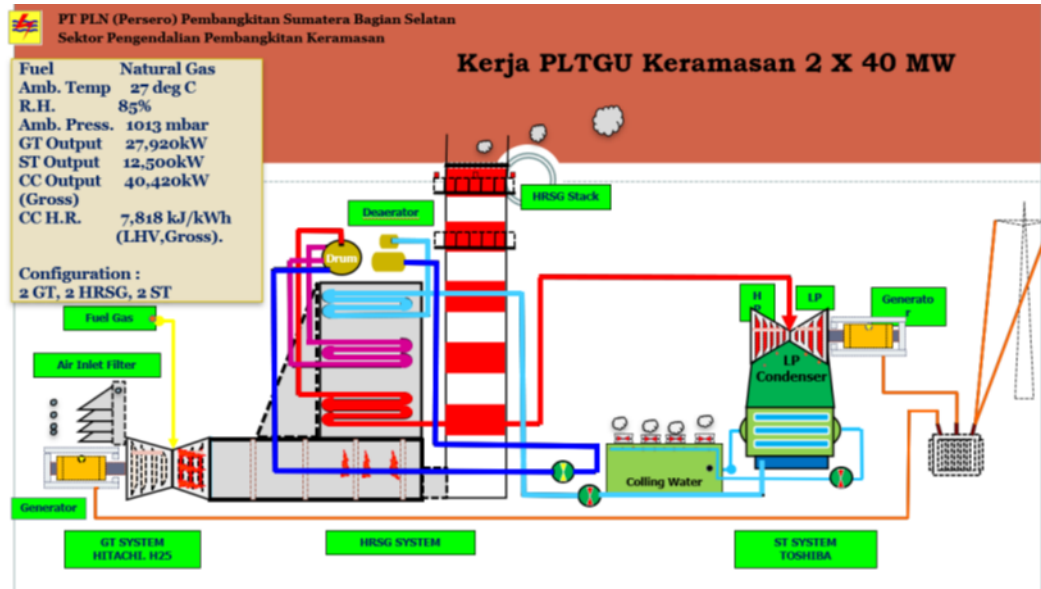


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Siklus PLTGU PT PLN (Persero) UPDK Leramasan



Gambar 2.1 Siklus Kerja PLTGU PT PLN (Persero) UPDK Keramasan

Pada siklus kerja PLTGU PT PLN (Persero) UPDK Keramasan hal pertama yang dilakukan adalah menjalankan *prime mover* sebagai penggerak awal turbin gas dan kompresor. Kompresor berfungsi untuk memampatkan udara dari luar menjadi udara yang bertekanan tinggi, gas alam (*fuel gas*) dibakar diruang bakar bersama-sama dengan udara yang bertekanan tinggi. Udara untuk pembakaran diperoleh dari kompresor utama, sedangkan panas untuk awal pembakaran dihasilkan oleh busi. Didalam sistem turbin gas, gas panas hasil pembakaran bahan bakar dihasilkan untuk memutar turbin gas sehingga menghasilkan energi mekanik yang digunakan untuk memutar generator.

Gas buang dari turbin gas yang masih mengandung energi panas tinggi sekitar 500°C dialirkan ke HRSG (*heat recovery steam generator*) untuk memanaskan air sehingga menghasilkan uap. Setelah melakukan pemanasan pada HRSG, gas buang dilepaskan ke atmosfer dengan temperature yang jauh lebih rendah, keluar menuju saluran buang (*exhaust*) dan selanjutnya ke HRSG *stack*.

Uap dari HRSG menghasilkan dua jenis yaitu uap kering dan uap basah, uap basah maksudnya adalah uap air hasil pemanasan di HRSG yang masih



mengandung air, uap basah ini di pompa menuju dearator untuk menghilangkan kandungan oksigen dan zat-zat terlarut agar bisa dipakai kembali untuk pemanasan dan pendinginan pada *cooling tower*. Uap kering yang bertekanan tinggi hasil pemanasan air dialirkan menuju HP Turbin (*High-Pressure Turbine*) lalu ke LP Turbin (*Low-Pressure Turbine*) untuk memutar generator. Uap kering bekas memutar turbin tersebut didinginkan melalui kondensor untuk digunakan kembali pada siklus PLTGU. Turbin adalah sebuah mesin berputar yang mengambil energi dari aliran fluida. Turbin sederhana memiliki satu bagian yang bergerak, assembly rotor-blade. Fluida yang bergerak menjadikan baling-baling berputar dan menghasilkan energi untuk menggerakkan rotor.

Proses pembangkitan listrik pada PLTGU dibagi menjadi dua macam, yaitu Proses Pembangkitan Listrik Tenaga Gas (PLTG) dan proses pembangkitan listrik tenaga uap (PLTU). Berikut komponen beserta sistem-sistem yang terdapat pada PLTG maupun PLTU yang dicombined pada PLTGU.

2.2. Proses Pembangkitan Listrik Tenaga Gas

Starting motor yang seporos dengan turbin gas, generator, dan kompresor berputar sehingga kompresor menghisap udara. Selanjutnya, udara kompresi tersebut bercampur dengan bahan bakar dan dikabutkan dengan bantuan *nozzle* menuju ruang bakar. Lalu, dengan bantuan percikan api dari igniter, terjadilah pembakaran yang menghasilkan aliran gas panas dengan tekanan dan temperatur tinggi. Aliran gas panas ini memutar turbin hingga putaran 3000 rpm (*rated speed*) sehingga generator akan menghasilkan listrik.

Komponen Pendukung Siklus *Brayton* pada PLTG (Pembangkit Listrik Tenaga Gas):

1. *Transfer pump*, pompa yang berfungsi untuk memindahkan fluida yang berupa HSD oil dari tank menuju ruang bakar.
2. *Kompresor*, mengambil udara atmosfer dan merubahnya menjadi udara bertekanan tinggi untuk membantu proses pembakaran di ruang bakar. Kompresor terdiri dari intake air filter, *Inlet Guide Van (IGV)*, sudu-sudu tetap dan sudu-sudu jalan yang berjumlah 19 *stages*. Adapun fungsinya untuk menarik



udara luar masuk ke ruang bakar sebagai proses pembakaran dan media pendingin.

3. *Combustion Chamber*, ruang bakar yang berfungsi sebagai tempat pembakaran bahan bakar pada system turbin gas.
4. *Turbine*, gas turbin yang berfungsi untuk mengekspansi gas panas hingga menghasilkan energi mekanis untuk menggerakkan generator.
5. Generator, berfungsi untuk menghasilkan energi listrik.

2.2.1. Gas Turbin

Turbin gas adalah suatu penggerak mula yang memanfaatkan gas sebagai fluida kerja. Didalam turbin gas energi kinetik dikonversikan menjadi energi mekanik berupa putaran yang menggerakkan roda turbin sehingga menghasilkan daya. Bagian turbin yang berputar disebut rotor atau roda turbin dan bagian turbin yang diam disebut stator atau rumah turbin. Rotor memutar poros daya yang menggerakkan beban (generator listrik, pompa, kompresor atau yang lainnya). Turbin gas merupakan salah satu komponen dari suatu sistem turbin gas. Sistem turbin gas yang paling sederhana terdiri dari tiga komponen yaitu kompresor, ruang bakar dan turbin gas.

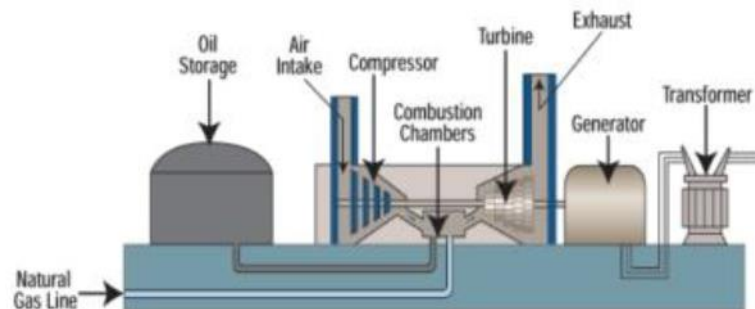
Turbin gas merupakan Pesawat kalori yang tergolong dalam *Internal Combustion Engine* (ICE) atau sering disebut dengan mesin pembakar didalam. Berbeda dengan prinsip PLTU dimana pembakaran terjadi diluar mesin atau *External Combustion Engine* (ECE). Sebagai sumber energi turbin gas adalah fluida gas yang diperoleh darigas hasil pembakaran bahan bakar diruang bakar (*Combustion Chambers*). Bahan bakar yang digunakan untuk turbin gas antar lain bahan bakar cair (*Distilate*) seperti HSD atau IDO juga dapat digunakan gas bumi atau gas alam (LNG = *Lequid Natural Gas*).

