

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Konservasi Energi

Menurut SNI (Standar Nasional Indonesia), konservasi energi adalah upaya untuk mengefisienkan pemakaian energi untuk suatu kebutuhan agar pemborosan energi dapat dihindarkan. Penghematan energi bisa dilakukan dengan menggunakan energi secara efisien atau mengurangi penggunaan energi yang kurang diperlukan. Penghematan energi dapat mengurangi biaya dalam penggunaan energi sehingga meningkatkan keuntungan.

Penghematan energi merupakan unsur yang penting dari sebuah kebijakan energi. Dengan mengurangi konsumsi energi, permintaan energi seiring dengan bertambahnya populasi penduduk dapat diturunkan.

2.2 Audit Energi

Audit energi memiliki beberapa definisi. Menurut SNI (Standar Nasional Indonesia) audit energi adalah teknik yang dipakai untuk menghitung besarnya konsumsi energi pada bangunan gedung dan mengenali cara-cara untuk penghematannya. Audit energi secara sederhana dapat diartikan sebagai proses evaluasi sebuah gedung atau *plant* yang menggunakan energi dan mengidentifikasi peluang untuk mengurangi konsumsi energi. Ada hubungan antara biaya audit, seberapa banyak data yang dikumpulkan dan dianalisis serta peluang-peluang konservasi energi diidentifikasi, maka hal pertama yang dapat diketahui yaitu biaya audit menentukan tipe audit yang akan dilakukan. Ruang lingkup audit energi, kompleksitas perhitungan, dan tingkat evaluasi ekonomi adalah semua masalah yang dapat ditangani secara berbeda oleh setiap auditor individu dan harus ditentukan sebelum memulai kegiatan audit apapun (Thuman, 2003: 1).

Proses audit dimulai dengan mengumpulkan informasi tentang fasilitas pengoperasian dan catatan penggunaan. Data tersebut dianalisis untuk menggambarkan pola penggunaan energi yang dapat membantu auditor untuk memeriksa area-area yang membutuhkan penurunan biaya energi. Perubahan spesifik, yang biasa disebut dengan *Energy Conservation Opportunities* (ECOs), diidentifikasi dan dievaluasi untuk menentukan keuntungan dan efektifitas biayanya. Akhirnya, rencana dibuat dimana

ECO tertentu dipilih untuk diimplementasikan dalam rangka penghematan energi dan biaya produksi.

Level audit energi ini secara sederhana dapat dibagi menjadi 3 kelompok, yaitu (Beggs, 2009: 124):

a. *Preliminary Audit*

Preliminary audit relatif cepat dan dirancang untuk menentukan potensi proyek. Audit energi dan survei yang lebih rinci selalu dapat dilakukan jika memang diperlukan. *Preliminary audit* mendapatkan data dari pembacaan alat ukur atau media perekam data lain untuk jangka waktu tertentu. Karena audit ini berkaitan dengan pengumpulan data dari rekening bulanan, maka dapat disebut juga dengan audit energi secara finansial.

b. *Targeted Audit*

Targeted audit biasanya merupakan kelanjutan hasil dari *Preliminary Audit*. Pada *targeted audit* disediakan data dan analisis yang lebih rinci terhadap proyek-proyek yang ditargetkan khusus. Misalnya suatu industri menargetkan meningkatkan kualitas instalasi penerangan atau boiler, maka perlu dilakukan survei terhadap sasaran dan analisis aliran energi serta biaya yang terkait dengan target yang lebih rinci, selanjutnya memberikan rekomendasi mengenai tindakan yang harus diambil.

c. *Comprehensive Audit*

Comprehensive Audit memberikan data yang rinci pada energi masukan, dan aliran energi dalam suatu industri serta rencana implementasi objek energi. Tipe audit ini harus menghasilkan rencana pelaksanaan proyek energi yang mendetail. Audit tipe ini memerlukan survei energi yang mendetail dan mungkin memerlukan penggunaan simulasi energi perangkat lunak komputer yang rumit.

