai kebalikan dari waktu. Sehingga waktu yang satuannya adalah detik (second) akan menjadi Hertz (1- per second) hanya akan memiliki tepat satu nilai spektrum. Yang dikenal dengan spektrum frekuensi. Pengertian frekuensi ini juga berlaku untuk gelombang monokromatis.

### 2.9.1 Analisa Rotor

Salah satu yang utama kegunaan *Motor Current Signature Analysis (MCSA)* adalah analisa rotor. *Broken rotor bar*, *static eccentricity* dan *dynamic eccentricity* adalah tiga jenis dasar issue motor yang dapat dianalisa dengan menggunakan metode MCSA. *Broken rotor bar* biasanya ditemukan ketika slip frekuensi sidebands disekitar line frekuensi. Standar peraturan dari pengalaman adalah kesalahan itu dideteksi ketika sidebands ini ditemukan melebihi -35db atau sering dikenal sebagai “35db menurun”.

*Sideband* yang ditemukan pada analisa rotor ini dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan:

$$F_{\text{sideband}} = (F_{\text{synchronous speed}} - F_{\text{running speed}}) \times \text{poles} \dots \dots \dots (2.12)$$

$$F_{\text{running speed}} = \frac{\text{Rotary per minute}}{60 \text{ second/min}} \dots \dots \dots (2.13)$$

$$F_{\text{slip}} = \frac{2 \times \text{Line Frequency}}{\text{poles}} \dots \dots \dots (2.14)$$

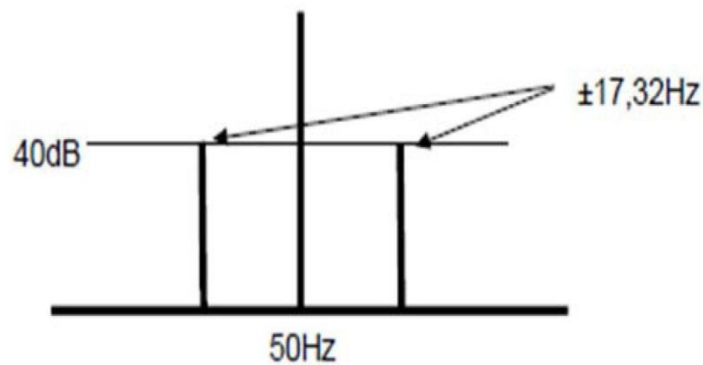
Dengan :

*Fsideband* = Frekuensi sideband yang timbul (Hz)

*Fsynchronous speed* = Frekuensi slip motor

*Frunning speed* = Frekuensi motor per detik selama motor beroperasi (Hz)

*Poles* = jumlah kutub pada motor induksi



**Gambar 2. 15** Broken rotor bar pada low frequency

Jika frekuensi sideband yang sebesar  $\pm 17.32$  Hz seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.15 tersebut muncul pada puncak line frekuensi 50 Hz pada *algoritma Fast Fourier Transform (FFT)* dan bernilai  $-40$  db maka dapat ditentukan bahwa motor tersebut teridentifikasi adanya kerusakan rotor bar (*rotor bar broken*).

**Tabel 2. 4** Rotor bar damage severity level chart

Condition	dB Value	Rotor Condition	Action
1	>60	Excellent	None
2	54-60	Good	None
3	48-54	Moderate	Trend
4	42-48	Rotor Fracture or High Resistance Joint	Increase Test Intervals and Trend
5	36-42	Two or more bars cracked or broken	Confirm with motor circuit analysis
6	30-36	Multiple cracked or broken bars and end ring problems	Overhaul
7	<30	Multiple broken rotor bars and other severe rotor problems	Overhaul or Replace

Sumber : ALL-TEST PRO® On-Line Series Desk Guide and Pattern Recognition Manual 2nd Edition

### 2.9.2 Analisa Static Eccentricity

*Static eccentricity* dapat ditemukan didalam spektrum frekuensi tinggi seperti pada gambar 2.16 *Static Eccentricity* terjadi jika pusat frekuensi (*Center frekuensi / CF*) tidaklah mencapai puncak didalam spektrum tetapi disusun sebagai hasil perkalian antara *running frekuensi (RF)* dengan jumlah *rotor bar (RB)* pada motor



induksi. Persamaan yang digunakan untuk menghitung terjadinya static eccentricity adalah sebagai berikut :

$$F_{static\ eccentricity} = (RB \times RF) \pm (N \times LF) \dots \dots \dots (2.15)$$

$$F_{running\ speed} = \frac{Rotary\ per\ minute}{60\ second/min} \dots \dots \dots (2.16)$$