Turbin gas tersusun atas komponen-komponen utama *seperti air inlet section, compressor section, combustion section, turbine section, dan exhaust section*. Berikut ini penjelasan tentang komponen utama turbin gas:

1. *Air Inlet Section*, berfungsi untuk menyaring kotoran dan debu yang terbawa dalam udara sebelum masuk ke kompresor.

2. *Compressor Section*, Komponen utama pada bagian ini adalah *aksial flow compressor*, berfungsi untuk mengkompresikan udara yang berasal dari *inlet air section* hingga bertekanan tinggi sehingga pada saat terjadi pembakaran dapat menghasilkan gas panas berkecepatan tinggi yang dapat menimbulkan daya output turbin yang besar.
3. *Combustion Section*, Pada bagian ini terjadi proses pembakaran antara bahan bakar dengan fluida kerja yang berupa udara bertekanan tinggi dan bersuhu tinggi.
4. *Turbin Section*, merupakan tempat terjadinya konversi energi kinetik menjadi energi mekanik yang digunakan sebagai penggerak *compresor aksial* dan perlengkapan lainnya.
5. *Exhaust Section*, adalah bagian akhir turbin gas yang berfungsi sebagai saluran pembuangan gas panas sisa yang keluar dari turbin gas.

Fluida kerja untuk memutar turbin gas adalah gas panas yang diperoleh dari proses pembakaran. Proses pembakaran memerlukan tiga unsur utama yaitu bahan bakar, udara dan panas. Skema proses pembangkitan generator turbin gas (GTG) dapat dilihat pada gambar 2.2 di bawah ini:



Gambar 2.2 Skema Proses Pembangkitan Generator Turbin Gas

Udara masuk ke dalam kompresor melalui saluran masuk udara (*Air Intake*). Kompresor berfungsi untuk menghisap dan menaikkan tekanan udara tersebut, sehingga temperatur udara juga meningkat. Kemudian udara bertekanan ini masuk ke dalam ruang bakar (*Combustion Chamber*). Di dalam ruang bakar dilakukan proses pembakaran dengan cara mencampurkan udara bertekanan dan bahan bakar. Dalam proses pembakaran ini bahan bakar disuplai oleh pompa bahan bakar (*Fuel Oil pump*) apabila digunakan bahan bakar minyak, atau oleh kompresor gas apabila



menggunakan bahan bakar gas alam. Pada umumnya kompresor gas disediakan oleh pemasok gas tersebut.

Proses pembakaran tersebut berlangsung dalam keadaan tekanan konstan sehingga dapat dikatakan ruang bakar hanya untuk menaikkan temperatur. Gas hasil pembakaran tersebut dialirkan ke turbin gas melalui suatu *nozel* yang berfungsi untuk mengarahkan aliran tersebut ke sudu-sudu turbin. Daya yang dihasilkan oleh turbin gas tersebut digunakan untuk memutar kompresornya sendiri dan memutar beban lainnya seperti generator listrik. Setelah melewati turbin ini gas tersebut akan dibuang keluar melalui saluran buang (*exhaust*).

System Pendukung Gas Turbin:

1. *Starting System*

Starting System di dalam turbin gas digunakan sebagai penggerak mula, hal ini diperlukan karena pada saat start kondisi turbin masih belum mampu menggerakkan generator dan kompresor dikarenakan belum terjadinya pembakaran.

2. *Coupling dan Accessory Gear*

Berfungsi untuk memindahkan daya dan putaran dari poros yang bergerak ke poros yang akan digerakkan.

3. *Hydroulic System* (Sistem Hidraulik)

4. Sistem hidraulik digunakan untuk menggerakkan *Main Stop Valve*. Dimana *Main Stop Valve* berfungsi untuk menghentikan laju aliran bahan bakar minyak saat unit terjadi gangguan dan atau untuk membuka saluran bahan bakar pada sistem pemipaan bahan bakar. Mekanisme pengoperasian (membuka dan menutup) *Main Stop Valve* diperlukan *hydroulic system* dengan minyak bertekanan, dimana suplai minyak hidraulik diambil dari *pipping system* pelumas turbin gas.

5. *Fuel Oil System* (Sistem Bahan Bakar)

HSD Oil (*High Speed Diesel*) digunakan sebagai bahan bakar pada sistem pembakaran pada PLTGU ini. Sistem pembakaran tersebut dimulai dari tangki penampungan (*HSD Oil Tank*) yang dipompa menggunakan *Transfer Pump* dengan melalui *flowmeter* untuk perhitungan pemakaiannya.



6. *Lube Oil System* (Sistem Pelumasan)

Sistem pelumasan berfungsi untuk melakukan pelumasan secara kontinu pada setiap komponen sistem turbin gas. *Lube oil* disirkulasikan pada bagian-bagian utama turbin gas dan *bearing* juga untuk *accessory gear* dan yang lainnya. Hal ini bertujuan agar *start up* gaya geser (*friction force*) yang terjadi diantara *metal bearing* dengan poros turbin gas dan generator dapat dikurangi. Setelah turbin gas mulai *start* dan putaran mulai naik sampai putaran nominalnya, maka *supply* minyak pelumasan diambil alih dari AOP ke *Main Lube Oil Pump* (MOP). Dimana, *Main Lube Oil Pump* ini diputar melalui hubungan antara *Accessories gear* atau *Load gear* dengan poros turbin.

Lube oil system terdiri dari:

- 1) *Oil Tank (Lube Oil Reservoir)*
- 2) *Oil Quantity*
- 3) Pompa
- 4) *Filter System*
- 5) *Valving System*
- 6) *Piping System*
- 7) Instrumen untuk oil

Pada turbin gas terdapat tiga buah pompa yang digunakan untuk mensuplai *lube oil* guna keperluan lubrikasi, yaitu:

- 1) ***Main Lube Oil Pump***, merupakan pompa utama yang digerakkan oleh HP *shaft* pada *gear box* yang mengatur tekanan *discharge lube oil*.
- 2) ***Auxiliary Lube Oil Pump***, merupakan pompa *lube oil* yang digerakkan oleh tenaga listrik, beroperasi apabila tekanan dari *main pump* turun.
- 3) ***Emergency Lube Oil Pump***, merupakan pompa yang beroperasi jika kedua pompa diatas tidak mampu menyediakan *lube oil*.

7. *Cooling System* (Sistem Pendingin)

Tingginya temperatur minyak pelumas setelah digunakan melumasi bearing turbin dan bearing generator akan masuk ke *lube oil cooler* untuk didinginkan oleh sistem pendingin minyak pelumas dengan media pendinginnya adalah air dan udara. Udara dipakai untuk mendinginkan berbagai komponen pada *section*



dan *bearing*. Setelah digunakan sebagai media pendingin minyak pelumas, air tadi akan berubah menjadi bertemperatur tinggi kemudian akan didinginkan di dalam ACWC (*Air Cooler Water Cooler*) yang sistemnya mirip dengan radiator.

2.3. Proses Pembangkitan Listrik Tenaga Uap

Gas bekas yang keluar dari turbin gas dimanfaatkan lagi setelah terlebih dahulu diatur oleh *exhaust damper* untuk dimasukkan ke dalam ketel (HRSG). Uap yang dihasilkan digunakan untuk memutar turbin uap agar menghasilkan tenaga listrik pada generator. Uap bekas dari turbin uap tadi diembunkan lagi ke kondensor kemudian kondensat dipompa ke dalam deaerator oleh CEP (*Condensate Extraction Pump*) dan dipompa lagi oleh BFP (*Boiler Feed Water Pump*) ke dalam drum untuk kembali diuapkan.

Hasil dari listrik yang keluar dari masing-masing generator akan dikuatkan ke transformator masing-masing yang seterusnya dialirkan melalui tiang transmisi ke switch yard dan kemudian dikirim ke gardu induk melalui transmisi tegangan tinggi dan tegangan rendah.

PLTU menggunakan siklus tertutup (*closed cycle*) sehingga fluida dapat digunakan kembali untuk proses berikutnya. Siklus PLTU meliputi siklus *Rankine* yang desainnya dapat berupa *superheating*, *regenerating*, dan *reheating*.