Pada saat akan memutuskan tipe audit yang perlu digunakan, dapat juga dimulai dengan mengumpulkan data komponen struktur dan mekanik pada industri tersebut. Kebanyakan informasi tersebut dapat dikumpulkan dengan melakukan kunjungan langsung agar lebih memudahkan dalam mengidentifikasi area yang potensial. Pendekatan terorganisasi untuk mengaudit akan dapat membantu untuk mengumpulkan informasi yang berguna dan mengurangi jumlah waktu terbuang saat mengevaluasi suatu industri. Proses audit dapat dibagi menjadi tiga tahapan, yaitu tahap pengerjaan saat sebelum kunjungan ke industri, saat kunjungan, dan pengerjaan saat setelah kunjungan (Thumann, 2003: 4).

Audit pada industri adalah jenis audit yang kompleks dan menarik karena banyaknya variasi peralatan. Peralatan dengan jenis spesifikasi tinggi yang digunakan di proses industri membedakan jenis ini dengan bentuk komersial lainnya. Tantangan untuk auditor dan spesialis manajemen energi adalah mempelajari operasi peralatan industri yang rumit dan beragam, serta memberikan rekomendasi perbaikan untuk proses dan peralatannya yang dapat menghemat energi dan uang (Turner, 2005: 45).

2.3 Beban Listrik

Dalam melakukan konservasi energi perlu mengetahui beban listriknya agar dapat diidentifikasi pola pemakaian energi listrik yang kurang efisien sehingga dapat dilakukan upaya-upaya penghematan energi listrik.

Daya listrik dalam bentuk kompleks dapat dinyatakan oleh persamaan (Sudirham, 2002: 181):

$$S = P + jQ \quad (2-1)$$

Dimana:

S = daya semu (VA)

P = daya nyata (watt)

Q = daya reaktif (VAR)

Besar kecilnya daya reaktif yang diserap oleh beban mengakibatkan faktor daya sistem berbeda. Faktor daya minimal yang harus dipenuhi oleh beban tersambung ke jaringan PLN (Perusahaan Listrik Negara) di Indonesia adalah minimal 0,85 *lagging* (Peraturan Menteri Energi Sumber Daya Mineral (ESDM) Republik Indonesia Nomor 9 Tahun 2011 Tentang Ketentuan Pelaksanaan Tarif Tenaga Listrik yang Disediakan oleh Perusahaan Perseroan (Persero) PT PLN (Perusahaan Listrik Negara)). Bagi beban yang memiliki faktor daya kurang dari 0,85 *lagging* akan dikenakan denda penalti. Denda penalti dapat diturunkan dengan memasang kompensasi daya reaktif di sisi beban. Keuntungan lain dari pemasangan kompensasi daya reaktif adalah menurunkan jatuh tegangan (menaikkan tegangan), mengurangi rugi-rugi saluran, dan menambah penyediaan kapasitas daya (VA). Untuk mencari nilai energi (W), digunakan persamaan (Sudirham, 2002: 3):

$$dw = p \times dt \quad (2-2)$$

dimana: dw = perubahan energi listrik (kWh)

p = daya yang digunakan (kW)

dt = selang waktu (jam)

2.3.1 Motor Listrik

Motor listrik merupakan beban utama pada divisi pabrikasi di PT INKA. Motor listrik kadangkala disebut “kuda kerja” nya industri sebab diperkirakan bahwa motor-motor menggunakan sekitar 70% beban listrik total di industri (*United Nation Environment Programme*, 2006: 1).

Motor listrik digunakan untuk mengkonversi energi listrik menjadi energi mekanik. Energi mekanik diperoleh dari produk energi listrik dikalikan efisiensi (*Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Recommended Practice for Energy Management in Industrial and Commercial Facilities*, 1996: 107).