Dengan :

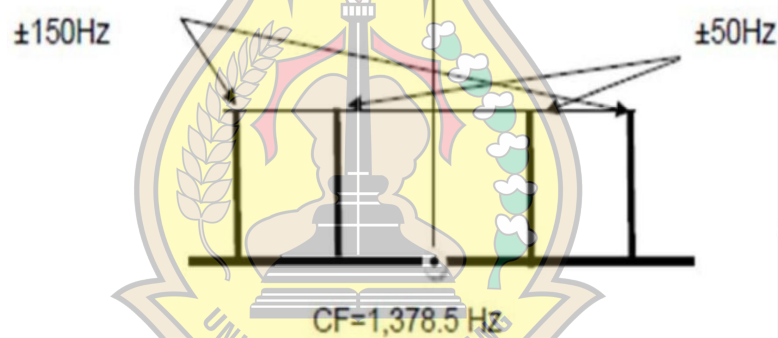
$F_{static\ eccentricity}$  = frekuensi sideband timbul akibat adanya eccentricity Hz)

$RF$  (*Running speed*) = frekuensi motor per detik selama motor beroperasi (Hz)

$RB$  (*Rotor Bar*) = jumlah rotor bar pada motor induksi

$LF$  (*Line frekuensi*) = frekuensi dasar (50 Hz)

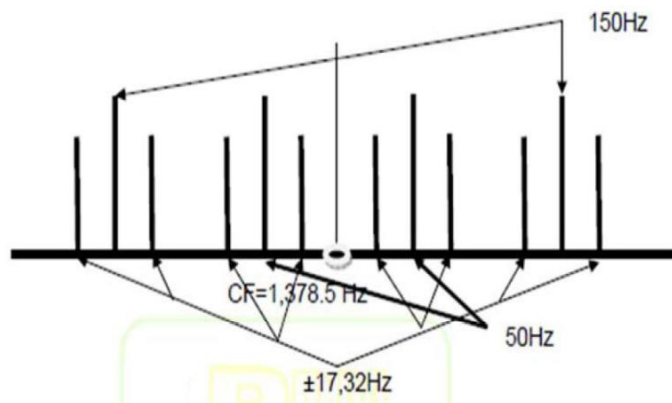
$N$  = bilangan bulat integer



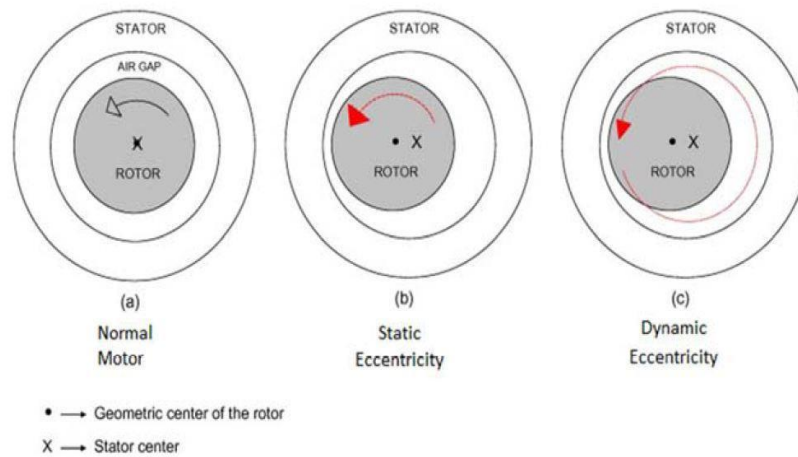
Gambar 2. 16 *Static Eccentricity* pada *high frequency*

### 2.9.3 Analisa Dynamic Eccentricity

*Dynamic Eccentricity* berbeda dengan *static eccentricity*, pada keadaan *dynamic eccentricity* akan ada juga *running speed sideband* disekitar *static eccentricity sideband* dari frekuensi dasar seperti pada gambar 2.17.