Komponen utama yang menunjang pembangkitan listrik tenaga uap pada PLTGU yaitu:

- 1) Condenser.
- 2) CEP (*Condensate Extraction Pump*).
- 3) Deaerator.
- 4) BFP (*Boiler Feedwater Pump*).
- 5) *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG).
- 6) LP *Circulation Pump* (LP BCP).
- 7) HP *Circulation Pump* (HP BCP).
- 8) *Steam Turbine* (Turbin Uap).
- 9) Generator

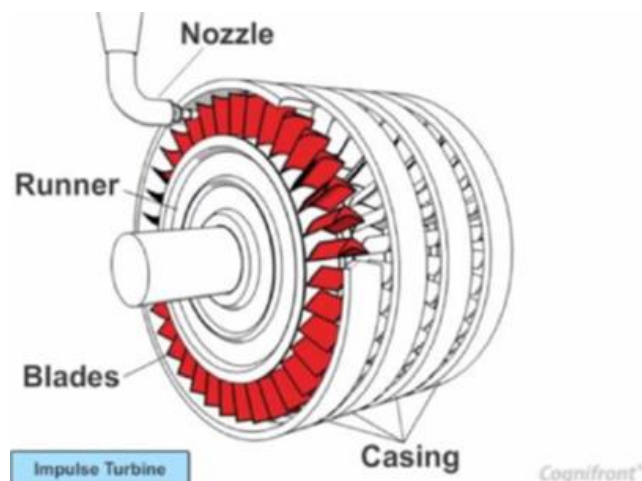
Adapun peralatan pendukung sistem turbin uap ini adalah:

- 1) Sistem Minyak Pelumas Turbin Uap
- 2) Sistem Pendingin Minyak Pelumas
- 3) Sistem Hidrolik
- 4) Sistem Pendingin Siklus Tertutup
- 5) Sistem *Common Water Plant*

2.3.1. *Steam Turbin*

Steam turbin/turbin uap adalah komponen konversi energi utama dalam sebuah pembangkit listrik tenaga uap dan tenaga gas dan uap. Turbin uap berfungsi untuk mengubah energi panas dari uap menjadi energi mekanik (putaran) sebagai penggerak generator untuk menghasilkan energi listrik, dalam konstruksinya turbin uap langsung terkopel dengan generator sehingga disebut *steam turbine generator*. Jika dibandingkan dengan penggerak generator listrik yang lain, turbin uap mempunyai kelebihan antara lain:

- a. Penggunaan panas yang lebih baik.
- b. Pengontrolan putaran yang mudah.
- b. Tidak menghasilkan loncatan bunga api listrik.
- c. Uap bekas dapat digunakan kembali untuk proses.



Gambar 2.3 Komponen-komponen Utama Sistem *Steam Turbin*

Secara umum komponen-komponen utama dari sebuah turbin uap adalah :

1. *Casing* Turbin, *Casing* atau *shell* adalah suatu wadah menyerupai sebuah tabung dimana rotor ditempatkan.



2. Rotor Turbin, Rotor adalah bagian dari turbin yang berputar akibat pengaruh gerakan uap terhadap sudu-sudu gerak.
3. Sudu Turbin.
4. Nosel, suatu laluan yang mampu mengubah energi potensial uap menjadi energi kinetik yang luas penampangnya bervariasi.

2.4. Motor Listrik

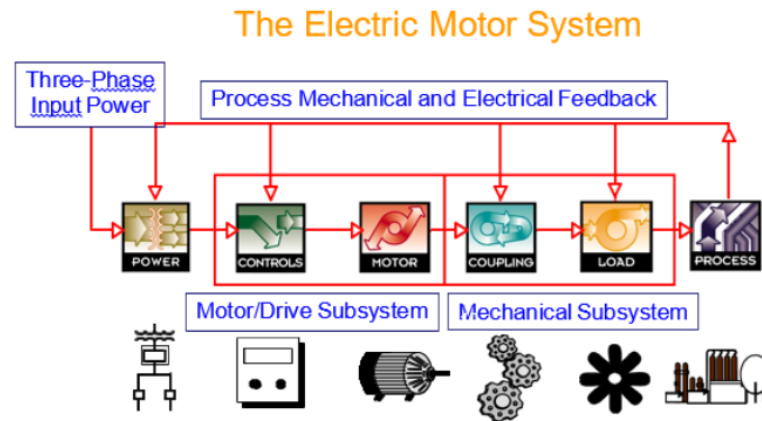
Motor listrik adalah mesin listrik yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Sebagian besar motor listrik beroperasi melalui interaksi antara medan magnet motor dan arus listrik dalam lilitan kawat untuk menghasilkan gaya dalam bentuk torsi yang diterapkan pada poros motor.

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 fasa tunggal, dua fasa, atau tiga fasa), dan dapat berupa berpendingin udara atau berpendingin cairan.

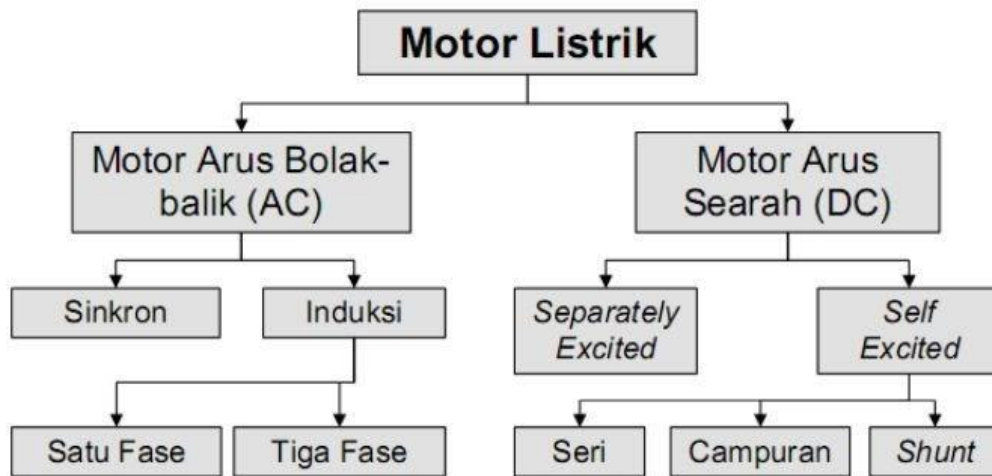
Motor serba guna dengan dimensi dan karakteristik standar menyediakan tenaga mekanis yang nyaman untuk penggunaan industri. Motor listrik terbesar digunakan untuk penggerak kapal, kompresi pipa, dan aplikasi penyimpanan yang dipompa dengan rating mencapai 100 megawatt.

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 2.4 Sistem Motor Listrik

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 nyaman 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.



Gambar 2.5 Klasifikasi motor listrik

2.5. Motor Induksi

Motor induksi adalah motor yang arus medannya berasal dari induksi elektromagnetik yang mana induksi elektromagnetik tersebut dihasilkan oleh sumber 3 fasa yang dihubungkan pada kumparan stator, sehingga tidak memerlukan sumber DC untuk bisa menjalankan motor Motor ini bekerja pada kecepatan konstan dari nol sampai beban penuh Kecepatannya sangat tergantung pada frekuensi sehingga motor ini mudah untuk dikemudikan secara elektris.

- Arus rotor motor induksi bukan diperoleh dari sumber tertentu.
- Arus pada rotor terinduksi akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dan medan putar pada stator.

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, *over voltage* 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.

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.

Motor induksi dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok utama sebagai berikut:

1) Motor induksi satu fasa.

Motor ini hanya memiliki satu gulungan stator, beroperasi dengan pasokan daya satu fasa, 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 fasa.