2.3.1.1 Motor DC

Motor DC (Direct Current) digunakan pada beberapa aplikasi industri karena kecepatannya mudah diubah-ubah. Motor DC membutuhkan sumber DC untuk mengeksitasi belitan medan dan untuk mensuplai daya ke belitan jangkar melalui sikat dan komutator. Ada 5 jenis motor DC berdasarkan jenis penguatannya atau eksitasinya yaitu (*Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Recommended Practice for Energy Management in Industrial and Commercial Facilities*, 1996: 109):

- a) *Shunt-wound*
- b) *Compound-wound*
- c) *Series-wound*
- d) *Permanent-magnet* (available sampai 5 hp)
- e) *Brushless dc motors* (0,5–10 hp)

Mengaplikasikan motor DC untuk efisiensi energi di antaranya dilakukan dengan memilih ukuran motor yang sesuai dengan beban dan menyesuaikan suplai daya yang efisien, misalnya NEMA (*National Electrical Manufacturers Association*) kelas C.

Motor DC tersedia dalam banyak ukuran, namun penggunaannya pada umumnya dibatasi untuk beberapa penggunaan berkecepatan rendah, penggunaan daya rendah hingga sedang, sebab sering terjadi masalah dengan perubahan arah arus listrik mekanis pada ukuran yang lebih besar. Motor tersebut dibatasi hanya untuk penggunaan di area yang bersih dan tidak berbahaya sebab resiko percikan api pada sikatnya. Motor DC juga relatif mahal dibanding motor AC (Alternating Current).

2.3.1.2 Motor AC

Motor arus bolak-balik menggunakan arus listrik yang membalikkan arahnya secara teratur pada rentang waktu tertentu. Motor AC lebih banyak digunakan dalam beragam aplikasi dari pada motor DC. Keuntungan utama motor DC dibanding motor AC adalah bahwa kecepatan motor AC lebih sulit diatur. Untuk mengatasi kerugian ini, motor AC dapat dilengkapi dengan sistem penggerak yang menggunakan frekuensi variabel untuk memperbaiki kinerja pengaturan kecepatan sekaligus menurunkan dayanya. Motor induksi merupakan motor yang paling populer di industri karena keandalannya dan lebih mudah perawatannya.

Motor perlu dievaluasi melalui kegiatan audit energi. Untuk menentukan penghematan tahunan ditentukan berdasarkan persamaan (*Energy Efficiency & Renewable Energy*, 2012: 2):

$$ES = 0,746 \times Hp \times L \times N \times \left[\frac{100}{E_A} - \frac{100}{E_B} \right] \quad (2-3)$$

dimana:

ES = penghematan tahunan (kWh/tahun)

Hp = daya dalam *horsepower*

L = persentase beban yang dibagi dengan 100

N = waktu operasi dalam setahun (jam)

E_A = persen efisiensi untuk motor standar

E_B = motor efisiensi untuk motor efisien

Selanjutnya menentukan biaya penghematan motor tiap tahun dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$Cost Saving (Rp/tahun) = kWh/tahun \times Rp/kWh \quad (2-4)$$

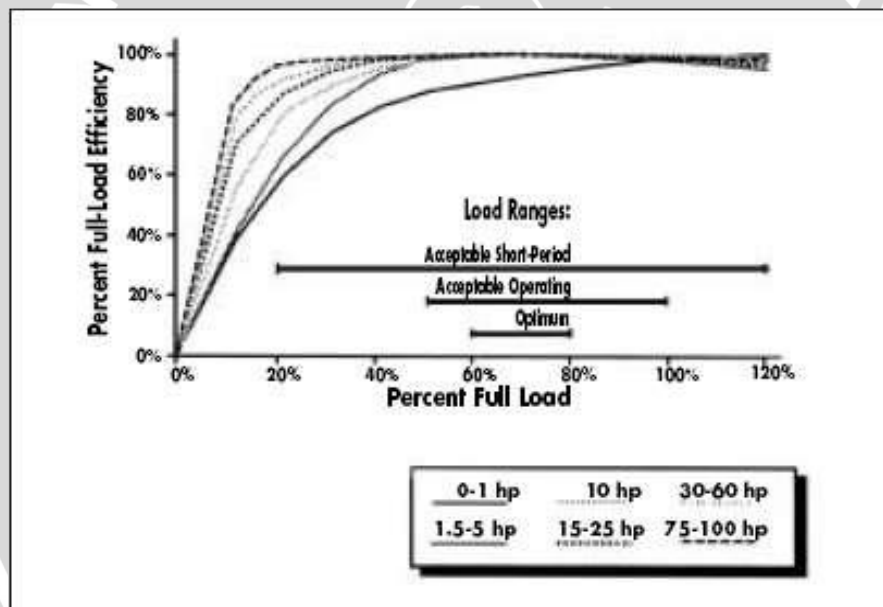
Manajemen energi untuk motor listrik meliputi penjadwalan beban, pemeliharaan motor berkala, penanganan faktor daya, kesetimbangan tegangan *supply*, dan efisiensi pemakaian motor. Penjadwalan pembebanan motor mengakibatkan motor digunakan secara efisien dan sesuai dengan kapasitas sehingga tidak terjadi pemborosan.

Faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi adalah (*United Nation Environment Programme*, 2006: 10):

1. Usia; Motor baru lebih efisien.
2. Kapasitas; Sebagaimana pada hampir kebanyakan peralatan, efisiensi motor meningkat dengan laju kapasitasnya.

3. Kecepatan; Motor dengan kecepatan yang lebih tinggi biasanya lebih efisien.
4. Jenis. Sebagai contoh, motor dengan rotor berbentuk sangkar tupai biasanya lebih efisien daripada motor cincin geser.
5. Suhu. Motor yang didinginkan oleh *fan* dan tertutup total lebih efisien daripada motor *screen protected drip - proof* (SPDP)

Untuk mengukur efisiensi motor, maka motor harus dilepaskan sambungannya dari beban dan dibiarkan untuk melalui serangkaian uji. Hasil dari uji tersebut kemudian dibandingkan dengan grafik kinerja standar yang diberikan oleh pembuatnya. Karena sulit untuk mengkaji efisiensi motor pada kondisi operasi yang normal, beban motor dapat diukur sebagai indikator efisiensi motor. Dengan meningkatnya beban, faktor daya dan efisiensi motor bertambah sampai nilai optimumnya pada sekitar beban penuh. Survei beban motor dilakukan untuk mengukur beban operasi berbagai motor di seluruh pabrik.



Gambar 2.1. Efisiensi pembebanan motor sebagai fungsi dari % efisiensi beban penuh

Sumber: *United Nation Environment Programme*, 2006: 11

Terdapat hubungan yang jelas antara efisiensi motor dan beban. Gambar 2.1 merupakan grafik perbandingan hubungan antara efisiensi motor terhadap beban motor yang berbeda-beda. Pabrik motor membuat rancangan motor untuk beroperasi pada beban 50-100% dan akan paling efisien pada beban sekitar 75%. Tetapi, jika beban turun dibawah 50% efisiensi turun dengan cepat seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1. Mengoperasikan motor dibawah beban nominal 50% memiliki dampak pada faktor dayanya. Efisiensi motor yang tinggi dan faktor daya yang mendekati 1 sangat

diinginkan untuk operasi yang efisien dan untuk menjaga biaya rendah untuk seluruh pabrik, tidak hanya untuk motor. Untuk alasan ini maka dalam mengkaji kinerja motor akan bermanfaat bila beban dan efisiensinya ditentukan.

Metode yang digunakan untuk menentukan beban motor bagi motor yang beroperasi secara individu adalah dengan pengukuran daya masuk. Metode ini menghitung beban sebagai perbandingan antara daya masuk (diukur dengan alat analisis daya) dan nilai daya pada pembebanan 100%. Untuk motor tiga fasa, langkahnya adalah menentukan daya masuk dengan persamaan sebagai berikut (*United Nation Environment Programme*, 2006: 13):

$$P_i = \frac{V \times I \times PF \times \sqrt{3}}{1000} \quad (2-5)$$

dimana:

P_i = daya tiga fasa (kW)