Gambar 2. 17 *Dynamic Eccentricity* dengan sidebandnya



**Gambar 2. 18** Pola Eccentricity pada rotor dan stator

**2.9.4 Analisa Stator**

Permasalahan stator winding ditemukan dengan mengidentifikasi *stator slot passing frequencies (SP)*. *Center frekuensi (CF)* pada analisa stator dapat ditentukan dengan perkalian banyaknya slot stator dengan *running speed*. Permasalahan ditemukan ketika sideband nampak disekitar *slot passing (SP)* pada *center frekuensi (CF)*.

$$F_{stator\ slot} = (RF \times Stator\ slot) \dots \dots \dots (2.17)$$

$$F_{runningspeed} = \frac{Rotary\ per\ minute}{60\ second/min} \dots \dots \dots (2.18)$$

Dengan :

F<sub>stator slot</sub> = frekuensi sideband yang muncul akibat stator

S<sub>tator slot</sub> = banyaknya slot stator pada winding motor induksi

RF (F<sub>running speed</sub>) = frekuensi motor per detik selama motor beroperasi (Hz)

RF (F<sub>running speed</sub>) = frekuensi motor per detik selama motor beroperasi (Hz)

Apabila *center frekuensi (CF)* mempunyai sideband yang muncul pada line frekuensinya maka adanya indikasi kerusakan pada mekanik stator (*mechanical stator*), sedangkan bila sideband muncul pada *running speed*nya maka terindikasi adanya penurunan atau degradasi pada elektrik stator (*stator electrical*).

**2.9.5 Analisa Bearing**

Untuk menganalisa kerusakan sebuah bearing pada motor induksi dengan metode *MCSA*, terlebih dahulu kita harus memperoleh data bearing pada pabrikan

yang sesuai dengan ukuran kemudian memperoleh jenis bearing yang mana dapat diperoleh dari cataog pabrik atau secara langsung melalui MCSA perangkat lunak ATPOL'S. Jenis ini sudah dilengkapi dengan :

1. *Ball pass Outer Race* (BPOR)
2. *Ball pass Inner Race* (BPIR)
3. *2x Ball spin Frequency* (2x BSF)
4. *Cage Frequency* (FTF)

Frekuensi bearing ditemukan seperti masing-masing running frekuensi dengan line frekuensi sideband. Harmonisa untuk frekuensi bearing dapat ditemukan oleh perkalian masing-masing frekuensi bearing yaitu bilangan bulat dengan *line frekuensi* (LF) dengan sideband disekelilingnya.

$$F_{bearing} = (BPOR \times RF \times N) \pm Lf \dots\dots\dots (2.19)$$

$$F_{runningspeed} = \frac{Rotary \text{ per minute}}{60 \text{ second/min}} \dots\dots\dots (2.20)$$

Dengan :

F bearing = frekuensi sideband yang muncul pada masing-masing bearing (Hz)

BPOR = Ball pass Outer Race

RF (Frunning speed) = frekuensi motor per detik selama motor beroperasi (Hz)

LF (Line frekuensi) = frekuensi dasar (50 Hz)

N = bilangan bulat integer

**2.9.6 Analisa Arus tidak seimbang (*Unbalance current*)**

*Unbalance current* ditemukan dengan menggunakan rumus yang ada di bawah ini, presentase arus tidak seimbang di peroleh dari I maksimum di kurang I rata-rata dimana I rata rata di peroleh dari penjumlahan arus R,S,T kemudian di bagi tiga maka di peroleh I rata rata kemudian di bagi I rata rata dan di kali 100 % maka hasilnya prosentase arus tidak seimbang akan di peroleh.

$$\% \text{ Unbalance} = \frac{I_{Maximum \ deviation} - I_{Average}}{I_{Average}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.21)$$

$$\% \text{ Unbalance} = \frac{I_{Tertinggi} - I_{rata-rata}}{I_{rata-rata}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.22)$$

**2.9.7 Analisa Mechanical Unbalance**

Mechanical unbalance ditemukan dengan menentukan perkalian antara jumlah rotor bar dengan running frekuensi seperti pada static eccentricity dan dynamic eccentricity.

$$F_{\text{mechanical Unbalance}} = (RB \times RF) \pm (N \times Lf) \dots\dots\dots (2.23)$$

$$F_{\text{runningspeed}} = \frac{\text{Rotary per minute}}{60 \text{ second/min}} \dots\dots\dots (2.24)$$