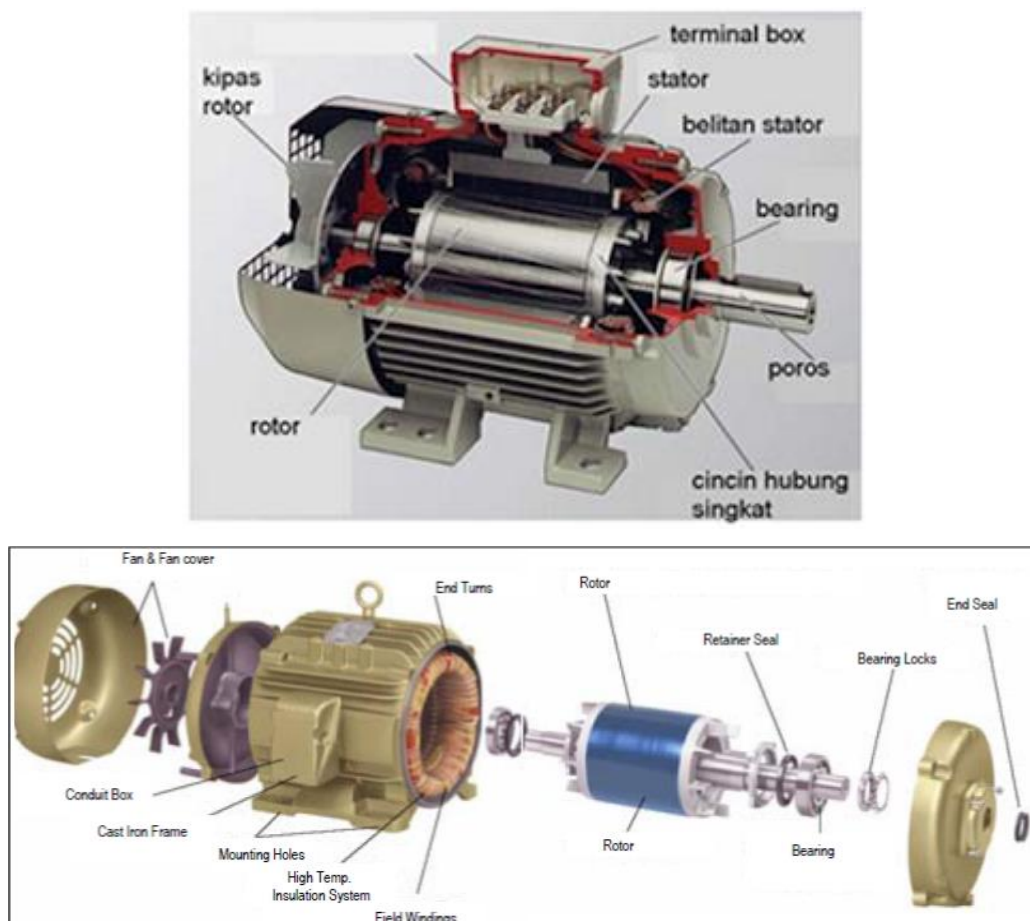
Medan magnet yang berputar dihasilkan oleh pasokan tiga fasa yang seimbang. Motor tersebut memiliki kemampuan daya yang tinggi, dapat memiliki kandang tupai atau gulungan rotor (walaupun 90% memiliki rotor kandang tupai); dan penyalaan sendiri.

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.

2.5.1. 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 blek-blek dinamo yang berisolasi pada satu sisinya dan mempunyai ketebalan 0,35-0,5mm, disusun menjadi sebuah paket blek 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 2.6 Konstruksi Motor Induksi



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.

2.5.2. 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.

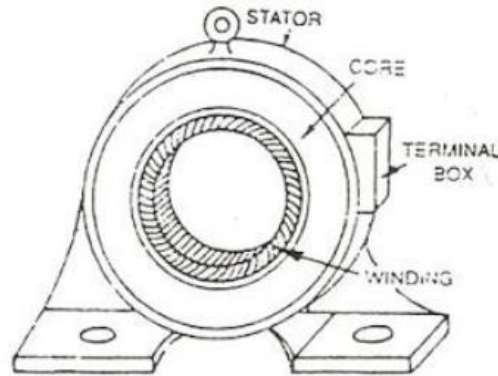
Jika kumparan stator mendapatkan suplai arus tiga fasa maka pada kumparan tersebut akan timbul flux magnet putar. Karena adanya flux magnet putar pada kumparan stator, mengakibatkan rotor berputar karena adanya induksi magnet dengan kecepatan putar rotor sinkron dengan kecepatan putar stator.

Konstruksi pada stator:

- Dibuat dari pelat pelat tipis dengan slot
- Belitan ditempatkan pada slot
- Gulungan tiga fasa dilingkarkan untuk sejumlah kutub tertentu
- Gulungan diberi spasi geometri sebesar 120° antar fasa



Bentuk konstruksi stator motor induksi dapat kita lihat pada gambar 2.6 di bawah ini:



Gambar 2.7 Kontruksi Stator

Komponen Stator

1) Rangka (*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 terbuat dari lempeng lempeng baja silikon berlaminasi. Fungsi utamanya adalah untuk membawa medan magnet bolak-balik yang menghasilkan histeresis dan kerugian arus eddy, untuk memperkecil rugi rugi besi akibat arus pusar. 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.

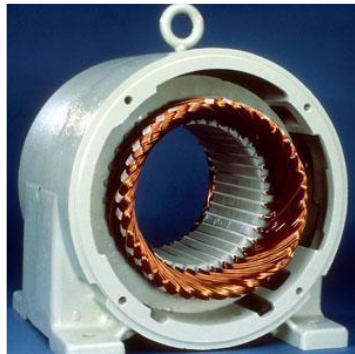


Gambar 2.8 Inti stator



3) Kumparan gulungan / *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.



Gambar 2.9 Kumparan / Gulungan

4) Pelat Penutup

2.5.3. Rotor (bagian motor yang bergerak)

Komponen-komponen Rotor:

- Inti besi rotor,
- Kumparan batang penghantar,
- Cincin, dan
- Poros (*shaft*).

Fungsi rotor yaitu mengubah daya dari stator menjadi tenaga mekanik. 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. Dalam praktek rotor tidak pernah berputar pada kecepatan sinkron.

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

$$\text{Slip (\%)} = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100\%$$

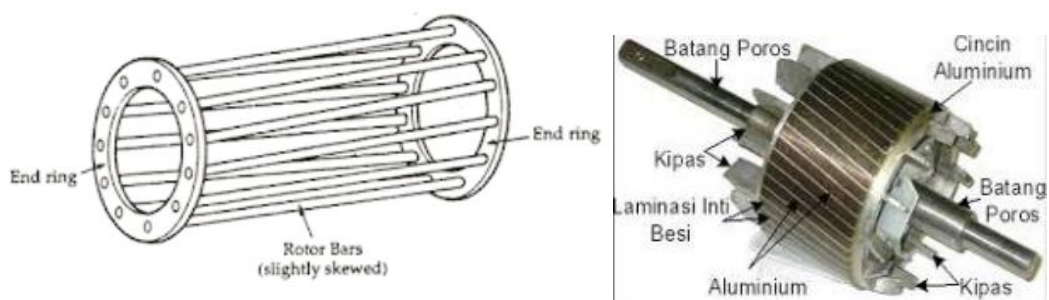
N_s = Kecepatan sinkron (rpm)

N_r = Kecepatan putaran rotor (rpm)

Terdapat dua tipe rotor, yaitu:

1) 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 dihubung singkatkan 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 2.9. 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.

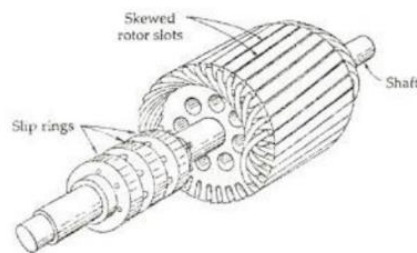


Gambar 2.10 Bentuk rotor sangkar

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.

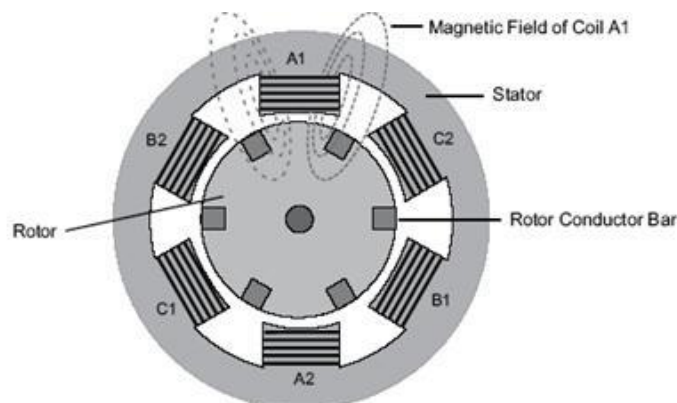
2) Rotor belitan



Gambar 2.11 Bentuk Rotor Belit

- Konduktor yang digunakan adalah belitan
- Belitan terhubung ke cincin geser yang dipasang pada shaft
- Belitan terhubung ke resistor melalui sikat karbon

2.6. Prinsip Kerja Motor Induksi



Gambar 2.12 Prinsip kerja motor



- Prinsip kerja motor induksi mirip trafo.
- rangkaian primer (stator) dan sekunder (rotor) tidak satu inti.
- rangkain sekunder berputar.
- Listrik dipasok ke sator sehingga menghasilkan medan magnet yang berputar dengan kecepatan sinkron.
- Pada rangkaian rotor timbul arus segingga timbul kopel.
- Rotor berputar searah putaran medan stator.

