

HANDOUT
ANALISIS SISTEM TENAGA LISTRIK



OLEH: DRS. SUKIR, M.T

JURUSAN PT ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS NEGERI YOGYAKARTA

A. KOMPETENSI YANG DIHARAPKAN

Setelah mengikuti materi ini diharapkan peserta memiliki kompetensi antara lain sebagai berikut :

1. Mendeskripsikan kualitas daya listrik di industri.
2. Menjelaskan harmonik pada sistem tenaga listrik di industri.
3. Menjelaskan sisi praktis pemilihan motor listrik yang digunakan di industri.

B. INDIKATOR

Pencapaian kompetensi seperti tersebut di atas ditunjukkan dengan indikator antara lain :

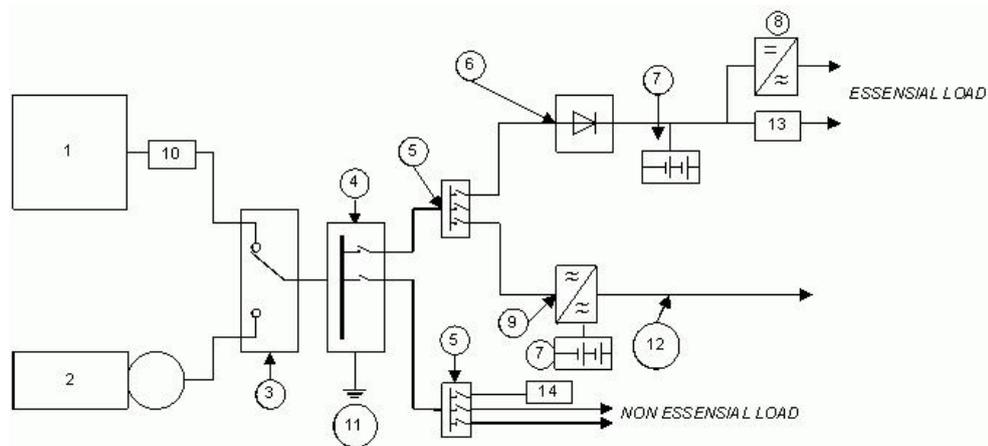
1. Mahasiswa dapat menjelaskan faktor-faktor yang mempengaruhi kualitas daya listrik di industri.
2. Mahasiswa dapat menjelaskan proses terjadinya harmonik pada distribusi tenaga listrik.
3. Mahasiswa dapat menjelaskan deret Fourier yang mempresentasikan harmonik pada gelombang terdistorsi distribusi tenaga listrik.
4. Mahasiswa dapat menjelaskan sumber-sumber harmonik pada distribusi tenaga listrik di industri.
5. Mahasiswa dapat menjelaskan efek harmonik pada distribusi tenaga listrik di industri.
6. Mahasiswa dapat menjelaskan eliminasi harmonik pada distribusi tenaga listrik di industri.
7. Mahasiswa dapat menjelaskan pengaruh perubahan tegangan terhadap efisiensi, arus dan faktor daya motor listrik di industri.
8. Mahasiswa dapat menjelaskan pertimbangan dalam pengadaan motor listrik di industri.
9. Mahasiswa dapat menjelaskan pengaruh beban terhadap efisiensi dan faktor daya motor listrik di industri.
10. Mahasiswa dapat menjelaskan prosedur peningkatan efisiensi motor listrik di industri.
11. Peserta dapat menjelaskan pemeliharaan motor listrik di industri.

C. MATERI

1. KUALITAS DAYA

Pada saat krisis energi termasuk energi listrik seperti saat ini, upaya penghematan energi listrik menjadi satu keharusan. Perilaku penggunaan energi listrik berpengaruh dominan terhadap pemborosan energi listrik, disamping itu pemborosan energi listrik juga diakibatkan oleh rugi-rugi yang ditimbulkan oleh peralatan listrik. Salah satu komponen pemborosan energi listrik pada aspek teknis adalah penurunan kualitas daya (*power quality*). Penurunan kualitas daya akan menyebabkan peningkatan rugi-rugi pada sisi beban, bahkan bisa menyebabkan penurunan kapasitas daya (*derating*) pada sisi pembangkitnya.

Sistem tenaga listrik di industri umumnya terdiri atas berbagai komponen seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Komponen-komponen tersebut tentu saja memiliki karakteristik sendiri-sendiri yang secara sistem akan memberikan pengaruh terhadap kualitas daya listrik di industri.



Gambar 1. Komponen sistem tenaga listrik di industri

Keterangan:

1. *Generator Diesel*
2. *State Electrical Company*
3. *Change Over Switch (COS)*
4. *Main Distribution Panel (MDP)*
5. *Sub Distribution Panel (SDP)*
6. *Rectifier*

7. *Battery Rectifier and UPS (Back Up)*
8. *Inverter*
9. *Un-interruptable Power Supply (UPS)*
10. *Power Quality Equipment (AVR, Electroflow, Capacitor bank, dsb.)*
11. *Grounding terminal*
12. *Essential AC load (equipment)*
13. *Essential DC load (central, transmission, dsb)*
14. *Non Essential AC load (AC, lamp, dsb)*

Kualitas daya merupakan hal penting dalam sistem tenaga listrik di industri. Sistem tenaga listrik di industri dengan kualitas daya yang baik berdampak pada terjaganya kontinuitas pelayanan daya listrik. Disamping itu mempengaruhi pula terpeliharanya keselamatan manusia dan peralatan dari sengatan listrik serta dapat menghemat energi listrik maupun biaya penggunaan listrik. Sebaliknya jika kualitas daya tidak baik maka akan mengganggu kinerja sistem tenaga listrik seperti sering terjadi gangguan kontinuitas pelayanan, hubung singkat, potensi kebakaran, pemborosan pembayaran rekening listrik, kerusakan pada alat-alat elektronika dan sebagainya.

Kualitas daya adalah syarat umum yang menggambarkan karakteristik parameter catuan seperti arus, tegangan, frekuensi dan bentuk gelombang dibandingkan dengan standar atau harapan/tuntutan (Heydt,1991). Sedangkan menurut Ducan (1996) menyebutkan "*The term Power Quality describes a broad subject that includes continuity of service, variation in voltage magnitude, transient voltages and currents, and harmonic content in the sinusoidal waveform.*"

Kualitas daya dapat dikatakan sebagai syarat mutu catuan listrik yang terjadi karena anomali pada parameter kelistrikan dalam komponen tegangan sumbernya. Suplai daya listrik dari generator pembangkit sampai ke beban dioperasikan dalam batas toleransi parameter kelistrikan seperti tegangan, arus, frekuensi dan bentuk gelombang. Anomali dan deviasi diluar batas toleransi pada parameter tersebut mempengaruhi kualitas daya yang menyebabkan operasi tidak efisien dan dapat merusak perangkat.

Beberapa contoh perangkat penyebab dan perangkat yang sangat sensitif terhadap rendahnya kualitas daya secara umum seperti contoh pada Tabel 1.

Tabel 1. Contoh perangkat penyebab dan perangkat yang sangat sensitif terhadap rendahnya kualitas daya

Perangkat Penyebab	Perangkat Sensitif
Komputer	Komputer
Mesin foto copy	Sistem kontrol
Perangkat konversi (Inverter, UPS, Rectifier, dan Converter) dengan Switch mode atau Thyristor	Telekomunikasi (digital)
Control (AVR, kapasitor bank), Thyristor Control	Kabel daya, kabel data
Switching beban besar	Building Management System
	Sistem signaling
	Alat ukur/meter
	Perangkat medis
	Diesel genset
	Switching (MCB,CB dll)

Dengan adanya penurunan kualitas daya, tidak sedikit peralatan-peralatan yang rusak, sehingga kerugian waktu, material dan biaya yang ditanggung cukup banyak serta dapat menyebabkan beberapa konsekuensi seperti :

- a. Kehilangan atau menurunkan tingkat produksi
- b. Kehilangan atau menyebabkan error data
- c. Tidak efisien (*life time* menurun dan biaya perbaikan tinggi)
- d. Keamanan personel, misalnya seseorang menyentuh bagian instalasi listrik yang bocor arusnya.

Permasalahan yang berkaitan dengan kualitas daya diantaranya adalah fluktuasi tegangan (*over/under voltage*), *noise*, harmonik yang mencakup *Total Harmonic Distortion* (THD), *Individual Harmonic Distortion* (IHD) dan *K-factor*. Hal lain yang berkaitan dengan kualitas daya yakni *sag*, *swell*, *transient*, variasi frekuensi, *flicker*, beban induktif yang berdampak pada turunnya faktor daya, ketidakseimbangan tegangan, ketidakseimbangan arus pada sistem tiga phase, efisiensi beban rendah dan sebagainya. Voltage sag adalah suatu penurunan tegangan dalam waktu yang sangat singkat antara 0,5 sampai 30 siklus yang biasanya diakibatkan oleh gangguan atau

starting beban-beban besar. Sag tegangan bias juga terjadi untuk waktu yang lebih lama dari 30 siklus sampai 3 detik (*momentary*) dan 3 detik sampai 1 menit (*temporary*). Swell mempunyai pengertian yang sama dengan sag namun pada konteks kenaikan tegangan. Sedangkan *transient* bisa terjadi secara *impulsif* maupun *oscilatory*. Mengingat keterbatasan waktu, maka dalam modul ini permasalahan yang berkaitan dengan kualitas daya dibatasi hanya pada harmonik dan sisi praktis pemilihan motor listrik untuk mendukung kualitas daya listrik pada sistem tenaga listrik di industri.

2. HARMONIK

a. Pengertian Harmonik

Perkembangan aneka jenis beban listrik di industri terutama yang mengandung rangkaian elektronika di dalamnya menyebabkan gelombang tegangan dan arus listrik berubah menjadi tidak sinus murni atau menjadi gelombang terdistorsi. Gelombang arus dan tegangan listrik terdistorsi tersebut mengakibatkan munculnya harmonik. Uraian harmonik pada distribusi tenaga listrik berikut mengacu pada Very Hidayat (2007).