V = tegangan (V)

I = arus (A)

PF= faktor daya

Selanjutnya menentukan nilai daya masuk pada beban penuh dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$P_r = P \times \frac{0.746}{\eta_r} \quad (2-6)$$

dimana:

P_r = daya masuk pada beban penuh (kW)

P = daya pada nameplate (HP)

η_r = efisiensi pada beban penuh

Berdasarkan persamaan (2.5) dan (2.6), didapatkan besar beban dalam % melalui persamaan:

$$\text{Load} = \frac{P_i}{P_r} \times 100\% \quad (2-7)$$

dimana:

Load = Daya keluar yang dinyatakan dalam % nilai daya nominal.

2.3.1.3 Koreksi Faktor Daya

Operasi yang tidak efisien pada sistem distribusi elektrik salah satunya merupakan dampak dari faktor daya yang rendah. Untuk beban seimbang satu fasa berdasarkan persamaan (2-8) (Thumann, 2003: 193), pada sistem dengan faktor daya

rendah dibutuhkan arus yang lebih besar untuk menghasilkan daya yang sama dengan sistem berfaktor daya tinggi.

$$P = V_{\text{Load}} \cdot I_{\text{Load}} \cdot \cos \theta \quad (2-8)$$

Pada beberapa aplikasi industri, faktor daya yang rendah merupakan hasil dari penggunaan motor induksi. Karakteristik motor induksi adalah faktor dayanya yang kurang dari satu, menyebabkan efisiensi keseluruhan yang lebih rendah (dan biaya operasi keseluruhan yang lebih tinggi) untuk seluruh sistem listrik pabrik.

Ada beberapa cara untuk melakukan koreksi faktor daya. Cara yang pertama adalah melakukan pergantian motor yang memiliki kapasitas terlalu besar dengan kapasitas yang dibutuhkan. Cara kedua adalah mengganti motor desain biasa dengan motor pabrikan yang memiliki desain efisien. Untuk cara kedua ini dibutuhkan biaya investasi yang lebih besar namun dapat membantu meningkatkan faktor daya dan efisiensi.

Cara ketiga adalah dengan memasang kapasitor. Kapasitor yang disambung secara paralel (*shunt*) dengan motor kadangkala digunakan untuk memperbaiki faktor daya. Kapasitor tidak akan memperbaiki faktor daya motor itu sendiri akan tetapi terminal *starter*nya dimana tenaga dibangkitkan atau didistribusikan. Ukuran kapasitor tergantung pada kVA reaktif tanpa beban (kVAR) yang ditarik oleh motor. Ukuran ini tidak boleh melebihi 90% dari kVAR motor tanpa beban, sebab kapasitor yang lebih tinggi dapat mengakibatkan terlalu tingginya tegangan dan motor akan terbakar. kVAR motor hanya dapat ditentukan oleh pengujian motor tanpa beban. Alternatifnya adalah menggunakan faktor daya motor standar untuk menentukan ukuran kapasitor.

Manfaat dari koreksi faktor daya meliputi penurunan kebutuhan kVA (jadi mengurangi biaya kebutuhan utilitas), penurunan kehilangan I^2R pada kabel di bagian hulu kapasitor (jadi mengurangi biaya energi), berkurangnya penurunan tegangan pada kabel (mengakibatkan pengaturan tegangan meningkat), dan kenaikan dalam efisiensi keseluruhan sistem listrik pabrik.

Manajemen energi untuk motor listrik meliputi penjadwalan beban, pemeliharaan motor berkala, penanganan faktor daya, kesetimbangan tegangan *supply*, dan efisiensi pemakaian motor. Penjadwalan pembebanan motor mengakibatkan motor digunakan sesuai dengan kapasitasnya dan penggunaannya efisien sehingga tidak terjadi pemborosan. Pemeliharaan berkala akan sangat menguntungkan karena *losses* akibat faktor listrik dapat ditekan. Penanganan faktor daya dengan pemasangan kapasitor akan

efektif dalam pemakaian konsumsi daya listrik (*United Nation Environment Programme*, 2006: 18).