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 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.

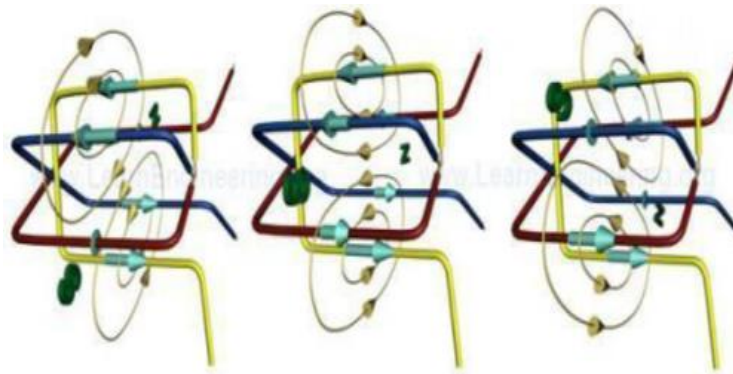


Gambar 2.13 Arus pada kabel menghasilkan fluks

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 2.14 Gambar Medan magnet berputar

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



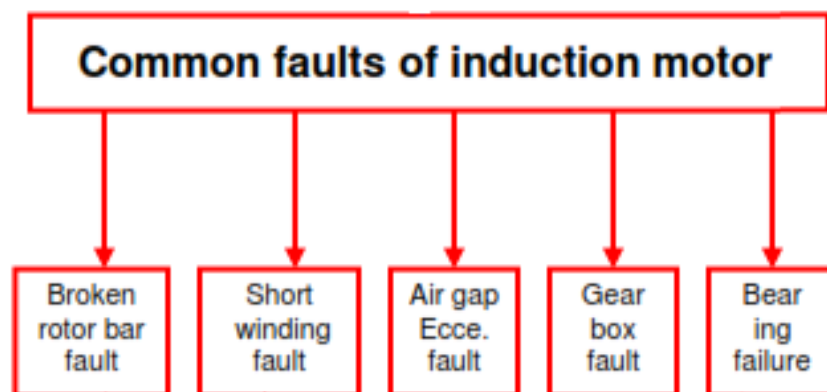
gaya berdasarkan hukum lorentz. Dari gaya itulah motor dapat menambah kecepatannya kembali. Fenomena perbedaan kecepatan ini dikenal sebagai slip.

2.7. 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.

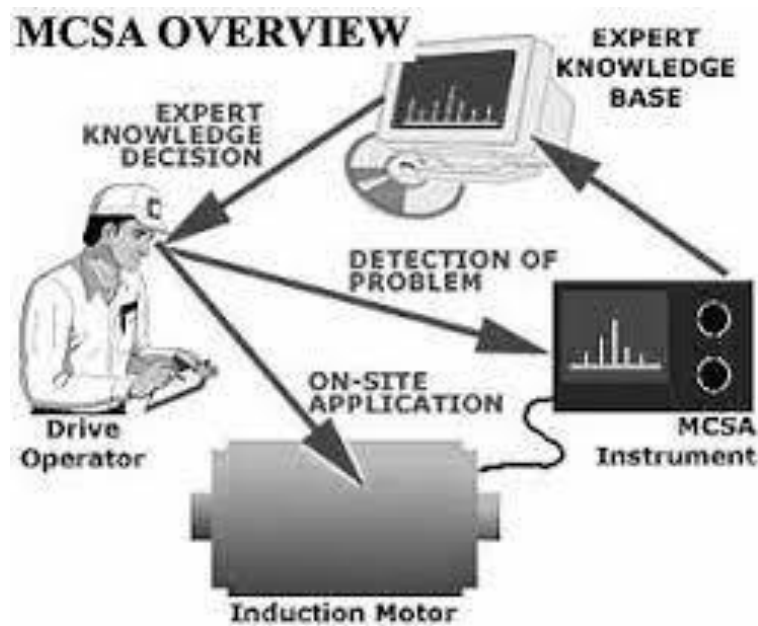


Gambar 2.15 Kegagalan pada motor induksi

2.8. MCSA (*Motor Current Signature Analysis*)

Suatu metode *condition monitoring* pada motor induksi dengan cara menganalisa arus yang melewati *winding stator*, untuk mendeteksi kerusakan motor umum pada tahap awal. Pertama kali digunakan pada Pembangkit Nuklir untuk memonitoring motor yang tidak terjangkau dan berada pada area berbahaya. Pengujian dilakukan secara online tanpa mengganggu produksi dengan motor beroperasi pada beban dan kondisi operasi normal.

Dapat digunakan sebagai *tools diagnostic* tambahan dari *monitoring* vibrasi dan *thermography*. Merupakan salah satu metode *Electrical Signature Analysis* (berguna untuk menganalisis tidak hanya motor induksi listrik tetapi juga generator, trafo daya serta peralatan listrik lainnya).



Gambar 2.16 Overview MCSA

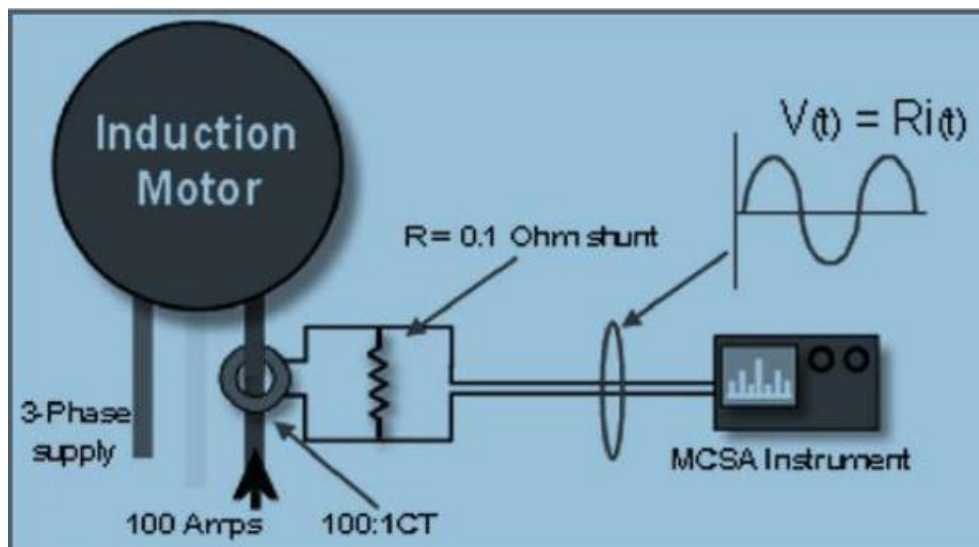
Tujuan dari MCSA (*Motor Current signature Analysis*) ialah:

- 1) Sebagai Tools / Teknik *Condition Monitoring*
- 2) Mencegah terjadinya *failure*
- 3) Mengurangi biaya *downtime* dan perbaikan
- 4) Mencegah kehilangan produksi
- 5) Meningkatkan *reliability*

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 sekrup, 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 2.17 Dasar Sistem Instrumentasi MCSA

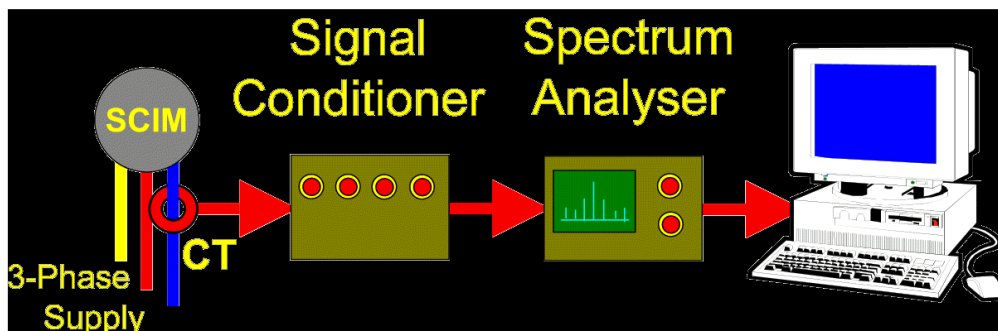
Motor Current Signature Analysis merupakan proses dimana pembacaan arus motor dicatat dan dianalisis dalam domain frekuensi. Metode tersebut menyatakan bahwa adanya perbedaan yang signifikan pada spektrum harmonisa antara arus stator motor induksi dalam keadaan normal atau sehat dan pada kondisi rusak. 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 gangguan yang dapat dideteksi dengan menggunakan MCSA:



1. Penyimpangan celah udara (*air gap*) statis dan atau dinamis.
2. Rotor bar patah atau keretakan rotor pada *end-rings*.
3. Kegagalan stator (*opening/shorting* satu atau lebih kumparan dari *stator phase windings*).
4. Koneksi abnormal belitan stator.
5. Poros bengkok (mirip dengan eksentrisitas dinamis) yang dapat mengakibatkan gesekan antara rotor dan stator yang menyebabkan kerusakan serius pada inti dan winding stator.
6. Kegagalan pada bearing dan gearbox.