Dimana :

Fstatic eccentricity= frekuensi sideband timbul akibat adanya eccentricity (Hz)

RF (Frunning speed) = frekuensi motor per detik selama motor beroperasi (Hz)

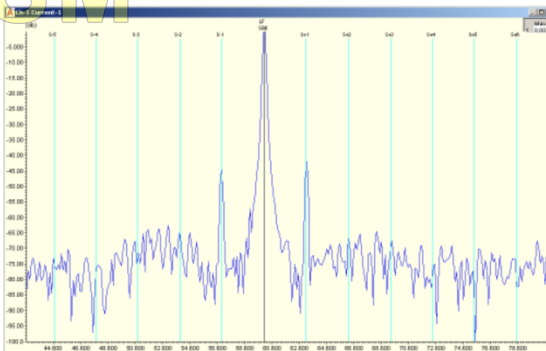
RB (Rotor Bar) = jumlah rotor bar pada motor induksi

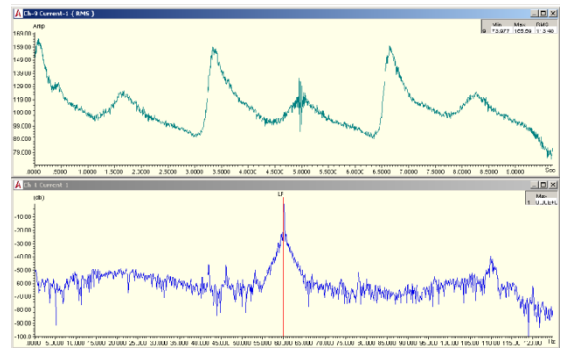
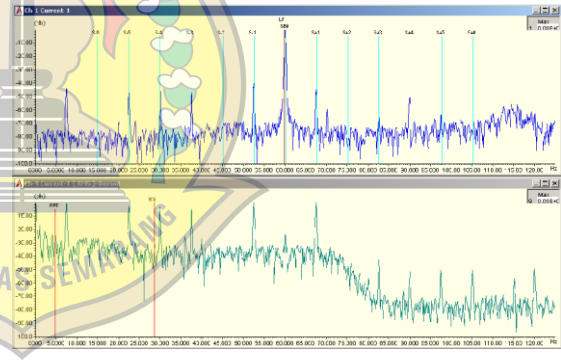
LF (Line frekuensi) = frekuensi dasar (50 Hz)

N = bilangan bulat integer

Akan ada line frekuensi (LF) disekitar center frekuensi (CF) yang diikuti dengan empat kali line frekuensi (LF), kemudian dua kali line frekuensi (LF) peak. Didalam sistem 50 Hz, pola ini akan nampak ketika pada 100 Hz, 200 Hz dan 100 Hz.

**Tabel 2. 5 Pola Spektrum Gangguan Motor AC**

FAULT	DESCRIPTION	Sample Pattern
Rotor Bars	PPF mencapai puncaknya Frekuensi Baris dalam Arus. Konfirmasi dengan MCA	

<p>External Looseness such as bad gear teeth</p>	<p>Peningkatan Noise Floor di sekitar frekuensi jalur</p>	
<p>Good Results</p>	<p>Beberapa Puncak di Tinggi Frekuensi dan Rendah Spektrum frekuensi</p>	
<p>Rotor Rub</p>	<p>PPF Sideband dalam arus rekuensi Rendah dan puncak kecepatan lari tinggi dengan sideband PPF dengan harmonisa. Konfirmasikan eksentrisitas dengan MCA</p>	
<p>Mechanical Unbalance</p>	<p>Kecepatan lari dikali batang rotor dengan pita frekuensi garis, jarak 4 kali frekuensi garis, lalu dua kali frekuensi garis. Biasanya kecepatan lari tinggi juga disertai puncak dalam frekuensi rendah</p>	