2.3.1.4 Pengaruh Temperatur Motor

Pada dasarnya, motor yang sedang beroperasi akan menghasilkan panas. Panas yang dihasilkan oleh motor berasal dari internal dan eksternal motor tersebut. Kerugian panas internal motor listrik berasal dari (Tua, 2006: 292):

- a. Rugi inti yaitu energi yang diperlukan untuk memagnetisasikan beban inti (histerisis) dan kerugian-kerugian karena timbulnya arus listrik yang kecil yang mengalir pada inti.
- b. Rugi tembaga yaitu rugi pemanasan (I^2R) pada lilitan stator karena arus listrik mengalir melalui penghantar kumparan dengan tahanan.
- c. Kerugian beban liar yaitu akibat dari fluks bocor yang diinduksikan oleh arus beban bervariasi sebagai kuadrat arus beban.
- d. Kerugian angin dan gesekan yang diakibatkan oleh gesekan angin dan bantalan terhadap putaran motor.

Motor juga terkena gangguan eksternal saat beroperasi yang dapat menimbulkan panas. Gangguan-gangguan eksternal itu antara lain (Tua, 2006: 293):

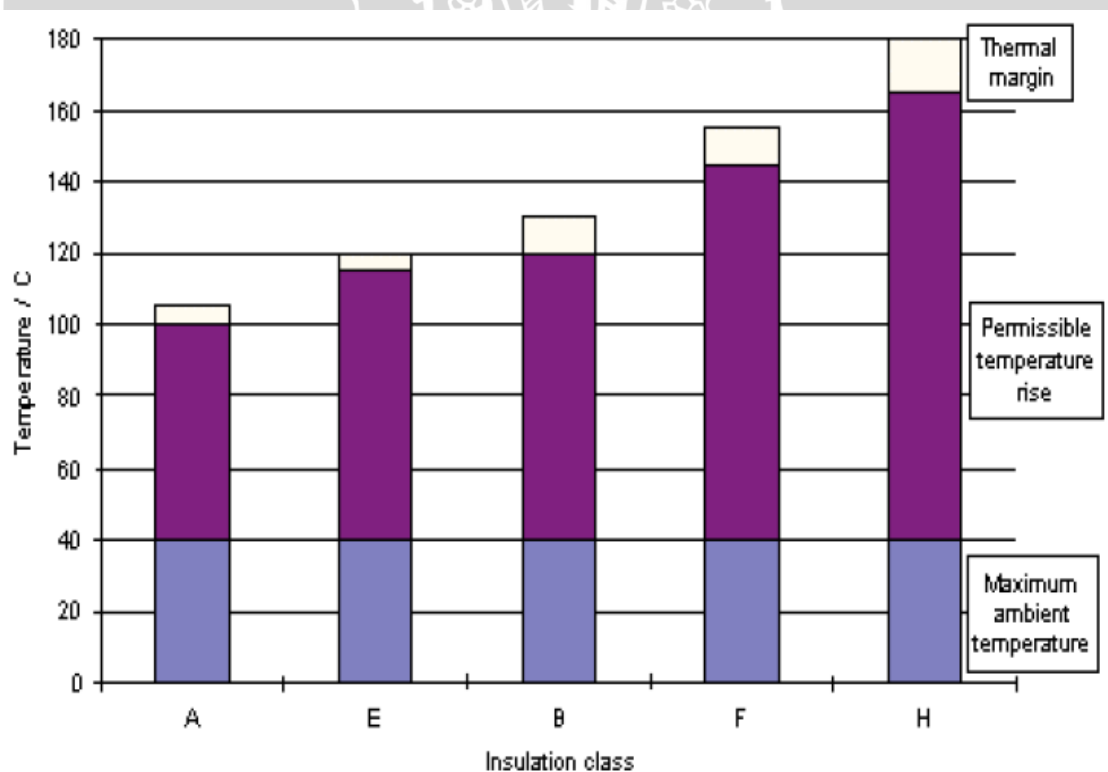
- a. Gangguan mekanik yang meliputi bantalan (*bearing*) yang sudah aus, salah satu tegangan fasa terbuka akibat kontaktor yang rusak, dan longgarnya koneksi.
- b. Gangguan fisik sekeliling yang meliputi suhu ruangan, perubahan fisik akibat benturan, dan pendinginan motor yang tidak baik.
- c. Gangguan dalam operasi dari sistem keseluruhan yang meliputi pembebanan lebih dan pengasutan motor listrik.