Zaman dulu sebelum era elektronika modern, sumber daya listrik dimaksudkan untuk memberikan energi listrik pada beban lampu pijar, pemanas, penyearah dengan dioda dan lain-lain. Beban tersebut tidak mempengaruhi karakteristik pada tegangan, arus, frekuensi dan bentuk gelombang artinya bentuk gelombang tidak berubah (tetap) maka beban demikian disebut beban linear. Perkembangan teknologi elektronika dan teknologi sistem konversi dan kontrol yang menjadi beban sumber daya listrik akan mempengaruhi karakteristik pada tegangan, arus, frekuensi dan bentuk gelombang, artinya bentuk gelombang berubah atau cacat, beban tersebut disebut beban non linear.

Beban listrik yang digunakan jika tidak berpengaruh pada bentuk gelombang (sinus) sumbernya, maka disebut beban linear karena naik dan turunnya gelombang arus sesuai atau proposional dengan bentuk gelombang tegangan. Bila tegangan sumber sinusoidal maka arus yang melewati beban harus sinusoidal juga.

Beban listrik yang digunakan jika berpengaruh pada bentuk gelombang (sinus) sumbernya, maka disebut beban non linear karena naik dan turunnya

arus (gelombang) tidak sesuai dengan bentuk gelombang tegangan. Bila tegangan sumber sinusoidal maka arus lewat beban tidak sinusoidal lagi. Arus harmonik timbul akibat dari kenyataan bahwa peralatan mempunyai impedansi yang berubah tiap setengah gelombang dari e.m.f. yang bekerja atau dia membangkitkan e.m.f. balik dengan bentuk tidak sinusoidal.

Beban non linear akibat komponen non linear yang digunakan akan berpengaruh terhadap kecacatan bentuk gelombang input baik arus maupun tegangan dan kecacatan gelombang ini akan menimbulkan harmonik. Beban non linear menimbulkan perkalian frekuensi dasar (harmonik) pada gelombang dasarnya.

Menurut Suharjanto Muljono (2006) menjelaskan beberapa pengertian yang mengemukakan tentang harmonik diantaranya, sebagai berikut:

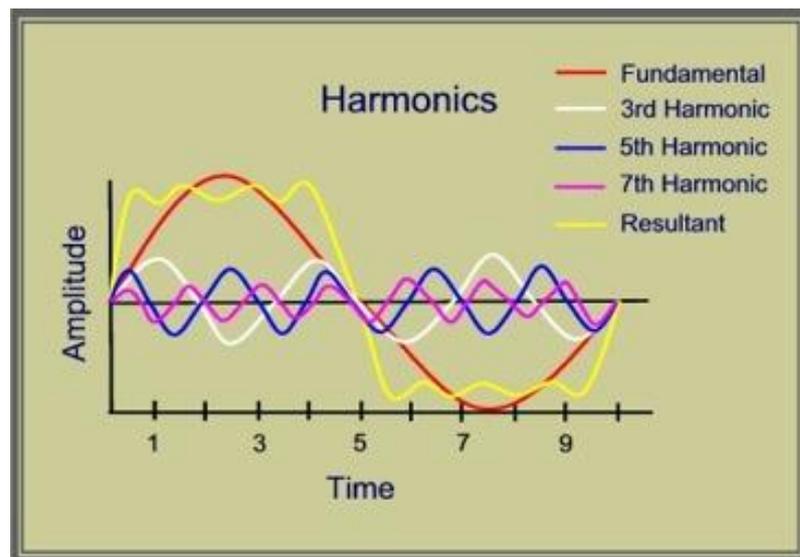
- a. Secara matematis adalah suatu komponen yang berorde lebih dari satu dari suatu fungsi periodik dengan analisa deret Fourier.
- b. Secara listrik adalah suatu karakteristik komponen yang mengakibatkan perubahan bentuk gelombang arus atau tegangan dari yang seharusnya (membuat cacat gelombang) atau sesuai teori bahwa non sinusoidal AC sama dengan jumlah sinusoidal dasar dengan komponen harmoniknya (perkalian dengan frekuensi dasarnya).
- c. Menurut kamus (Kamus Teknik listrik, K.G. Jackson, 1994):
 - 1) Harmonik adalah salah satu komponen sinus pada sebuah gelombang periodik kompleks yang mempunyai frekuensi sebesar perkalian integral dari frekuensi dasar gelombang tersebut.
 - 2) Cacat harmonik adalah perubahan bentuk gelombang akibat adanya komponen frekuensi tambahan.
- d. Harmonik pada beban non linear akan menimbulkan cacat gelombang yang akan merusak bentuk gelombang sumber dan menimbulkan harmonik perkalian bilangan bulat dari frekuensi dasar yang akan mengganggu sumber.
- e. Menurut IEC55-1 dan 55-2: *Harmonic (component) "A component of order greater than 1 of the Fourier series of a periodic quantity"*

Nanan Tribuana (1999) mengatakan, pada dasarnya, harmonik adalah gejala pembentukan gelombang-gelombang dengan frekuensi berbeda yang merupakan perkalian bilangan bulat dengan frekuensi dasarnya.

Kemudian pada modul ini digunakan dua kata distorsi harmonik karena lebih untuk menguatkan bahwa dua kata tersebut membentuk kesatuan makna bahwa gangguan akibat harmonik akan mendistorsi gelombang sumber baik arus maupun tegangan. Berubahnya gelombang arus dan tegangan ini mengindikasikan menurunnya kualitas daya. Istilah distorsi harmonik atau *harmonic distortion* banyak digunakan dalam jurnal penelitian maupun artikel yang membahas kualitas daya, antara lain:

- Dalam situs www.maxim-ic.com dikatakan bahwa definisi *harmonic distortion* adalah *the presence of frequencies in the output of a device that are not present in the input signal*.
- V.J. Gosbell (2000) mengatakan “*Harmonic distortion is the change in the waveform of the power supply voltage from the ideal sinusoidal waveform.*”
- Dalam jurnal yang ditulis pada situs www.mtecorp.com dengan judul *Economical Solutions to Meet Harmonic Distortion Limits* mengatakan “*Electric utilities, consulting engineers and major production or process facilities throughout the world are readily adopting various harmonic distortion standards....*”

Ilustrasi penguraian gelombang terdistorsi atas gelombang-gelombang penyusunnya seperti dicontohkan pada gambar 2.



Gambar 2. Gelombang terdistorsi atas gelombang-gelombang penyusunnya

Harmonik biasanya digunakan untuk mendefinisikan distorsi gelombang sinus arus dan tegangan pada amplitudo dan frekuensi yang berbeda. Beberapa harmonik dengan amplitudo dan frekuensi yang berbeda dapat membentuk satu gelombang terdistorsi. Tingkat dari besarnya gangguan akibat adanya harmonik pada tegangan atau arus adalah faktor distorsi, yaitu 100 kali harga (RMS) dari semua harmonik dibagi dengan harga RMS dari gelombang dasar. Besaran ini disebut *Total Harmonic Distortion* (THD) dan digunakan dalam satuan persen (%). Gelombang arus yang mengandung komponen harmonik disebut arus yang terdistorsi. Sumbangan masing-masing komponen harmonik terhadap distorsi arus maupun tegangan dinyatakan oleh *Individual Harmonic Distortion* (IHD), sedangkan sumbangan semua komponen harmonik terhadap distorsi arus ataupun tegangan dinyatakan oleh THD. IHD dan THD untuk gelombang arus didefinisikan pada persamaan di bawah ini:

$$I_{RMS} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \dots\dots\dots(1)$$

$$I_h = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} = \sqrt{I_{RMS}^2 - I_1^2} \dots\dots\dots(2)$$

$$IHD = \frac{I_n}{I_1} \times 100\%$$

$$THD_{\text{arus}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100\% = \sqrt{\frac{I_{RMS}^2 - I_1^2}{I_1^2}} \times 100\% \dots\dots\dots(3)$$

dimana:

$n = 2, 3, 4, \dots$

I_1 = Nilai efektif gelombang dasar

I_n = Nilai efektif gelombang harmonik ke-n

Semakin besar nilai THD maka arus semakin terdistorsi. Nilai THD untuk gelombang sinusoida murni adalah nol.

b. Deret Forier yang Mempresentasikan Harmonik.

Torema fourier menyatakan bahwa semua bentuk fungsi periodik non sinusiodal dapat direpresentasikan sebagai penjumlahan dari beberapa fungsi sebagai berikut (Schneider, 2000):

- 1) Sebuah bentuk sinusiodal pada frekuensi dasar.
- 2) Bentuk sinusiodal harmonik dimana frekuensi adalah perkalian dari frekuensi dasar.
- 3) Sebuah komponen DC yang dipakai.

Harmonik orde ke-n dalam suatu gelombang adalah n kali frekuensi dasar. Persamaan untuk perluasan harmonik dari suatu fungsi periodik adalah sebagai berikut:

$$y(t) = Y_0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n \sqrt{2} \sin(n\check{S}t - \{n\}) \dots\dots\dots(4)$$

dimana:

Y_0 = nilai dari komponen DC umumnya nol.