<p>Static Eccentricity</p>	<p>Kecepatan lari dikalikan dengan batang rotor dengan frekuensi garis dan dua kali pita frekuensi garis.</p> <p>Konfirmasi dengan MCA</p>	
<p>Dynamic Eccentricity</p>	<p>Kecepatan lari dikalikan dengan batang rotor dengan frekuensi garis dan dua kali pita frekuensi garis</p>	
<p>Stator Electrical</p>	<p>Slot waktu kecepatan lari stator dengan garis frekuensi sidebands yang kemudian memiliki sideband kecepatan lari.</p> <p>Konfirmasi dengan MCA</p>	
<p>Stator Mechanical</p>	<p>Menjalankan slot waktu kecepatan stator dengan sidebands frekuensi garis. Lantai kebisingan yang meningkat juga menunjukkan tahap kelonggaran selanjutnya.</p> <p>Uji dengan MCA</p>	

Sumber : Sumber : ALL-TEST PRO® On-Line Series Desk Guide and Pattern Recognition Manual 2nd Edition

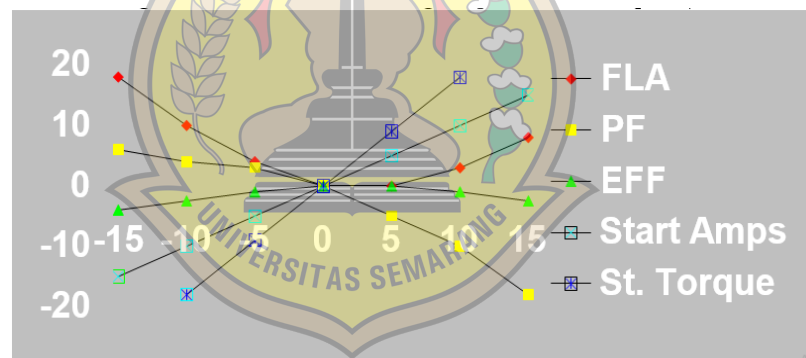


### 2.9.8 Kualitas Daya dan Analisis Kelistrikan

Kualitas daya melibatkan kondisi daya yang disuplai ke sistem motor. Dalam dunia yang sempurna, daya suplai akan memiliki tegangan dan gelombang sinus yang seimbang sempurna. Namun, jarang, jika pernah, Anda akan menemukan sistem 'sempurna'. Kualitas daya, sendirian, akan dibahas lebih mendalam dalam panduan berikut. Kami akan membahas masalah yang lebih umum yang memenuhi persyaratan panduan ini di sini.

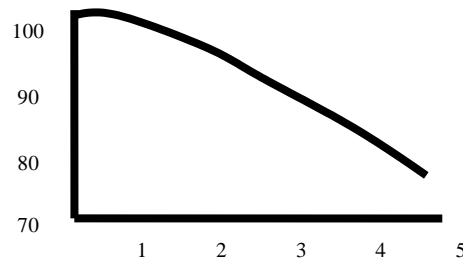
Masalah dan batasan kualitas daya yang paling umum adalah:

1. Kualitas tegangan: Dalam sistem motor listrik ada dua masalah utama dengan tegangan: Tegangan berlebih atau di bawah atau penyimpangan tegangan dari papan nama. Batas tegangan suplai kembali  $\pm 10\%$  dari tegangan pelat nama dengan  $\pm 5\%$  menjadi optimal. Penyimpangan dari papan nama akan menghasilkan perubahan pada karakteristik operasi motor seperti yang diidentifikasi pada gambar dibawah



**Gambar 2.19** *Over and Under Voltage Impact on Motor Operation*

Ketidakseimbangan tegangan, yang menyebabkan arus tidak seimbang pada motor yang mengakibatkan belitan terlalu panas. Hubungan antara tegangan dan ketidakseimbangan arus dapat beberapa kali lipat lebih dari 20 kali, tergantung pada ukuran motor dan desain belitan. Akibatnya, mengidentifikasi ketidakseimbangan tegangan memiliki lebih banyak dampak daripada mengidentifikasi ketidakseimbangan arus, sendirian. Batasnya adalah 5% dengan 2% menjadi optimal. Pemanasan yang meningkat dari belitan motor membutuhkan penurunan peringkat dari beban motor seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.20.