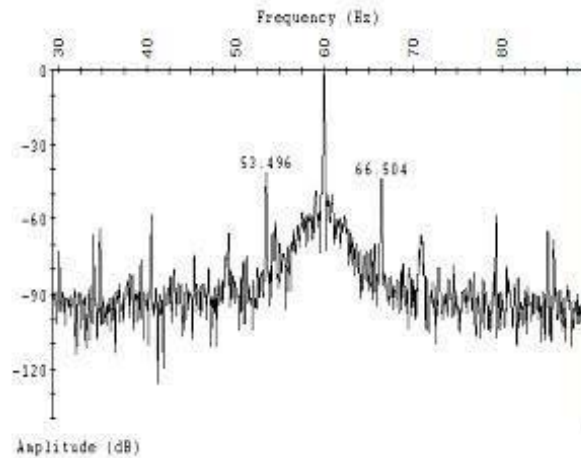
2.9. Prinsip Kerja MCSA (*Motor Current Signature Analysis*)

1. MCSA digunakan untuk menganalisis dan memantau tren sistem energi dinamis (*dynamic energy*) dengan memonitoring arus stator (*supply arus*) pada motor.



Gambar 2.18 Prinsip Kerja pada MCSA

2. Biasa digunakan monitoring arus stator tunggal (*monitoring* hanya satu dari tiga fasa arus suplai motor)
3. Belitan stator motor digunakan sebagai transduser di MCSA, mengambil sinyal arusinduksi dari rotor tetapi juga mengungkapkan informasi tentang keadaan stator)
4. Arus motor di rasakan oleh sensor arus dan dicatat dalam domain waktu, kemudian sinyal arus yang dipilih kemudian diarahkan ke penganalisis spektrum atau instrument MCSA khusus, Analisa Sinyal arus tersebut dan identifikasi jenis gangguan.



Gambar 2.19 Spectrum arus motor induksi

5. Berbagai kondisi gangguan listrik dan mekanis yang ada pada motor selanjutnya memodulasi sinyal arus motor dan berkontribusi pada harmonisa *sideband* tambahan.
6. Gangguan pada komponen motor menghasilkan anomali yang sesuai di medan magnet dan mengubah mutual dan induktansi diri motor yang muncul pada spektrum arus suplai motor sebagai sideband di sekitar frekuensi garis (grid), Berdasarkan fault signatures tanda gangguan jenis gangguan motor dapat diidentifikasi dan tingkat keparahannya dapat diketahui.
7. rentang frekuensi yang diinginkan di MCSA biasanya 0-5 kHz Ini menurut teorema Nyquist, membutuhkan laju sampel setidaknya 10.000 sampel per detik.
8. Selama uji motor harus dijalankan pada pembebanan lebih besar dari 70% Perlu dicatat bahwa sinyal gangguan yang terdeteksi pada arus suplai motor juga dapat dipengaruhi oleh pengoperasian motor di sekitarnya dan gangguan lingkungan system.

2.10 Mekanisme *Failure* Pada Motor Induksi

Failure pada motor induksi ialah dapat terjadi kegagalan koneksi Brazed, terbakarnya inti rotor akibat rotor bar patah, bar patah pada *winding* rotor fabrikasi, retak pada *shorting ring*, *cross-section: diecast rotor winding with air voids*, dan rangkaian ekuivalen.



2.11 Dampak permasalahan pada rotor

2.11.1 Dampak Sekunder

- Motor akan terus beroperasi, tetapi dengan torsi yang berkurang.
- Suara motor kasar / berisik pada saat *start* dan suara ketukan terdengar saat motor beroperasi.
- Slip rotor dan arus saluran akan meningkat pada beban yang sama.
- Muncul *large air pocket* dan *brokern bars* yang menyebabkan ekspansi bar yang tidak seragam, ketidakseimbangan rotor, dan vibrasi tinggi.
- *Brokern bars* terangkat keluar dari slot rotor sehingga bergesekan dengan stator dan menyebabkan *winding failure*.

2.11.2 Dampak Sekunder *Cage Winding Breaks*

- Muncul *Spark*, Berbahaya pada lingkungan yang *explosive*.
- Arus yang dibawa oleh *broken bars* atau *shorting rings* disalurkan kembali melalui inti dan melalui bar yang berdekatan sehingga dapat kerusakan panas ke inti.
- Mungkin membutuhkan penggantian inti rotor yang mahal.

2.11.3 Kondisi Operasi Motor (*temperature*)

1) Lingkungan Kerja

- Temperatur
- Kelembaban
- Kontaminasi
- *Biohazards*
- Kimia

2) Kondisin Operasi

- *Rated output*
- Kelebihan beban melebihi
- kenaikan kelas B
- Temperatur tinggi karena pendingin kotor

3) Kondisi start

- *Long start*
- *Repeated starts*
- *Locked rotor*



Gambar 2.20 Kondisi Operasi Motor (Kelembaban)



Gambar 2.21 Kondisi Operasi Motor (Kontaminasi & *Bio Hazard*)

2.12 Deteksi Kegagalan motor induksi dengan MCSA

2.12.1 *Air Gap Eccentricity*/Eksentrisitas celah udara

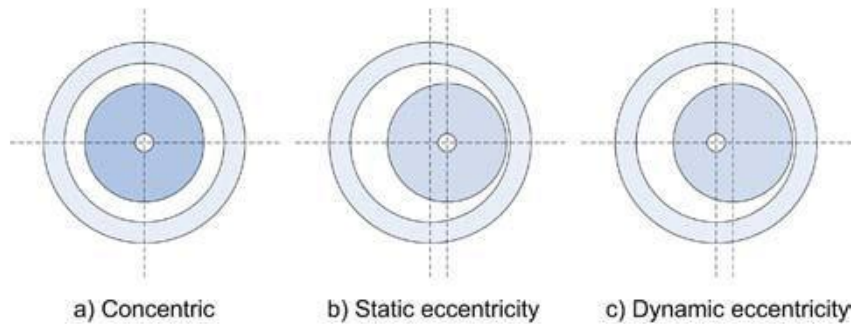
Eksentrisitas celah udara merepresentasikan kondisi jarak celah udara antara rotor dan stator tidak seragam.

Terdapat dua tipe eksentrisitas celah udara pada motor yaitu:

- 1) Statis: posisi dari panjang radial minimum dari celah udara tetap pada jarak tertentu (fix).
- 2) Dinamis: mana pusat rotor tidak di pusat rotasi dan posisi minimum celah udara berputar dengan rotor.

Penyebab:

- Cacat fabrikasi
- *Soft Foot*



Gambar 2.22 Kegagalan *Air gap eccentricity*

- a. *Air gap* seragam, tidak ada perubahan celah udara selama rotor berputar
- b. *Air gap* statis
 - Pusat rotor berpindah dari pusat lubang bore rotor
 - Minimum air gap tetap pada posisi yang sama
 - Karena UMP dari eksentrisitas statik akan menyebabkan poros rotor bengkok melendut eksentrisitas dinamis juga akan selalu ada

c. *Air gap* dinamis

Poros rotor bengkok sehingga posisi minimum air gap rotor berubah seiring waktu.