Seperti yang disebutkan sebelumnya bahwa kelonggaran koneksi merupakan salah satu bentuk gangguan eksternal yang dapat menyebabkan rugi daya akibat meningkatnya resistansi kontak. Kenaikan temperatur pada kebanyakan rangkaian elektrik diakibatkan oleh disipasi daya dari pemanasan *ohmic*.

Saat membuat koneksi elektrik penting untuk membuat resistansi kontak sekecil mungkin untuk meminimalkan rugi daya. Jika koneksi itu longgar, R akan membesar yang diikuti dengan meningkatnya rugi daya dan temperatur pada titik hubung. Hal ini berarti rangkaian tersebut beroperasi tidak efisien dan membutuhkan daya elektrik lebih besar dari biasanya, dimana makin besar arusnya maka makin besar juga rugi dayanya. Kelonggaran satu koneksi tidak berakibat banyak pada kerugian daya, namun akan

terasa pada *plant* yang lebih besar. Jika arus dan resistansi kontak saat kelonggaran koneksi cukup tinggi, maka akan dapat meningkatkan rugi daya secara signifikan yang berujung pada pemborosan energi listrik.

Kenaikan temperatur tidak boleh melampaui batas sistem isolasi yang sudah ditetapkan, bilamana motor dibebani pada harga nominalnya atau faktor layanan (*service factor*) beban. Berdasarkan standar IEC 34-1, data batas operasional motor senantiasa didasarkan pada temperatur 40° C. Pada temperatur ini motor dapat memberikan daya output nominal tanpa terjadi pemanasan berlebihan yang tidak diizinkan. Menurut IEC 85, isolasi dibagi menjadi beberapa kelas isolasi, yang masing-masing memiliki batas normal dan maksimum temperatur yang diizinkan. Kelas dan isolasi menurut standar IEC 85 dapat dilihat pada Gambar 2.2. Kenaikan temperatur maksimum berbeda-beda tergantung kelas isolasinya dengan kelas F memiliki kenaikan temperatur yang lebih besar dari kelas A dan B. Namun jika diberi tambahan piranti termokopel, kenaikan temperatur maksimum untuk masing-masing kelas bisa lebih tinggi.



Gambar 2.2 Kelas isolasi motor menurut IEC 85

Sumber: IEC 85, 1984: 3

Temperatur belitan motor adalah merupakan jumlah dari temperatur pendingin dan temperatur pemanasan. Jadi bilamana temperatur pendingin kurang dari 40° C, maka kapasitas beban motor masih dapat dinaikkan dan sebaliknya bilamana temperatur pendingin lebih dari 40° C, maka kapasitas beban dari motor harus diturunkan. Tabel 2.1 merupakan daya motor yang diperkenankan berdasarkan temperatur motor.

Tabel 2.1 Daya motor yang diperkenankan berdasarkan temperatur motor

Temperatur (°C)	40	45	50	55	60	70
% power output	100	96.5	93	90	86.5	79

Sumber: IEC 34 – 1, 2004: 9

Jadi batas kemampuan (*rating*) motor yang digunakan pada elemen penggerak tergantung pada keadaan temperatur sekitar dimana motor tersebut terpasang. Penambahan pengaman perlu dilakukan untuk meminimalisasi terjadinya kerusakan/terbakarnya kumparan motor akibat adanya peningkatan suhu yang disebabkan gangguan eksternal maupun internal motor listrik. Gangguan-gangguan tersebut antara lain terjadinya peningkatan suhu sekeliling (*ambient*), pembebanan berlebihan maupun sistem pengasutan yang tidak baik sehingga untuk menghindari terjadinya peningkatan suhu pada motor listrik maka penempatan, pembebanan dan sistem pengasutan harus disesuaikan dengan spesifikasi kemampuan nominal motor listrik.