Y_n = nilai rms dari harmonik ke-n

= frekuensi anguler dari frekuensi dasar

ϕ_n = pergeseran dari komponen harmonik pada saat $t = 0$

Resultan arus dan tegangan kompleks dalam suatu rangkaian listrik linier merupakan penjumlahan dari masing-masing suku dasar dan suku harmonisnya. Demikian pula gelombang tegangan kompleks dapat diuraikan menjadi suku dasar dan suku harmonisnya. Pada tahun 1822, seorang matematikawan Perancis, Jean-Baptiste Joseph Fourier, memperkenalkan bahwa fungsi periodik kompleks dapat diturunkan menjadi suku-suku sinusiodal yang merupakan kelipatan dari frekuensi dasarnya. Secara matematis gelombang tegangan kompleks dapat dituliskan:

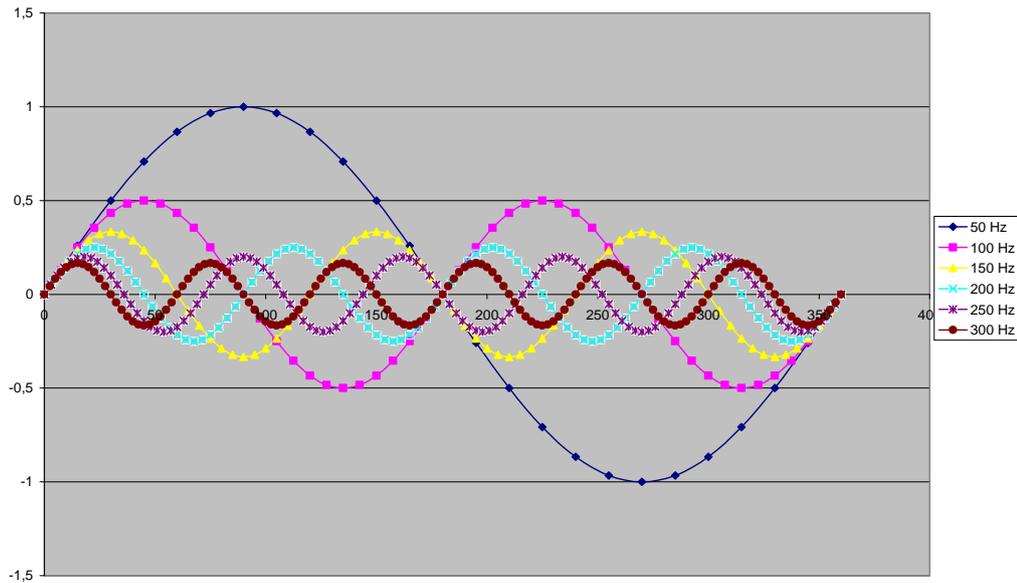
$$V = V_{1m} \sin(\check{S}t + \{1\}) + V_{2m} \sin(2\check{S}t + \{2\}) + \dots + V_{nm} \sin(n\check{S}t + \{n\}) \dots\dots\dots(5)$$

Dimana $\omega = 2\pi f$, f adalah frekuensi dasar gelombang kompleks dan $V_{1m} \dots V_{nm}$ adalah harga puncak tegangan dasar V_{1m} dan tegangan ke-2 sampai dengan ke-n. dengan cara yang sama nilai sesaat untuk arus kompleks dituliskan sebagai:

$$I = I_{1m} \sin(\check{S}t + w_1) + I_{2m} \sin(2\check{S}t + w_2) + \dots + I_{nm} \sin(n\check{S}t + w_n) \dots\dots\dots(6)$$

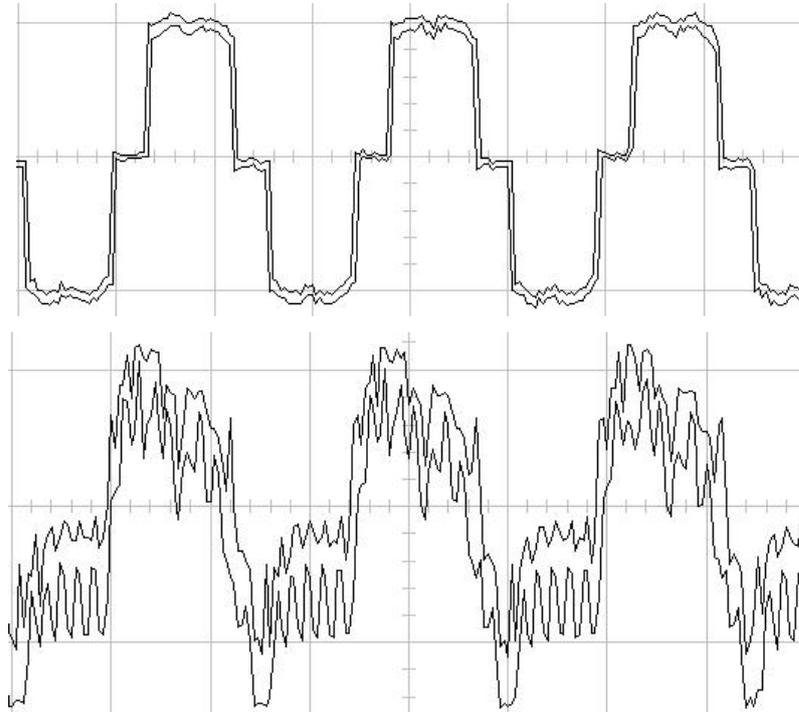
Jika pergeseran sudut fase tegangan dan arus pada frekuensi dasar dinotasikan sebagai ϕ_1 ($\phi_1 = \phi_{11}$), maka untuk harmonik ke-2 sampai ke-n pergeseran sudut fasenya dinotasikan sebagai $\phi_1 \dots \phi_n$, sehingga persamaan (6) di atas dapat dituliskan kembali dalam bentuk:

$$I = I_{1m} \sin(\check{S}t + r_1) + I_{2m} \sin(2\check{S}t + r_2) + \dots + I_{nm} \sin(n\check{S}t + r_n) \dots \dots (7)$$



Gambar 3. Gelombang dasar dan gelombang-gelombang sinus pembentuk harmonik.

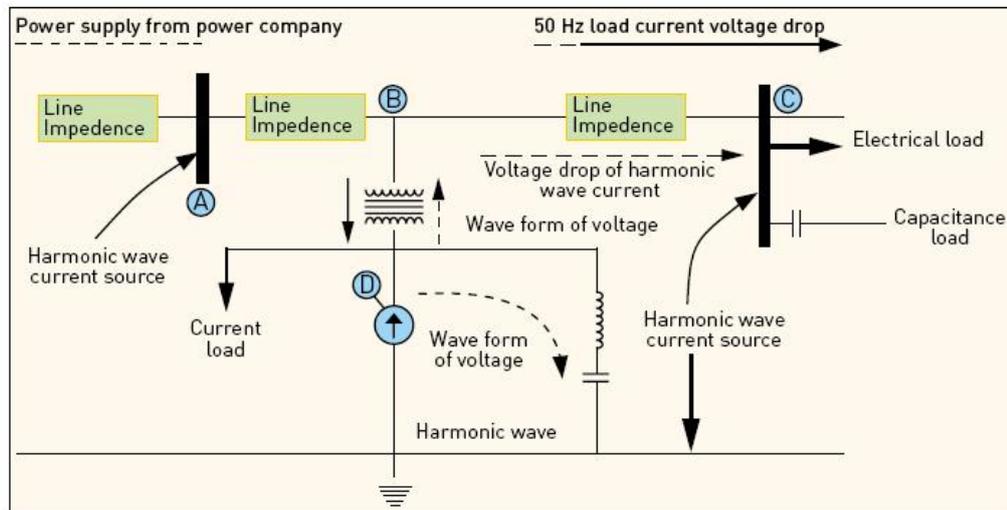
Jika gelombang-gelombang sinusoidal yang frekuensinya kelipatan dari frekuensi dasarnya atau kelipatan frekuensi harmoniknya disuperposisikan maka akan menghasilkan gelombang harmonik yang tidak sinus.



Gambar 4. Gelombang harmonik hasil superposisi dari gelombang-gelombang sinusoidal

c. Harmonik Arus dan Harmonik Tegangan

Daya yang diserap oleh beban non linier akan mengalir harmonik arus di sistem distribusi. Harmonik arus ini akan mengalir melalui impedansi dalam sistem sehingga menghasilkan harmonik tegangan. Impedansi dari konduktor naik pada saat fungsi frekuensi dari arus melewatinya. Untuk tiap arus harmonik orde ke- n terdapat suatu nilai impedansi Z_h pada rangkaian suplai. Arus harmonik I_h yang melalui impedansi menghasilkan tegangan harmonik V_h , dimana $V_h = Z_h \times I_h$ (aplikasi sederhana hukum ohm).



Gambar 5. Harmonik tegangan disebabkan harmonik arus

d. Sumber-sumber Harmonik

Diantara beberapa bagian sistem distribusi tenaga listrik di industri seperti tersebut di atas, terdapat bagian terutama beban yang menghasilkan harmonik. Menurut S. M. Halpin (2001), secara garis besar beban-beban yang menghasilkan harmonik dapat dikelompokkan menjadi tiga, yaitu:

- 1) *Arcing loads*. Karakter gelombang yang diakibatkan oleh jenis beban ini menimbulkan gelombang yang bersifat acak. Jenis beban ini seperti tanur listrik (*electric arc furnace*), lampu *flourecent*, lampu *mercury*, lampu *xenon* dan lampu *neon*.
- 2) *Semiconductor converter loads*. Karakter gelombang yang diakibatkan oleh jenis beban ini bersifat terpola. Beban ini seperti *static power converter (rectifiers* atau *inverters*), pengisi baterai (*bateray chargers*), *electronic ballast*, *variable frequency*, *thyristor ac power controllers*, *thyristor-controlled reactor (TCR)*, *silicon controlled rectifier (SCR)*, *adjustable speed drive (ASD)*, *Static Var Compensator (SVC)*, *Static Watt Compensator (SWC)*, UPS, dan lain-lain.
- 3) *Loads with magnetic saturation of iron cores*. Beban ini memiliki karakter gelombang terpotong. Jenis beban ini seperti *overexcited transformer*.

e. Efek Harmonik

Harmonik memiliki banyak efek negatif pada sistem tenaga listrik. Dampak yang paling besar adalah peningkatan panas pada peralatan sistem tenaga listrik, terutama pada transformator. Peningkatan panas ini disebabkan karena selain oleh arus pada frekuensi dasar, *eddy current losses* juga dihasilkan oleh arus harmonik. Peningkatan *eddy current* ini meningkatkan suhu dan mengurangi umur kerja transformator. Sehingga sebelum menggunakan transformator pada beban yang menimbulkan harmonik harus ditentukan dahulu nilai *K-factor Transformer*.