**Gambar 2. 20** Voltage Unbalance (Derating Facto)

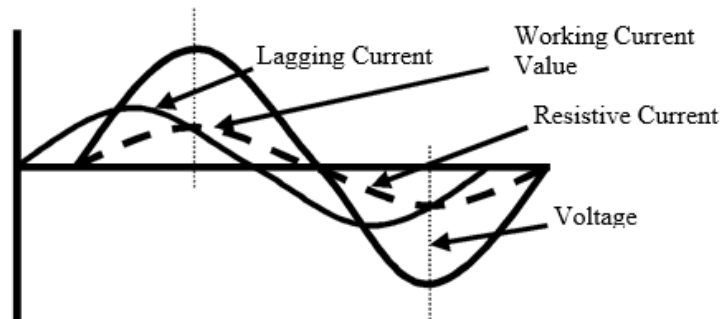
2. Distorsi harmonik adalah bidang lain yang menjadi perhatian dan biasanya disebabkan oleh sistem switching elektronik yang menyebabkan medan berputar, negatif dan positif dalam motor. Sistem fase tunggal, seperti komputer dan ballast lighting elektronik, menyebabkan netral, atau ketiga, harmonisa yang menghasilkan arus netral dan pemanasan transformator. Harmoni kelima dan ketujuh adalah disebabkan oleh sistem tiga fase, seperti drive frekuensi variabel, dan menyebabkan stator motor dan pemanasan rotor. Untuk standar VTHD yang diperbolehkan diatur sesuai dengan *Point of Common Coupling* (PCC) dimana tiap tingkatan tegangan memiliki standar yang berbeda-beda, begitu pula dengan ITHD yang diatur dengan standar yang berbeda-beda sesuai PCC dan perhitungan rasio hubung singkatnya. Standar VTHD IEEE 519-1992. Berdasarkan IEEE standard 519-1992 tentang nilai batas maksimum distorsi harmonisa tegangan pada sistem dapat dilihat pada Tabel

**Tabel 2. 6** Voltage & Current Distorion Limits

Load	> 75%
Current Deviation	< 5%
THDF	97,5% > X < 105%
Voltage Deviation	< 5%
VDF	> 75%
Crest Factor (CF)	1,35 > X < 1,45
Power Factor (PF)	> 0,85%

3. Faktor daya ditunjukkan, dalam sirkuit induktif, seperti bagaimana arus puncak tertinggal di belakang tegangan puncak. Hasilnya adalah persyaratan

arus tambahan untuk beban yang sama dengan arus yang jauh di belakang tegangan. Yang optimal adalah faktor '1,' namun, di sebagian besar sistem faktor daya 0,85 dianggap OK.



**Gambar 2. 21** Power Factor

Adapun alat atau teknologi yang digunakan dalam metode MCSA yaitu :

1. ALL-Test Pro II

All-Test Pro II dapat secara akurat mengukur dan mengumpulkan sinyal dari *system* atau peralatan. All-Test Pro II dapat menambah kemampuan *predictive maintenance* dengan mengidentifikasi kesalahan sebelum kerusakan terjadi. All-Test Pro II juga telah maju untuk analisis alat, kesalahan frekuensi untuk mengidentifikasi sumber dalam spectrum getaran. All-Test Pro II secara otomatis. Untuk MCSA alat ini digunakan sebagai penampil gelombang dari *probe* MCSA dan pengukuran vibrasi.