2.4 Transformator

Transformator digunakan untuk mensuplai dan menyesuaikan daya yang diperlukan pada saat proses operasi. Trafo standar tidak membutuhkan target efisiensi saat proses desain. Sasaran dari trafo standar adalah keamanan, kenyamanan, kesesuaian, keandalan, dan beberapa parameter lingkungan dan teknis lainnya. Penghematan energi dapat diperoleh dengan menggunakan trafo yang efisien dan mengoperasikan trafo secara efisien. Rugi-rugi pada trafo terjadi oleh beberapa hal (IEEE *Recommended Practice for Energy Management in Industrial and Commercial Facilities*, 1996: 146):

- a. Rugi-rugi rangkaian listrik
 1. Rugi I^2R karena arus beban
 2. Rugi I^2R karena arus tanpa beban
 3. Rugi arus pusar (*eddy current*) pada konduktor akibat medan bocor

- b. Rugi-rugi rangkaian magnetik
 1. Rugi histerisis pada isolasi kawat
 2. Rugi arus pusar (*eddy current*) pada isolasi kawat
 3. Rugi arus pusar (*eddy current*) pada penjepit kawat dan baut
- c. Rugi rangkaian dielektrik

Rugi rangkaian dielektrik sampai 50 kV adalah rugi yang kecil dan biasanya terdapat pada rugi tanpa beban. Seperti efisiensi pada umumnya, efisiensi trafo adalah perbandingan antara daya output dan daya input, yang mana rugi-rugi yang dimaksud adalah rugi pada keadaan tanpa beban dan berbeban. Untuk perhitungan pembebanan transformator digunakan persamaan (Indrakoesoema, 2012: 544):

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3}V} \quad (2-9)$$

dimana I_{FL} adalah arus beban penuh (A), S adalah daya semu transformator (kVA) dan V adalah tegangan sisi sekunder transformator (kV).

$$\% \text{ pembebanan} = \frac{I_{f\text{asa}}}{I_{FL}} \times 100\% \quad (2-10)$$

dimana $I_{f\text{asa}}$ adalah arus fundamental RMS per fasa.

Selanjutnya untuk mengetahui rata-rata ketidakseimbangan beban (dalam %) adalah:

$$RKB = \frac{\left| \frac{I_R}{I_{\text{Rata-rata}}} - 1 \right| + \left| \frac{I_S}{I_{\text{Rata-rata}}} - 1 \right| + \left| \frac{I_T}{I_{\text{Rata-rata}}} - 1 \right|}{3} \times 100\% \quad (2-11)$$

dimana RKB adalah rata-rata ketidakseimbangan beban (%), I_R, I_S, I_T (A) merupakan besar arus pada masing-masing fasa, dan $I_{\text{Rata-rata}}$ (A) merupakan rata-rata arus dari fasa R,S,T. Apabila nilai RKB kurang dari 20% maka transformator dibebani cukup merata.

Ada beberapa rekomendasi untuk upaya penghematan energi pada trafo, diantaranya adalah (*Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Recommended Practice for Energy Management in Industrial and Commercial Facilities*, 1996: 153):

- a. Jadwal pemeliharaan berkala penting untuk memeriksa ventilasi, *radiador*, dan kipas dalam keadaan bersih serta memastikan permukaan trafo masih terlindung dengan baik.
- b. Trafo tipe kering sebaiknya dipasang lampu bersensor suhu untuk masing-masing fasa untuk memudahkan pembacaan temperatur.

- c. Trafo dioperasikan pada tegangan yang sesuai. Mengoperasikan trafo pada tegangan primer yang lebih tinggi dapat menambah impedansi berlebih pada belitan primer dan meningkatkan rugi-rugi.