K-factor Transformer adalah faktor pengali dari *eddy current losses*. Penghantar yang dilewati oleh arus nonlinier dengan *K-factor* sebesar k, memiliki k kali rugi-rugi jika dilewati arus linier. Untuk mencari *K-factor Transformer* yang akan menyuplai daya beban harmonik adalah dengan rumus sebagai berikut:

$$K - faktor = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} n^2 I_n^2}}{I_{RMS}^2} \dots\dots\dots(8)$$

dimana:

n = 1,2, 3, 4, ...

In = Nilai arus efektif gelombang harmonik ke-n

I_{RMS} = Jumlah nilai arus fundamental dan arus harmonik

Banyak sekali efek atau akibat lain yang ditimbulkan masalah harmonik. Mengutip dari beberapa referensi dan sumber hasil penelitian dapat dihimpun efek-efek yang ditimbulkan dari harmonik, antara lain:

- 1) Merusak kapasitor bank karena terjadi resonansi harmonik. Unjuk kerja sikring terganggu. Karakteristik arus waktu dari fuse dapat berubah.
- 2) Menambah rugi-rugi, pemanasan, torsi harmonik dan getaran pada motor induksi dan motor sinkron.
- 3) Motor induksi akan mengalami kegagalan start dan berputar pada kecepatan subsinkron (*subsynchronous speeds*).
- 4) Bertambahnya arus urutan negatif pada generator yang dapat membahayakan rotor dan lilitan.

- 5) Meningkatnya panas *eddy current*, menimbulkan fluk harmonik dan meningkatkan *fluk density* pada transformator.
- 6) Terjadi tegangan dan arus lebih pada sistem karena terjadi resonansi.
- 7) Kawat netral berarus sehingga menyebabkan kabel menjadi panas, kemudian menurunkan dielektrik kulit kabel.
- 8) Rele proteksi akan mengalami perilaku yang tak menentu (*erratic behaviour*) atau malfungsi, terutama pada kontrol yang menggunakan mikroprosesor dan *solid-state*.
- 9) Timbulnya getaran mekanis pada panel listrik yang merupakan getaran resonansi mekanis akibat harmonik arus frekuensi tinggi. Harmonik dapat menimbulkan tambahan torsi pada kWh meter jenis elektromekanis yang menggunakan piringan induksi berputar. Sebagai akibatnya terjadi kesalahan penunjukkan kWh meter karena piringan induksi tersebut dirancang hanya untuk beroperasi pada frekuensi dasar.
- 10) Interferensi frekuensi pada sistem telekomunikasi karena biasanya kabel untuk keperluan telekomunikasi ditempatkan berdekatan dengan kawat netral. Harmonik ke tiga pada kawat netral dapat memberikan induksi harmonik yang mengganggu sistem telekomunikasi.
- 11) Pemutus beban dapat bekerja di bawah arus pengenalnya atau mungkin tidak bekerja pada arus pengenal.
- 12) Kerusakan pada sistem komputer, jaringan komunikasi dan jalur telepon.

Tentunya efek-efek harmonik yang telah disebutkan di atas akan menimbulkan pengaruh ekonomis yang sangat signifikan. Mengurangi umur peralatan berarti peralatan harus diganti lebih cepat. Beban lebih pada sistem distribusi mengakibatkan level pelanggan daya dituntut untuk dinaikkan dengan rugi-rugi daya tambahan, jika tidak instalasi harus ditingkatkan. Distorsi pada arus dapat menyebabkan *trip* dan menghentikan peralatan produksi

Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) merupakan lembaga atau organisasi internasional yang menangani masalah listrik dan elektronika. Lembaga ini melakukan penelitian dan analisis untuk menetapkan standar atau batas sebagai aturan yang menjadi referensi kelistrikan dan elektronika di beberapa negara di dunia. Standar IEEE no. 519 tahun 2002 telah menetapkan batas distorsi untuk gelombang arus dan

tegangan pada sistem transmisi dan distribusi listrik. Distorsi untuk tegangan didasarkan pada nilai nominal tegangan yang bekerja, sementara untuk distorsi arus dibatasi berdasarkan nilai perbandingan antara arus hubung singkat dan arus beban (SCA/I_L). Standarisasi distorsi tegangan juga dibatasi berdasarkan distorsi yang disebabkan oleh tiap-tiap frekuensi harmonik, sedangkan untuk standarisasi distorsi arus dibatasi berdasarkan distorsi yang disebabkan oleh frekuensi harmonik khusus, yang menjadi dasar frekuensi harmonik lainnya. Pada tabel 2 dan 3 adalah besarnya batas distorsi tegangan dan arus berdasarkan standar IEEE 519 dalam S. M. Halpin (2001).

Tabel 2. Batas distorsi tegangan sistem transmisi dan distribusi listrik

Nominal Voltage	Individual Harmonic Order	THD
$V < 69 \text{ kV}$	3,0 %	5,0 %
$69 \text{ kV} < V < 161 \text{ kV}$	1,5 %	2,5 %
$V > 161 \text{ kV}$	1,0 %	1,5 %

Tabel 3. Batas distorsi arus

SCA/IL	Individual harmonic order (h) current distortion limit					THD
	H < 11	11 h < 17	17 h < 23	23 h < 35	H 35	
$V_{\text{supply}} < 69 \text{ kV}$						
< 20	4,0 %	2,0 %	1,5 %	0,6 %	0,3 %	5,0 %
20 – 50	7,0 %	3,5 %	2,5 %	1,0 %	0,5 %	8,0 %
50 – 100	10,0 %	4,5 %	4,0 %	1,5 %	0,7 %	12,0 %
100 – 1000	12,0 %	5,5 %	5,0 %	2,0 %	1,0 %	15,0 %
> 1000	15,0 %	7,0 %	6,0 %	2,5 %	1,4 %	20,0 %
SCA/IL	Individual harmonic order (h) current distortion limit					THD
	H < 11	11 h < 17	17 h < 23	23 h < 35	H 35	
$69 \text{ kV} < V_{\text{supply}} < 161 \text{ kV}$						
< 20	2,0 %	1,0 %	0,75 %	0,3 %	0,15 %	2,5 %
20 – 50	3,5 %	1,75 %	1,25 %	0,5 %	0,25 %	4,0 %
50 – 100	5,0 %	2,25 %	2,0 %	1,25 %	0,35 %	6,0 %
100 – 1000	6,0 %	2,75 %	2,5 %	2,0 %	0,5 %	7,5 %

> 1000	7,5 %	3,5 %	3,0 %	2,5 %	0,7 %	10,0 %
V 161 kV						
< 50	2,0 %	1,0 %	0,75 %	0,3 %	0,15 %	2,5 %
50	3,5 %	1,75 %	1,25 %	0,5 %	0,25 %	4,0 %

f. Eliminasi Harmonik

Besarnya biaya yang perlu dikeluarkan karena terjadinya rugi-rugi akibat harmonik bersifat relatif. Hal ini tergantung dari kondisi beban, waktu beroperasi, dan panjang kabel yang digunakan pada sistem tersebut. Eliminasi atau mitigasi harmonik dapat mengkompensasi biaya tersebut. Beberapa cara yang dapat dilakukan untuk mereduksi harmonik:

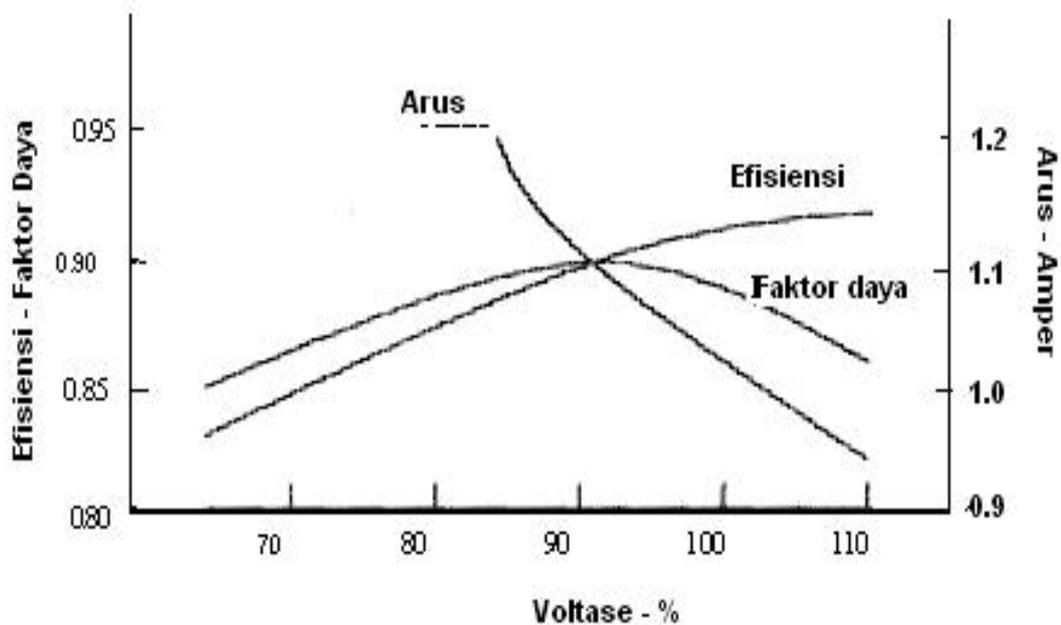
- 1) Peralatan dapat didesain untuk dapat menahan efek harmonik, seperti transformator, kabel, dan motor dapat didesain ulang. PWM inverter dipasang isolasi untuk menahan pengaruh dv/dt yang tinggi.
- 2) Pemasangan *filter* pasif pada posisi yang tepat.
- 3) Teknik *filter* aktif yang lebih umum, disertakan pada peralatan yang menghasilkan harmonik dapat mereduksi timbulnya harmonik pada sumber. Kombinasi *hybrid* antara aktif dan pasif *filter* sangat memungkinkan.
- 4) Teknik alternatif yang lain untuk membatasi harmonik pada sumber, seperti multiplikasi fase, operasi dengan jumlah pulsa yang banyak, konverter dengan reaktor interfase, teknik *wave-shaping* aktif, pembuatan kompensasi harmonik pada peralatan yang dapat menimbulkan harmonik.