Criteria for AGE Severity berdasarkan perbedaan nilai rata rata dB antara jarak tertinggi komponen rotor slot passing frequency (HRSPFC) dan komponen speed frequency

Dampak dari *Air Gap Eccentricity*:

- 1) Vibrasi tinggi pada frekuensi $2x$ line frequency: kerusakan *bearing premature*
 - 2) Berakibat pada *Unbalanced Magnetic Pull* (UMP): dapat menyebabkan rotor bergesekan dengan stator → kegagalan katastropik
 - 3) Pengurangan dari *power factor*
 - 4) *Extra heating*
 - 5) *Extra bearing load*
- **Static Eccentricity**

Fenomen celah udara stator rotor yang tidak seragam, biasanya disebabkan karena adanya *soft foot* pada pondasi, *cocked bearing* atau celah udara yang tidak disetel dengan benar pada *plain bearing*.



Hal ini akan menunjukkan puncak tinggi pada *principle rotor bar passing frequency* yang muncul sebagai *sideband* dari *line frekuensi* dan harmoniknya.

$$\text{Static Eccentricity} = RB \times RS \pm nF_L$$

Dimana:

RB = Jumlah Rotor Bar

RS = *Running Speed motors*

FL = *Line Frequency*

N = *odd harmonics of line frequency*

- ***Dynamic Eccentricity***

Fenomena celah udara stator rotor bervariasi biasanya disebabkan karena *bearing* atau *cover ends* yang aus.

Ini akan menunjukkan puncak tinggi pada *principle rotor bar passing frequency* yang muncul sebagai *sideband* dari *line frequency* dan harmoniknya bersama dengan *sideband* pada kecepatan *running speed*.

$$\text{Dynamic Eccentricity} : RB \times RS \pm nF_L \pm RS$$

Dimana:

RB = Jumlah Rotor Bar

RS = *Running Speed motors*

FL = *Line Frequency*

N = *odd harmonics of line frequency*

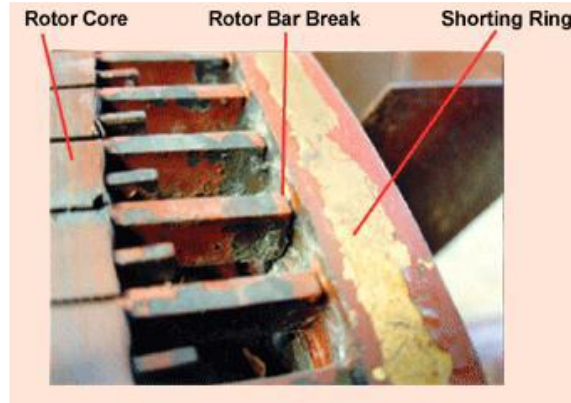
2.12.2 Broken Rotor Bar

Dampak *Broken Rotor Bars*

- Menyebabkan *Sparking* percikan api.
- Arus yang dibawa oleh *broken bars* atau *shorting rings* disalurkan kembali melalui inti dan melalui bar yang berdekatan sehingga dapat kerusakan panas ke inti.
- *Bars* yang kondisinya masih bagus menerima lebih banyak arus sehingga *temperature* naik dan menyebabkannya bar rusak.
- menyebabkan osilasi torsi dan kecepatan pada rotor, yang memicu keausan dini pada bearing dan komponen penggerak lainnya.



- Bar terangkat keluar dari slot karena gaya sentrifugal dan bergesekan dengan winding stator sehingga menyebabkan kerusakan motor yang parah.



Gambar 2.23 tampilan dampak kerusakan pada rotor bars

Penyebab *Broken Rotor Bars*:

- *Thermal*
- *Magnetic*
- *Dynamic*
- *Environmental*

Magnetic Stress

Vibrasi pada bar dapat disebabkan oleh (*magnetic force gaya magnetic*) yang dapat menimbulkan spark percikan api antara rotor bar dan inti. Celah antara inti dan rotor bar dapat membesar diakibatkan oleh:

- Ekspansi thermal dari tembaga
- (Lendutan *bowing*)

Dynamic Force (torsi)

Penyebab *dynamic stress*:

- Fluktuasi torsi pada saat *start*
- *Sudden stop* selip pada roda trem motor traksi
- Seringnya perubahan torsi (*crushers*)
- Resonansi

Environmental Stress

Penyebab *environmental stress* antara lain:

- *Aggressive atmosphere* (SO₃ in the air)



- *Moisture (corrosion)*
- *Dust (abrasion)*

Kesimpulan:

- Sangkar motor mengalami jenis stress yang berbeda dari berbagai sumber dan merupakan bagian yang paling mengalami stress pada motor induksi.
- Tembaga memang memiliki batasan *fatigue* dan setiap stress yang *periodic* akan dapat menyebabkan *crack*, jadi pertanyaannya bukan jika tetapi kapan
- Kekuatan *fatigue* adalah 30/60 dari total kekuatan tembaga dan dipengaruhi oleh frekuensi, temperature dan besar butiran
- Kekuatan dari tembaga bervariasi tergantung pada additivenya
- Tingkat stress dapat dikurangi apabila jenis dari stress diketahui
- Mengetahui tingkat stress dan karakteristik material memungkinkan estimasi dari jumlah siklus stress demikian juga dengan masa pakai motor

Menentukan frekuensi *broken rotor bar*

Dengan memeriksa spektrum frekuensi dari arus stator, tahap awal dari kegagalan rotor bar dapat dideteksi. Ketika *broken rotor bar* muncul komponen arus pada *winding stator* dapat dideteksi pada frekuensi sebagai berikut:

Broken rotor bar biasanya ditemukan sebagai *sideband slip frequency* di area *fundamental frequency*. Berdasarkan standar aturan praktiskegagalan ini terdeteksi ketika sideband ini mencapai atau melebihi -35 dB (sering di artikan sebagai 35 dB down)

STANDART Electrical Apparatus Service Association	
54 dB	Normal
45 - 54 dB	Marginal Condition
40 - 45 dB	Monitoring
< 40 dB	Dangerous

Gambar 2.24 Standart Electrical Apparatus Service Assosiaciton



Tabel 2.1 tabel pada *Standart Condition*

dB	Condition
54-60 dB	<i>Excellent</i>
48-54 dB	<i>Good</i>
42-48 dB	<i>Moderate</i>
36-42 dB	<i>Cracked rotor bars or other source of high resistance</i>
30-36 dB	<i>Multiple sources of high resistance</i>
< 30 dB	<i>Severe damage</i>

2.12.3 *Power Supply Analysis*

- *Voltage unbalance*
- *Harmonics*

Unbalance Voltage

Tingkat tegangan yang bervariasi *voltage unbalance* hanya mempengaruhi system tiga fasa. Pada umumnya disebabkan oleh beban yang tidak seimbang pada line distribusi atau dalam sebuah fasilitas.

Ketidak seimbangan pada tegangan tinggi sangat mempengaruhi penurunan efisiensi dan motor.

Dampak:

- Peningkatan slip mengurangi kecepatan beban penuh
- Meningkatnya losses
- Meningkatnya temperatur
- Distorsi torsi
- *Overload*

Menghitung Unbalance Voltage

IEC Voltage Unbalanced Factor

$$VUF = K_v \% = \frac{V_2}{V_1} \times 100 \%$$

Dimana V_1 & V_2 masing-masing adalah besarnya komponen rangkaian *positive* dan *negative* dari tegangan *unbalance*



NEMA Voltage Unbalanced Factor

$$\text{Percent voltage unbalance} = 100 \times \frac{\text{maximum voltage deviation from average voltage}}{\text{average voltage}}$$

Presentase tegangan *unbalance* dapat didefinisikan sbb:

Contoh dengan tegangan 460, 467, dan 450, rata rata nya adalah 459 deviasi maksimum dari nilai rata rata adalah 9, dan presentase unbalance:

$$\text{Percent voltage unbalance} = 100 \times \frac{9}{456} = 1,96 \%$$

Standar IEC

Motor AC tiga fasa harus mampu dioperasikan pada system tegangan tiga fasa yang memiliki komponen rangkaian negative tidak melebihi 1% dari komponen rangkaian positive pada periode yang lama, atau 1,5% untuk periode waktu singkat tidak melebihi beberapa menit, dan komponen rangkaian nol tidak melebihi 1% dari komponen rangkaian positive