**Gambar 2. 22** Alat All-TEST Pro II

2. Klem atau prob Arus 1 - 1000 Amp



**Gambar 2. 23** Probe Arus

### 3. Klem Atau Probe Tegangan



**Gambar 2. 24** Klem atau Probe Tegangan  
Sumber : PT Indonesia Power PGU Semarang

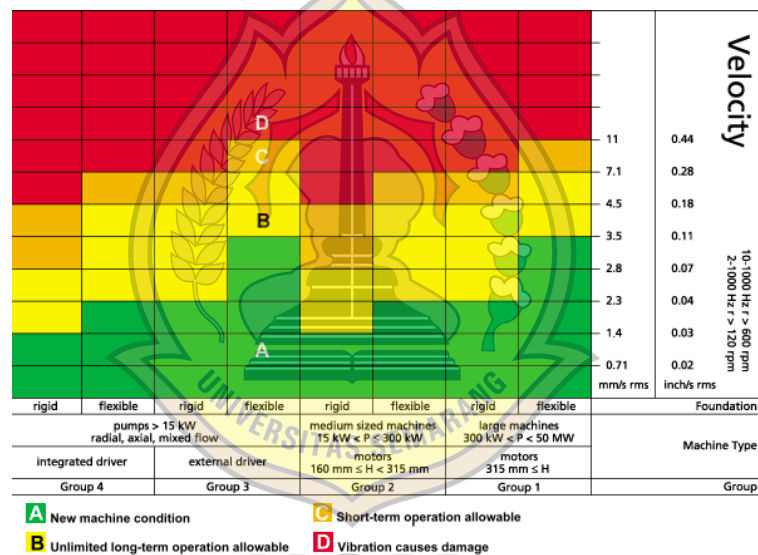
#### 2.10 Analisa Vibrasi

Vibrasi adalah gerakan bolak-balik dari komponen mekanik dari suatu mesin sebagai reaksi dari adanya gaya dalam (gaya yang dihasilkan oleh mesin tersebut) maupun gaya luar (gaya yang berasal dari luar atau sekitar mesin). Kalo kita melihat studi Kasus yang paling dominan dalam getaran permesinan adalah getaran yang disebabkan oleh gaya eksitasi getaran yang berasal dari mesin tersebut. Terdapat tiga parameter utama dalam pengukuran vibrasi terhadap sebuah mesin, yaitu : *displacement* (jarak), *velocity* (kecepatan) dan *acceleration* (percepatan) yang harus diperhatikan sebelum menganalisa penyebab terjadinya vibrasi yang tidak normal. Pada umumnya semakin tinggi

amplitudo vibrasi semakin buruk kondisi mesin. Tetapi harus dipertimbangkan bahwa :

- Terdapat berbagai macam tipe mesin.
- Mesin beroperasi pada berbagai macam kondisi.
- Mesin mempunyai tingkat kekritisan yang berbeda-beda tergantung dari plant yang bersangkutan.
- Mesin tersusun dari berbagai macam tipe komponen

Untuk alasan-alasan tersebut maka sangat sulit untuk membuat garis batas di mana mesin mengalami kegagalan. Ada beberapa standar untuk tingkat severity vibrasi, gambar 2.25 merupakan standar ISO **10816-3** Velocity yang dipakai untuk tingkat severity vibrasi mesin yang ada di PT Indonesia Power Semarang PGU.



**Gambar 2. 25** Standar ISO Vibrasi 10816-3

Sumber : International Organization for Standardization

## 2.11 Analisa Thermography

Infrared Thermography adalah suatu sistem pemeriksaan NDT (*Non Destructive Test*) dengan menggunakan Kamera Inframerah untuk memeriksa peralatan listrik (*Electrical*), dan mekanik (*Mechanical*) pada pabrik-pabrik, industri pertambangan, gedung bertingkat, supermall, rumah sakit, bandara, pelabuhan, dan fasilitas umum lainnya. Dengan memonitor suhu /temperatur pada saat peralatan beroperasi kemudian dibandingkan dengan suhu operasi normalnya, maka akan dapat dianalisa/dideteksi ada tidaknya penyimpangan (*overheating*) yang umumnya merupakan gejala awal suatu kerusakan peralatan.



Standar yang digunakan untuk menganalisa gambar termal adalah standar yang dikeluarkan dari EPRI (*Electric Power Research Institute*) sebuah tim yang melakukan penelitian tentang industri tenaga listrik di Amerika Serikat

<b>Standard of Thermography Inspection</b>					
<b>Differential Temp</b> <b>Max Temp</b>	<b>&lt; 5°C</b>	<b>5°C – 10°C</b>	<b>11°C – 20°C</b>	<b>21°C – 40°C</b>	<b>&gt;40°C</b>
<b>&lt; 75°C</b>	<b>Normal</b>	<b>Low</b>	<b>Medium</b>	<b>High</b>	<b>Critical</b>
<b>75°C – 100°C</b>	<b>Information of overloading</b>	<b>Medium</b>	<b>High</b>	<b>Critical</b>	<b>Critical</b>
<b>&gt;100°C</b>	<b>Information of high overloading</b>	<b>Critical</b>	<b>Critical</b>	<b>Critical</b>	<b>Critical</b>

**Gambar 2. 26** Standard Thermography Inspection

Sumber :Maulana H.Alief, Aribowo Didik, Inawati. 2013. Analisa Kondisi Generator Transformer Menggunakan Metode Thermography