3. Sisi Praktis Pemilihan Motor Listrik Di Industri

Pada umumnya beban listrik terbesar di industri adalah berupa motor listrik. Dalam rangka mendukung kualitas daya listrik di industri maka perlu kiranya dilakukan hal-hal yang berkaitan dengan pemilihan motor listrik sebagai beban listrik di industri. Uraian sisi praktis pemilihan motor listrik untuk mendukung kualitas daya listrik di industri berikut ini mengacu pada Parlindungan Marpaung (2006).

a. Pengaruh Perubahan Tegangan Terhadap Efisiensi, Arus dan faktor daya Motor Listrik Di Industri

Berkaitan dengan tegangan kerja motor listrik, umumnya pabrik pembuat motor merekomendasikan bahwa perubahan tegangan dari tegangan motor yang seharusnya (*rated voltage*) tidak melebihi $\pm 10\%$ pada frekuensi yang seharusnya (*rated frequency*). Dalam desain motor, pabrik pembuat motor biasanya memberikan toleransi untuk penurunan tegangan (*voltage drop*) pada sistem distribusi listrik di pabrik. Sebagai contoh, untuk sistem tegangan 415 V, tegangan motor (*rated voltage*) dibuat sekitar 400 V. Perubahan tegangan dapat memberikan pengaruh yang cukup berarti terhadap efisiensi motor seperti terlihat pada Tabel 4 serta akan mempengaruhi parameter-parameter lainnya dan cenderung memperpendek umur motor. Seperti terlihat pada Tabel 4, perubahan tegangan yang lebih tinggi dari *rated voltage* motor akan mengakibatkan turunnya efisiensi dan *power factor*. Perubahan tegangan harus dihindari dan tegangan harus diukur pada waktu pemeriksaan.

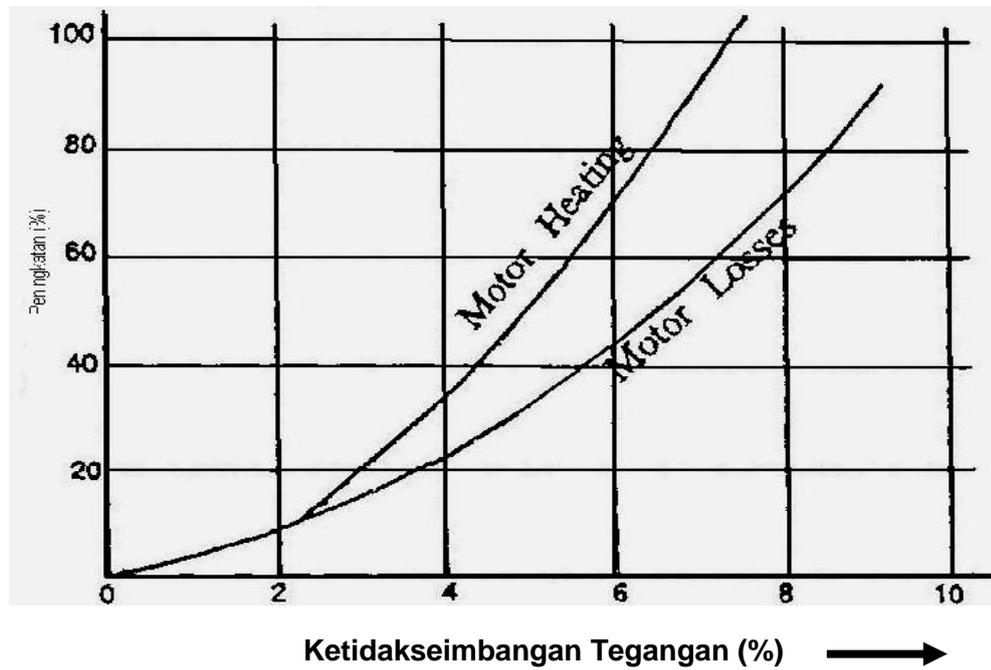


Gambar 6. Pengaruh Perubahan Voltase Terhadap Efisiensi, Faktor Daya dan Arus Motor

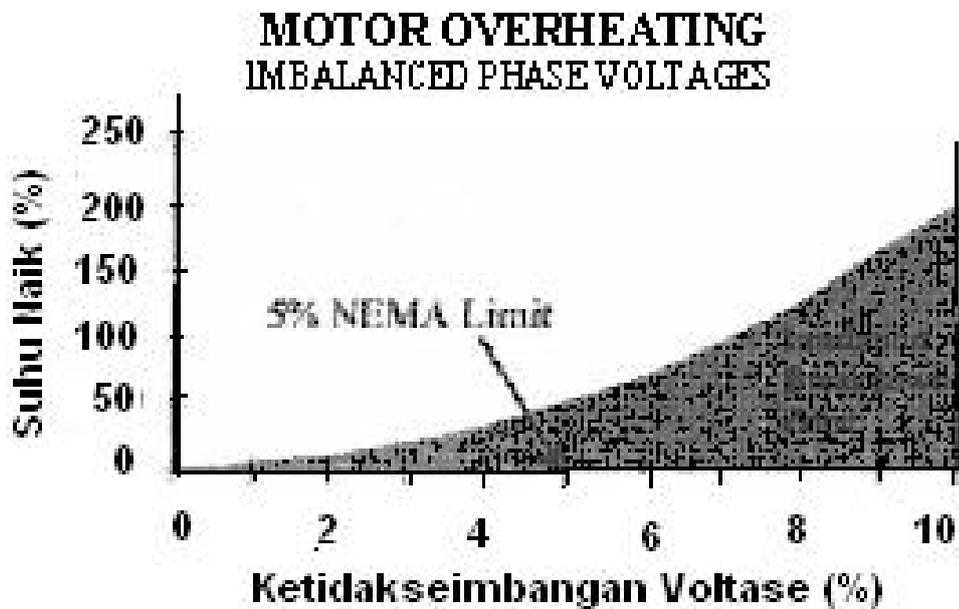
Tabel 4. Pengaruh perubahan Voltase pada Performance Motor Induksi

Karakteristik Operasi	Pengaruh perubahan voltase		
	90% voltase	110% voltase	120% voltase
<i>Torsi starting & maximum</i>	Naik 19%	Naik 19%	Naik 44%
<i>Synchronous speed</i>	Tidak berubah	Tidak berubah	Tidak berubah
<i>Percent slip</i>	Naik 23%	Turun 17%	Turun 30%
<i>Full-load speed</i>	Turun 1-1/2%	Naik 1%	Naik 1-1/2%
<i>Arus starting</i>	Turun 10-12%	Naik 10-12%	Naik 25%
<i>Arus full-load</i>	Naik 1-5%	Naik 2-11%	Naik 15-35%
<i>Suhu pada full load</i>	Naik 6-12%	Naik 4-23%	Naik 30-80%
<i>Standard NEMA design B motors Efficiency</i>			
<i>Full load</i>	Naik ½-1%	Turun 1-4%	Turun 7-10%
<i>¾ load</i>	Naik 1-2%	Turun 2-5%	Turun 6-12%
<i>½ load</i>	Naik 2-4%	Turun 4-7%	Turun 14-18%
<i>Power Factor</i>			
<i>Full load</i>	Naik 8-10%	Turun 10-15%	Turun 10-30%
<i>¾ load</i>	Naik 10-12%	Turun 10-15%	Turun 10-30%
<i>½ load</i>	Naik 10-15%	Turun 10-15%	Turun 15-40%

Apabila motor tiga fase yang mendapat pasokan tegangan yang tidak seimbang maka akan mengakibatkan aliran arus yang tidak merata antar fase-fase belitannya. Pengaruh tegangan tak seimbang ini terhadap motor listrik adalah pemanasan dan rugi-rugi meningkat seperti ditunjukkan pada Gambar 7 berikut. Dengan tambahan panas yang cukup besar tersebut, maka isolasi belitan motor juga mengalami pengurangan usia yang akan menambah biaya pemeliharaan secara drastis. Efek dari ketidak seimbangan tegangan sebagaimana diuraikan di atas jelas adalah penurunan kinerja motor, artinya efisiensi motor berkurang serta kemungkinan timbulnya vibrasi yang merusak bantalan motor. Dengan ketidakseimbangan sebesar 5 % sebagai contoh, dapat menaikkan rugi-rugi motor sampai 33 % .

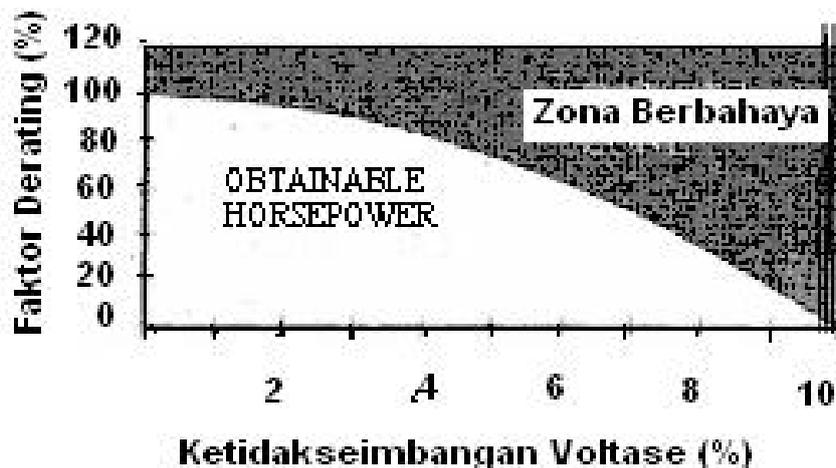


Gambar 7. Pengaruh tegangan tak seimbang vs rugi-rugi dan pemanasan motor.



Gambar 8: Pengaruh tegangan tak seimbang vs pemanasan motor.