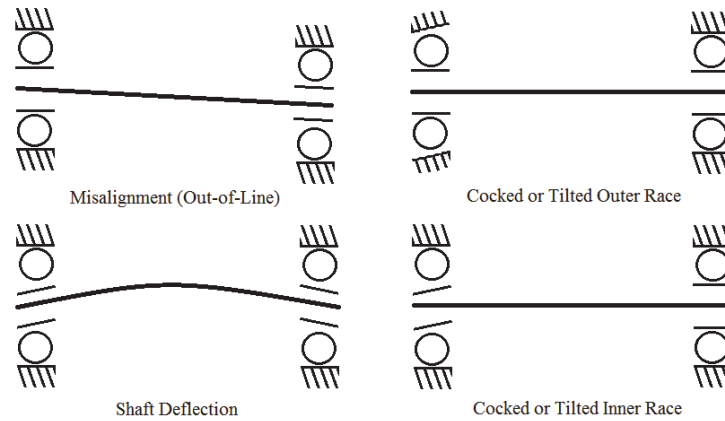
2.12.4 Kerusakan *Bearing*

Kerusakan bearing pada motor induksi merupakan salah satu gangguan yang sering terjadi. Jenis kerusakan bearing itu sendiri terdiri dari kerusakan inner race, outer race dan bola bearing. Terjadinya kerusakan bearing ini dapat menyebabkan peningkatan vibrasi, kenaikan temperatur dan dapat menyebabkan kerusakan pada shaft, rotor dan stator. Untuk mempercepat proses perbaikan, deteksi kerusakan bearing harus bisa diklasifikasikan berdasarkan jenis kerusakan yang terjadi. Dengan klasifikasi kerusakan pada bearing ini, diharapkan dapat mempermudah dan mempercepat proses perbaikan. Kerusakan bearing lebih sulit diidentifikasi dibanding permasalahan sangkar motor, kerusakan bearing disebabkan oleh beberapa hal antara lain:

1. *Misalignment bearing*
2. *Excessive load pada shaft*
3. *Pelumasan*
4. *Fatigue dll*



Terdapat 4 jenis *misalignment bearing*:



Gambar 2.25 jenis *misalignment bearing*

MCSA dapat mendeteksi kerusakan *bearing* dengan mendeteksi komponen frekuensi f_0 dan f_1 pada sebagian besar *bearing* dengan jumlah bola antara 6 s/d 12 bola sebagai berikut:

$$f_0 = 0.4nf_{rm}$$

$$f_1 = 0.6nf_{rm}$$

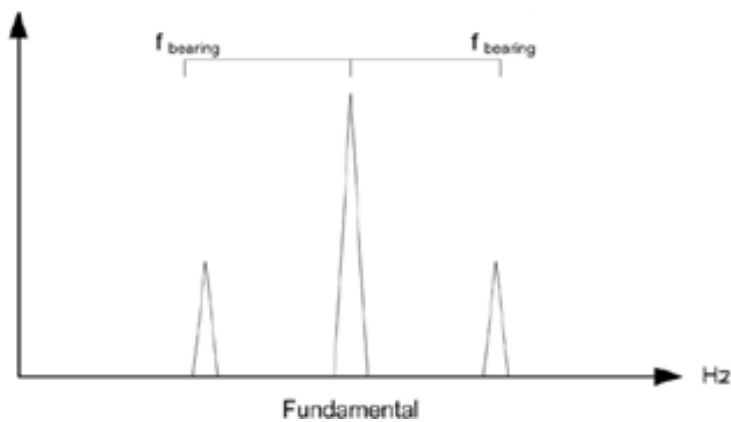
dimana:

f_0 = lower frequency,

f_1 = upper frequency,

n = the number of balls in th bearings

f_{rm} = the rotor's mechanical frequency



Gambar 2.26 Komponen *frekuensi side* ban dakibat kerusakan *bearing*



2.12.5 Hubung singkat (*Shorted Turns*) Pada *Stator Windings*

Penyebab kegagalan stator terbesar adalah terkait dengan stator windings. Hubungan singkat menyebabkan panas yang berlebih pada *stator coil* dan arus yang tidak seimbang.

MCSA memanfaatkan fakta bahwa gelombang *fluks* yang berputar dapat menginduksi komponen yang sama pada *stator winding* komponen arus motor yang terpengaruh oleh *shorted turn* dapat dideteksi pada frekuensi sebagai berikut:

$$f_{st} = f_g \left(\frac{n}{p} (1-s) \pm k \right)$$

F_{st} = the component related to shorted turn

F_g = electrical supply (grid) frequency

$n = 1, 2, 3 \dots$

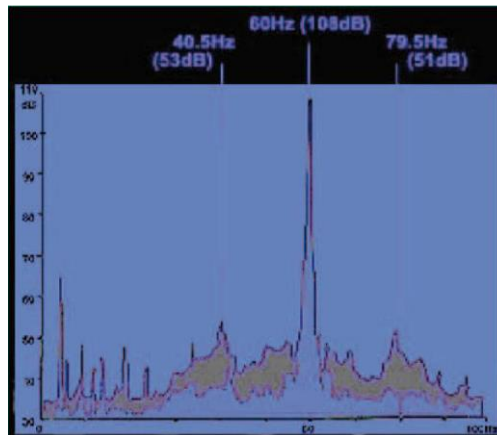
2.12.6 Efek Pembebanan

Motor listrik adalah pengubah energi listrik menjadi torsi mekanis. Torsi beban dapat bervariasi dengan posisi rotor. Variasi ini menyebabkan fluktuasi pada arus motor.

Dalam hal ini arus suplai akan mengandung komponen spektral yang berhubungan dengan variabilitas torsi beban. *Variability* torsi beban pada kelipatan dari kecepatan putar mfr menghasilkan arus stator pada frekuensi f_{load} .

Keausan peralatan

- Adanya keausan pada peralatan juga dapat merubah spektrum arus motor, hal ini berlaku pada kegagalan *system* transmisi dan beban terpasang.
- Tidak ada rumus umum untuk komponen frekuensi yang terkait dengan keausan peralatan.
- Namun karena sebagian besar keausan bersifat acak (kelainan muncul pada spektrum arus sebagai perubahan *noise floor*).



Gambar 2.27 Perubahan pada spektrum arus akibat keausan peralatan

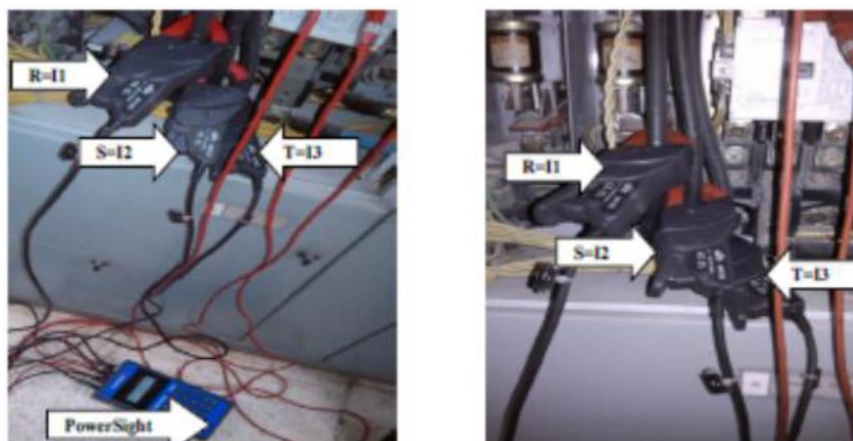
2.13 Prosedur Pengujian *Motor Current Signature Analysis*

Memetakan gambaran umum dari sistem yang sedang dianalisis, pengertian dari MCSA (*Motor Current Signature Analysis*) ialah suatu peralatan ukur yang digunakan untuk mengetahui kualitas daya dari tenaga listrik.

Alat ini sangat kompleks, karena dapat mengukur tegangan, arus listrik, frekuensi, daya kompleks, daya aktif, daya reaktif dan factor daya. Pada penelitian ini, parameter yang diukur menggunakan peralatan ini adalah besaran listrik dasar, yaitu tegangan, arus dan frekuensi listrik.

Persiapan:

1. Kabel CT (R S T)
2. Kabel PT (R S T)
3. Power sight PS 4500



Gambar 2.28 pengambilan arus dan tegangan



Probe	Simbol	Warna	Sudut Phasa
Tegangan 1 R	U12	Hitam	0°
Tegangan 2 S	U23	Biru	-120°
Tegangan 3 T	U31	Hijau	120°
Arus 1 R	IL1	Hitam	-60°
Arus 2 S	IL2	Biru	-178°
Arus 3 T	IL3	Hijau	59°
Imbalance	V = 0.220%	I = 2.965%	I lag V

Gambar 2.29 simbol, warna, sudut phasa pada pengambilan arus dan tegangan