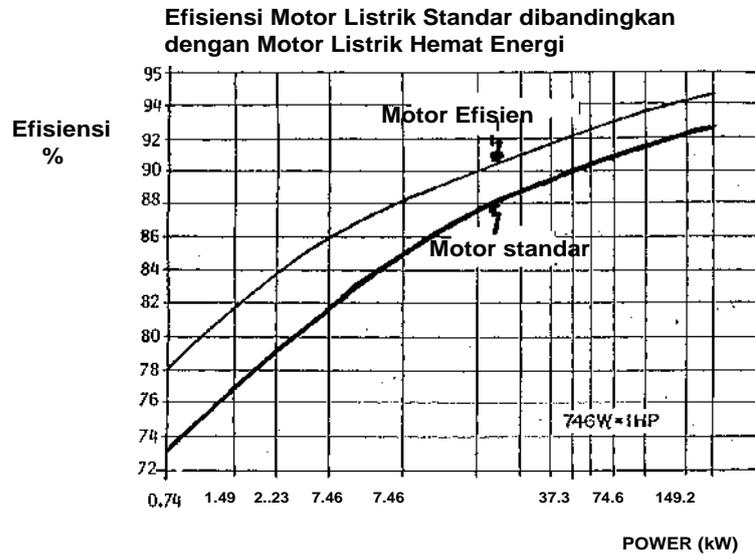
HORSEPOWER DERATING IMBALANCED PHASE VOLTAGES



Gambar 9. Pengaruh tegangan tak seimbang vs rugi-rugi motor.

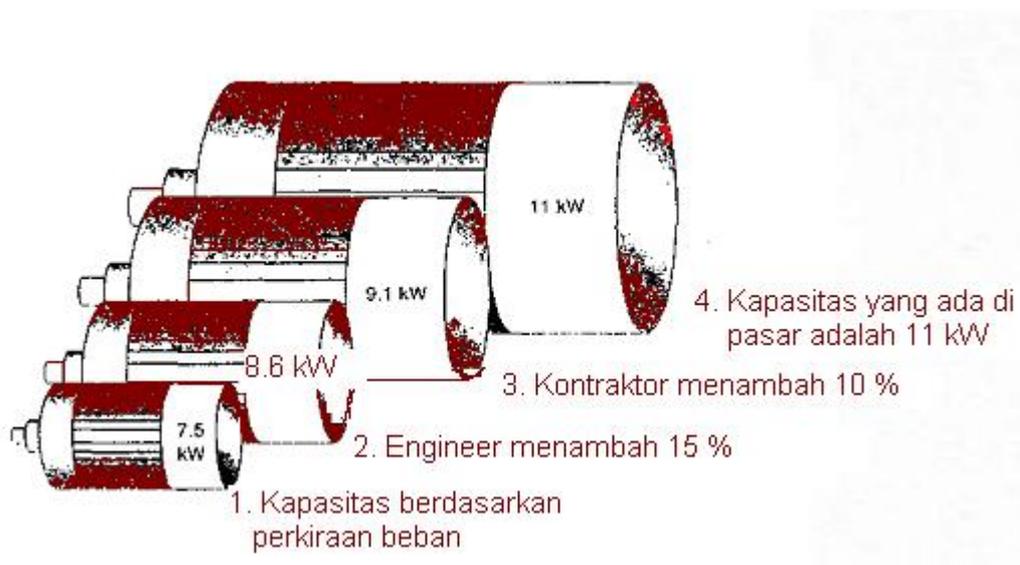
b. Pertimbangan Dalam Pengadaan Motor Listrik Di Industri.

Pemilihan jenis motor yang tepat adalah langkah awal program penghematan energi. Proses pemilihan motor listrik dilakukan dengan memperhatikan beberapa faktor terutama harga pembelian. Pemilihan jenis motor pada saat pembelian umumnya didasarkan atas harga yang murah, meskipun harga pembelian yang murah biasanya tidak menguntungkan pada jangka panjang karena efisiensi motor yang murah biasanya rendah. Motor yang relatif murah biasanya adalah dari jenis motor standard, tipe lain adalah motor efisiensi tinggi (*high efficient motor*) dengan harga sekitar 20-30 % lebih mahal. Perbedaan efisiensi kedua jenis motor listrik ini dapat dilihat pada grafik berikut.



Gambar 10. Grafik Perbedaan Efisiensi Motor Standard dan Motor Efisiensi Tinggi

Berkaitan dengan disain ukuran dan pemilihan motor ditentukan berdasarkan beban yang akan dipikul serta efisiensi operasi motor dengan mengikuti alur diagram berikut :



Gambar 11. Alur Pemilihan Motor.

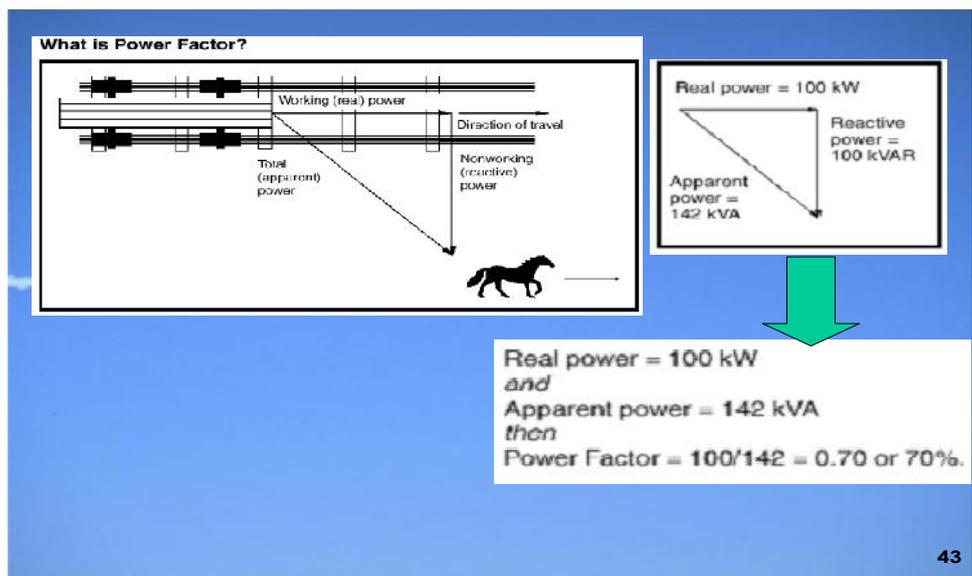
Pada kenyataanya pemilihan motor dilakukan dengan pertimbangan keamanan operasi dalam arti memilih ukuran motor agak lebih besar dari pada yang seharusnya diperlukan (*oversized*). Dengan motor kecil (*undersized*) dikhawatirkan dalam operasi motor tidak mampu menanggung beban. Hal ini benar, namun motor dengan ukuran terlalu besar akan merugikan yaitu menyebabkan efisiensi operasi rendah sehingga biaya operasi juga besar. Disamping itu, ukuran motor yang terlalu besar akan menyebabkan biaya investasi besar dan dalam operasinya akan selalu pada beban dan *power factor* yang rendah. Kondisi ini tentu saja akan memberi kontribusi rendahnya efisiensi operasi dan *power factor* seluruh pabrik.

c. Pengaruh Beban Terhadap Efisiensi dan Faktor daya Motor Listrik

Faktor daya adalah perbandingan antara *true power* (kW) dengan *apparent power* (kVA). *True power* atau daya nyata adalah daya yang menghasilkan kerja, sedangkan *apparent power* atau daya semu adalah daya yang dihitung berdasarkan arus semu/reaktif. Jika faktor daya kurang dari 0,85 dikenakan *finalty* PLN

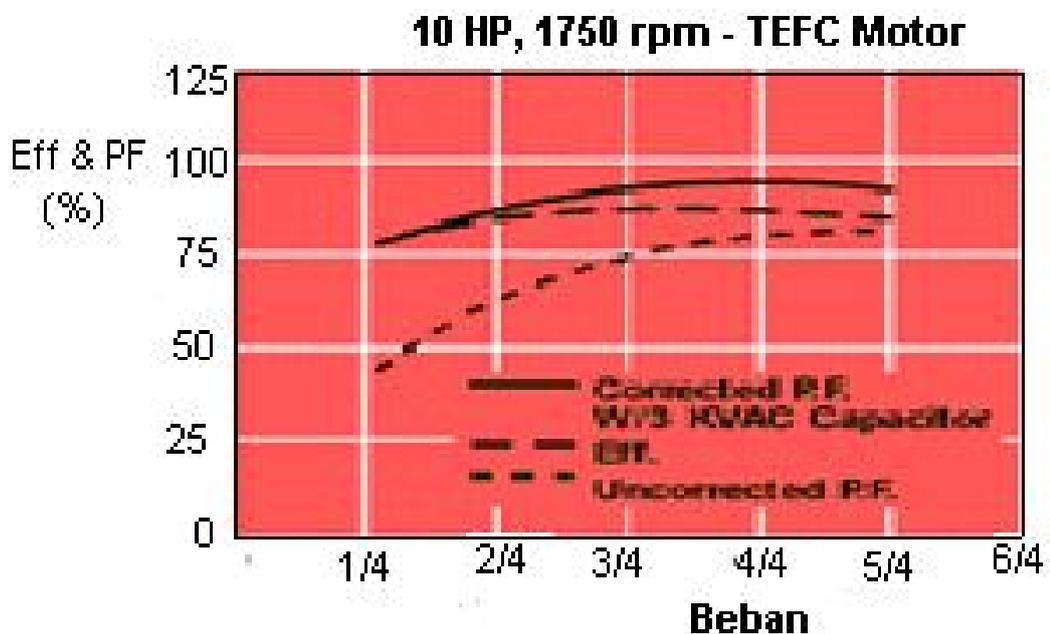
$$\text{Faktor daya} : \frac{kW}{kVA} \dots\dots\dots(9)$$

Power faktor juga dapat dijelaskan sebagaimana dalam Gambar 12. berikut :



Gambar 12. Faktor Daya

Pada Gambar 13. terlihat hubungan antara efisiensi dengan beban motor. Pada beban 50 % atau lebih, motor mempunyai efisiensi yang hampir konstan atau tetap. Sebaliknya, pada beban yang lebih rendah, efisiensi akan berkurang secara tajam. Oleh karena itu harus dihindari kondisi dimana motor beroperasi tanpa beban atau dengan beban rendah karena efisiensinya akan sangat rendah. Berkurangnya *power factor* karena beban rendah akan memberi akibat lain yang jauh lebih buruk dari pada penurunan efisiensi motor. Oleh karena itu menghindari operasi motor pada kondisi beban rendah adalah cara yang tepat untuk menghemat energi.



Gambar 13. Pengaruh Beban operasi terhadap Efisiensi dan Faktor Daya Motor

Gambar 13 juga memperlihatkan pengaruh beban motor terhadap *power factor*. Pengaruh akibat berkurangnya *power factor* misalnya karena beban rendah, pada kenyataannya, jauh lebih besar dari pada berkurangnya efisiensi. Oleh karena itu hal tersebut juga merupakan alasan yang baik untuk menghindari atau meminimumkan motor beroperasi pada kondisi tanpa beban atau beban rendah.

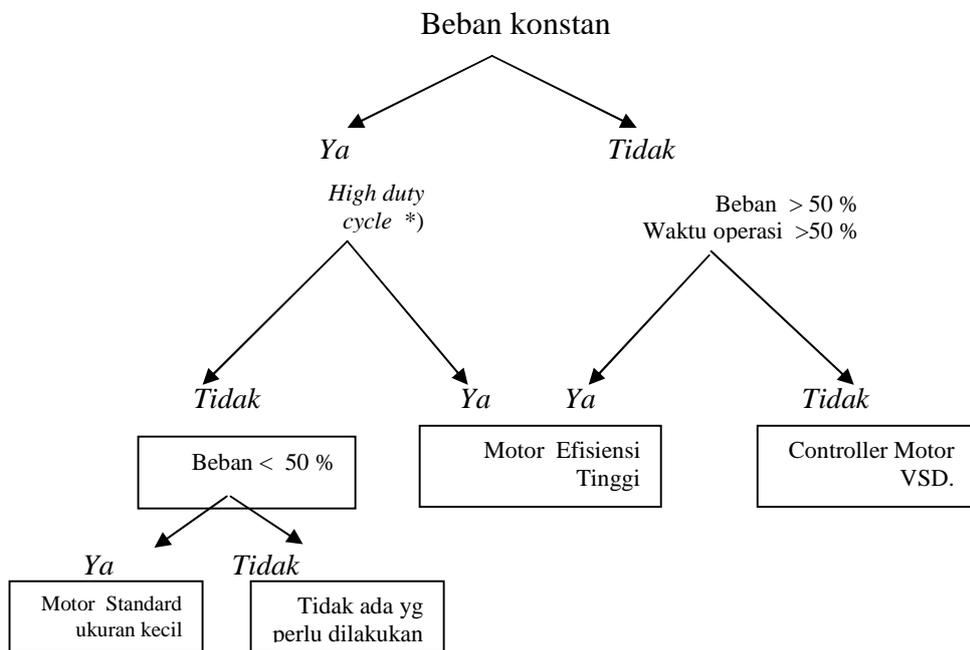
Pada waktu memilih motor, kebanyakan diambil cara yang aman dalam arti memilih motor yang agak lebih besar ukurannya dari pada yang diperlukan seharusnya (*oversized*). Dengan motor yang lebih kecil (*undersized*) mungkin tidak dapat menanggung beban, namun demikian

motor yang terlalu besarpun akan menyebabkan besarnya biaya investasi awal dan juga rendahnya efisiensi operasi karena bebannya relatif rendah.

Meskipun tidak dikehendaki adanya motor yang terlalu besar, namun dalam batas-batas tertentu tidak selamanya motor yang *oversized* kurang efisien. Kalau dilihat tabel dan gambar diatas sebagai contoh, terlihat bahwa motor 10 HP dengan beban sebesar 7,5 HP mempunyai efisiensi 85 %. Sedangkan motor 7,5 HP yang beroperasi dengan beban penuh, hanya mempunyai efisiensi sebesar 84 %. Pada kasus ini, dengan sendirinya tidak *cost-effective* kalau kita mengganti motor yang *oversized* tersebut dengan motor yang lebih kecil dengan alasan meningkatkan efisiensi.

d. Prosedur Peningkatan Efisiensi Motor Listrik.

Efisiensi operasi motor listrik dapat ditingkatkan dengan berbagai cara sebagaimana dapat dilihat pada diagram berikut.



Keterangan : *High duty cycle*, jika motor beroperasi pada sekitar beban penuh hampir sepanjang operasinya

Gambar 14 . Diagram prosedur pemilihan motor – putaran konstan

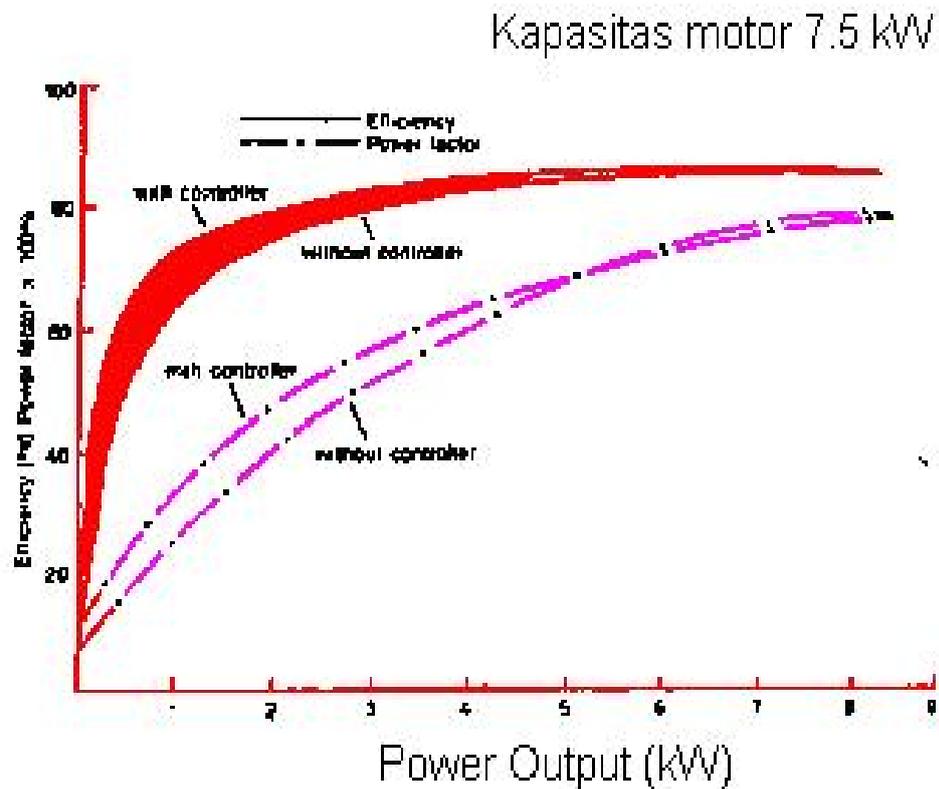
1). **Beban Motor Konstan :**

Apabila motor listrik beroperasi secara terus menerus dengan kondisi beban relatif konstan atau dengan kata lain tidak ada perubahan beban yang cukup berarti terhadap waktu (*heavy duty cycle*) seperti terlihat pada alur diagram diatas (kesebelah kiri), maka kriteria pemilihan motor didasarkan atas *rated load efficiency*. Jika motor beroperasi selalu pada beban konstan dan *full load* maka motor yang direkomendasikan untuk kondisi seperti ini adalah motor efisiensi tinggi (*high efficiency motor*). Motor efisiensi tinggi mengkonsumsi energi listrik lebih sedikit dibandingkan dengan motor standar untuk semua kondisi beban. Oleh karena itu jika terjadi penggantian motor misalnya pada saat adanya kerusakan motor yang lama (standar) maka motor efisiensi tinggi adalah pilihan yang dianjurkan. Karena dari segi biaya operasi pemakaian motor ini sangat menarik khususnya jika dihitung dalam *life time cost*. Biasanya *payback period* kurang dari dua tahun utamanya jika jam operasi pertahun adalah besar misalnya diatas 4000 jam per tahun pada beban penuh (*rated load*). Apabila beban motor rendah atau kurang dari *rated load* maka *payback period* akan menjadi lebih lama. Jika motor listrik beroperasi dengan beban konstan tetapi kurang atau jauh dibawah *rated load*, maka pilihan yang terbaik untuk kondisi ini adalah menggunakan motor ukuran kecil.

2). **Beban Operasi Motor Berubah-ubah.**

Jika dari diagram diatas misalnya ditemukan motor dioperasikan pada beban berubah-ubah (lihat diagram dengan alur sebelah kanan), dan motor dibebani kurang dari 50 % dengan waktu operasi beban juga kurang dari 50 % dari total jam operasinya, maka agar motor dapat hemat penggunaan energinya, sebaiknya menggunakan *controller* misalnya *Variable Speed Drive* (VSD). Penggunaan *controller* pada motor seperti inverter perlu untuk mengatur agar motor dapat melayani perubahan beban pada tingkat efisiensi yang optimum. Agar inverter atau *variable speed drive* (VSD) berfungsi, maka harus ada *feedback* dari parameter yang diukur ke dalam VSD sirkuit pengatur. VSD misalnya dapat dikontrol oleh tekanan, suhu, putaran, aliran volumetrik dan lain-lainnya. Perbaikan efisiensi operasi motor

dengan *controller* dapat dilihat pada gambar dibawah dan contoh kasus penggunaan motor hemat energi dibandingkan dengan motor *standard* pada gambar berikutnya.



Gambar 15. Perbaikan efisiensi motor dengan menggunakan *controller*

Meskipun telah dipilih motor yang efisien, bukan berarti bahwa masalah pemborosan energi tidak lagi terjadi. Beberapa faktor lain seperti operasional maupun pemeliharaan cukup berpengaruh terhadap efisiensi dan biaya operasi motor.

e. Contoh Penghematan Energi pada Motor listrik

Efisiensi nominal seperti pada tabel berikut berguna untuk membandingkan efisiensi relatif dari berbagai ukuran motor, selain itu range efisiensi pada setiap ukuran motor juga menarik. Variasi pada range ini menunjukkan perbedaan yang cukup berarti pada biaya pengoperasian, seperti yang ditunjukkan dalam contoh berikut :

Hitunglah penghematan biaya per tahun dari motor 25 HP yang beroperasi pada efisiensi 90% dibandingkan dengan efisiensi 85 %.

Pada efisiensi 85 % :

$$\text{Input daya listrik : } \frac{25 \times 746}{0,85} = 21941 \text{ W}$$

Pada efisiensi 90 % :

$$\text{Input daya listrik : } \frac{25 \times 746}{0,9} = 20722 \text{ W}$$

Perbedaan input daya : $21941 - 20722 = 1160 \text{ W}$.

Untuk operasi selama 8000 jam/tahun dengan harga listrik Rp.450/kwh, maka penghematan : $1160/1000 \times 8000 \times 450 = \text{Rp. } 4.176.000,-/\text{tahun}$

Ternyata perbedaan persentase efisiensi sedikit saja dapat mengakibatkan perbedaan biaya operasi yang cukup berarti, apabila dilihat per tahunnya. Hal ini menjadi perhatian bagi calon pembeli atau pemakai motor, karena ada motor yang dibuat dengan efisiensi yang lebih rendah dari efisiensi motor standard. Pada tabel berikut memperlihatkan bahwa dengan menambah investasi sedikit dalam membeli motor yang mempunyai efisiensi yang lebih tinggi, maka akan dapat terbayar kembali dalam beberapa bulan saja. Maka dari itu membeli motor yang lebih murah sering merupakan penghematan yang palsu karena efisiensinya lebih rendah.

Tabel 5. Full-Load Efficiencies of Standard Three-Phase Induction Motors

HP	Nominal Efisiensi Range (%)	Rata-rata Nominal Efisiensi (%)
1	68.0 – 78.0	73.0
1.5	68.0 – 80.0	75.0
2	72.0 – 81.0	77.0
3	74.0 – 83.0	80.0
5	78.0 – 85.0	82.0
7.5	80.0 – 87.0	84.0
10	81.0 – 88.0	85.0
15	83.0 – 89.0	86.0
20	84.0 – 89.0	87.5
25	85.0 – 90.0	88.0

30	86.0 - 90,5	88.5
40	87.0 - 91,5	89.5
50	88.0 - 92.0	90.0
60	88,5 - 92.0	90.5
75	89,5 - 92,5	91.0
100	91.0 - 93.0	91.5
125	90.5 - 93.0	92
150	91.0 - 93.5	92.5
200	91.5 - 94.0	93
250	91.5 - 94.5	93.5

Berdasarkan contoh tersebut memperlihatkan bahwa membeli motor harus memperhatikan efisiensinya agar mendapatkan keuntungan ekonomis. Setiap pembeli harus memeriksa dan melihat efisiensi motor yang akan dibeli dan membandingkan dengan motor lain yang ada. Untuk membandingkan penghematan yang akan diperoleh atas motor yang lebih efisien terhadap motor lainnya, dapat dipakai rumus sebagai berikut :

$$S = 0,746 \times hp \times L \times C \times N \left\{ \frac{100}{E_s} - \frac{100}{E_e} \right\} \dots\dots\dots(10)$$

Dimana :

- S : Penghematan biaya listrik, Rp/tahun
- Hp : *Horsepower*
- L : *Load factor*
- C : harga listrik, Rp/kwh
- N : waktu operasi, jam/tahun
- Es : efisiensi motor yang lebih rendah (standard)
- Ee : efisiensi motor yang lebih tinggi.

$$Load\ factor\ L = \frac{kW}{kW \times jam\ operasi} \dots\dots\dots(11)$$

Sebagai pembeli motor, berapapun ukurannya, harus memperhatikan hal-hal sebagai berikut :

- 1) Hitunglah efisiensi motor yang sebenarnya , atau yang seharusnya .
- 2) Periksalah bahwa tidak ada lagi motor yang lebih efisien yang dapat diperoleh, dan perhitungkan dengan rumus diatas, penghematan yang optimum.

f. Pemeliharaan Motor Listrik Di Industri

Motor-motor dapat beroperasi lebih efisien dan lebih panjang umurnya serta tidak menimbulkan banyak masalah apabila dipelihara dengan benar, antara lain selalu dijaga bersih kondisinya, dingin, kering dan diberi pelumasan yang benar dan baik. Motor-motor yang dipasang didaerah dengan lingkungan yang tidak baik (kotor, berdebu, dan sebagainya) harus sering dibersihkan dan untuk daerah dengan kelembaban yang tinggi biasanya umur motor akan jauh lebih pendek dari pada umur rata-rata seharusnya. Motor diharapkan agar memperoleh pendinginan yang baik serta tidak boleh ada benda-benda atau kotoran yang menutup bagian dari sistim aliran udara pendingin. Peletakan yang tepat dan baik, penyetelan poros (*alignment*) yang teliti serta penyambungan yang benar merupakan hal-hal penting yang harus diperhatikan agar motor dapat mencapai umur panjang dan tetap beroperasi dengan efisiensi yang optimum. Untuk itu perlu dibuat program pemeriksaan (*inspection*) serta *preventive maintenance* yang baik. Sangat disarankan untuk mengadakan pengukuran tegangan dan arus (beban) motor pada waktu audit energi.

D. RINGKASAN

Kualitas daya dapat dikatakan sebagai syarat mutu catuan listrik yang terjadi karena anomali pada parameter kelistrikan dalam komponen tegangan sumbernya. Permasalahan yang berkaitan dengan kualitas daya diantaranya adalah fluktuasi tegangan (*over/under voltage*), *noise*, harmonik yang mencakup *Total Harmonic Distortion* (THD), *Individual Harmonic Distortion* (IHD) dan *K-factor*, *transient*, variasi frekuensi, *flicker*, beban induktif yang berdampak pada turunnya faktor daya, ketidakseimbangan tegangan, ketidakseimbangan arus pada sistem tiga phase, efisiensi beban rendah dan sebagainya.

Dari beberapa permasalahan yang berkaitan dengan kualitas daya seperti tersebut di atas diantaranya adalah harmonik dan hal yang mendukung kualitas daya yaitu sisi praktis pemilihan motor listrik di industri. Perkembangan aneka jenis beban listrik di industri terutama yang mengandung rangkaian elektronika di dalamnya menyebabkan gelombang tegangan dan arus listrik berubah menjadi tidak sinus murni atau menjadi

gelombang terdistorsi. Gelombang arus dan tegangan listrik terdistorsi tersebut mengakibatkan munculnya harmonik.

Pada umumnya beban listrik terbesar di industri adalah berupa motor listrik. Dalam rangka mendukung kualitas daya listrik di industri maka perlu kiranya dilakukan hal-hal yang berkaitan dengan pemilihan motor listrik sebagai beban listrik di industri yang menyangkut antara lain : (1) pengaruh perubahan tegangan terhadap efisiensi, arus dan faktor daya motor listrik; (2) pertimbangan dalam pengadaan motor listrik; (3) pengaruh beban terhadap efisiensi dan faktor daya motor listrik; (4) prosedur peningkatan efisiensi motor listrik dan (5) pemeliharaan motor listrik di industri.

E. LATIHAN

1. Sebutkan faktor-faktor yang mempengaruhi kualitas daya listrik di industri serta jelaskan pengaruh masing-masing faktor tersebut terhadap kualitas daya listrik di industri.
2. Jelaskan proses terjadinya harmonik pada distribusi tenaga listrik di industri.
3. Jelaskan deret Fourier yang mempresentasikan harmonik pada gelombang terdistorsi tenaga listrik.
4. Jelaskan sumber-sumber harmonik pada distribusi tenaga listrik di industri.
5. Jelaskan efek harmonik pada distribusi tenaga listrik di industri.
6. Jelaskan eliminasi harmonik pada distribusi tenaga listrik di industri.
7. Jelaskan pengaruh perubahan tegangan terhadap efisiensi, arus dan faktor daya motor listrik di industri.
8. Jelaskan pertimbangan dalam pengadaan motor listrik di industri.
9. Jelaskan pengaruh beban terhadap efisiensi dan faktor daya motor listrik di industri.
10. Jelaskan prosedur peningkatan efisiensi motor listrik di industri.
11. Jelaskan pemeliharaan motor listrik di industri.

F. REFERENSI

- Ducan R.C., 1996, *Electrical Power System Quality*, Mc Graw-Hill.
- Halpin S.M., 2001, *The Electronic Power Engineering Hand Book*, CRC Press.
- Heydt G.T., 1991, *Electric Power Quality*, Avarua : Star in a Circle Publications.
- Muljono Suharjanto, 2006, "Pengaruh Harmonisa pada Energy Quality Untuk Catuan Perangkat Infokom", available on : http://ecmweb.com/mag/electric_harmonic_distortion_definition_3/
- Parlindungan Marpaung, 2006, *Analisis Data Utilitas Energi – Motor*, Jakarta : Direktorat Jenderal Listrik dan Pemanfaatan Energi Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Schneider, *Panduan Aplikasi Teknis*, Jakarta : Schneider Electric
- Tribuana Nanan dan Wanhar, 1999, "Pengaruh Harmonik Pada Transformator Distribusi", available on : <http://www.elektroindonesi.com/elektro/ener25.html>
- Verry Hidayat, 2007, *Analisis Distorsi harmonik Terhadap Kualitas Daya Di PT Itokoh Ceperindo*, Yogyakarta : PT Elektro FT UNY.