



**MANAJEMEN PEMANFAATAN ENERGI LISTRIK PADA  
POMPA DI PDAM TIRTA MOEDAL PRODUKSI II KOTA  
SEMARANG  
MELALUI AUDIT ENERGI LISTRIK**

**SKRIPSI**

disusun sebagai salah satu syarat  
untuk memperoleh gelar Sarjana Pendidikan  
Program Studi Pendidikan Teknik Elektro

**Oleh**

Enggar Alif Mutofan NIM.5301412011

UNNES  
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG  
2017**

## PERSETUJUAN PEMBIMBING

Nama : Enggar Alif Mufan  
NIM : 5301412011  
Program Studi : S-1 Teknik Elektro  
Judul Skripsi : *Manajemen Pemanfaatan Energi Listrik pada Pompa di PDAM Tirta Moedal Produksi II Kota Semarang Melalui Audit Energi Listrik*

Skripsi ini telah disetujui oleh pembimbing untuk diajukan ke sidang panitia ujian skripsi Program Studi S-1 Pendidikan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.

Semarang, 1 Desember 2016

Pembimbing I

Drs. Sutarno M.T  
NIP. 195510051984031001

Pembimbing II

Riana Defi Mahadji Putri, ST, M.T  
NIP. 197609182005012001

**UNNES**  
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

## PENGESAHAN

Skripsi dengan judul Manajemen Pemanfaatan Energi listrik pada Pompa di PDAM Tirta Moedal Produksi II Kota Semarang Melalui Audit Energi Listrik telah dipertahankan di depan sidang Panitia Ujian Skripsi Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang pada tanggal 11 bulan 1 tahun 2017

Oleh

Nama : Enggar Alif Mutofan

NIM : 5301412011

Program Studi : Pendidikan Teknik Elektro

Panitia:

Ketua

Sekretaris

Dr.-Ing. Dhidik Prastiyanto S.T., M.T.  
NIP. 197805312005011002

Drs. Agus Suryanto M.T.  
NIP. 196708181992031004

Penguji I

Penguji II

Penguji III

Drs. Henry Ahanta, M.Pd  
NIP. 195907051986011002

Drs. Sutarno M.T  
NIP. 195510051984031001

Riana Defi Mahadji Putri, ST, M.T  
NIP. 197609182005012001

UNNES  
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknik



Dr. Nur Oudus M.T


NIP. 196911301994031001

## PERNYATAAN KEASLIAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa:

1. Skripsi ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik (Sarjana, Magister dan atau Doktor), baik Universitas Negeri Semarang (UNNES) maupun di perguruan tinggi lain,
2. Karya tulis ini adalah murni gagasan, rumusan dan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan Pembimbing dan masukan Tim Penguji.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah diperoleh karena karya ini, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi ini.

Semarang, Januari 2017  
yang membuat pernyataan,

  
Enggar Alif Mutofan  
NIM. 5301412011

**UNNES**  
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

## MOTTO DAN PERSEMBAHAN

### MOTTO

- Inna Ma'al 'Usri Yusro / Sesungguhnya sesudah kesulitan ada kemudahan (Q.S Al-Insyirah: 6).
- Masa muda adalah masa yang berapi-api (Rhoma Irama)
- Ilmu tidak didapat dengan jasad yang santai (HR. Muslim).
- Berjalanlah dengan hati-hati walaupun membutuhkan waktu yang lebih lama untuk sampai pada tempat tujuan yang dituju dengan tepat dan selamat.

### PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan untuk:

- Ayah dan Ibu saya, Bapak Sino dan Ibu Resmeni yang selalu cinta dan kasih sayangnya, pengorbanan, kekuatan, semangat dan doanya yang selalu mengiringi setiap langkahku.
- Adik saya Yuki Nandah Asmawati yang selalu memberi dukungan untuk selalu berjuang dan pantang menyerah
- Sahabat seperjuangan dan sahabat kost (Ardian, Singgih dan Avan) yang selalu menemani saat senang dan gembira.
- Teman-teman di RN. Hitam Putih yang selalu memberikan semangat dan tawa setiap hariku.
- Teman-teman seperjuangan PTE 2012 UNNES.

**UNNES**  
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

## ABSTRAK

Alif Mutofan, Enggar.2016.”**Manajemen Pemanfaatan Energi Listrik pada Pompa di PDAM Tirta Moedal Produksi II Kota Semarang Melalui Audit Energi Listrik**”.Drs.Sutarno,M.T. Riana Defi Mahadji Putri, S.T, M.T. *Skripsi*. Pendidikan Teknik Elektro.Jurusan Teknik Elektro : Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.

Penggunaan motor-motor besar untuk memompa air di PDAM Tirta Moedal Produksi II Kota Semarang dengan kapasitas 200-250 kW sudah berumur 14 tahun sejak awal produksi, dimungkinkan terjadi penurunan kinerja dan efisiensi pada pompa. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui profil penggunaan energi pompa produksi, kinerja dan efisiensi pompa, kualitas daya listrik pada pompa, serta rekomendasi terkait dengan penghematan energi listrik.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan pendekatan kuantitatif deskriptif.Pengukuran dilakukan menggunakan alat *Power Quality Analyzer* HIOKI 3197.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa rata-rata beban motor pada pompa-pompa produksi sebesar 60,55 % sehingga penggunaan energi pada pompa produksi kurang optimal. Kinerja pada beberapa pompa produksi sudah optimal, namun pada pompa P602 belum optimal karena persentase load motor masih dibawah 50 % serta terjadi penurunan rpm dan debit yang cukup besar. Terdapat beberapa pompa yang memiliki efisiensi dibawah BEP (Best Efficiency Nijhuis Pump 80-90 %) yaitu pompa P609 dan P610.Kualitas daya pada pompa P602 kurang baik karena belum sesuai dengan standar ANSI, NEMA, dan IEEE. Rekomendasi penghematan energi yang dapat dilakukan adalah dengan pergantian motor baru, pemasangan kapasitor individual pada tiap pompa, dan pemasangan filter pasif single tuned pada pompa P602 dan P606 untuk mereduksi harmonisa arus.

Kata kunci :*Manajemen energi,audit energi listrik, kinerja dan efisiensi pompa, kualitas daya.*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur hanya kehadirat Allah SWT, yang telah melimpahkan rahmat serta hidayahNya penyusunan Skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik. Skripsi ini disusun dalam rangka penyelesaian studi Strata 1 untuk mencapai gelar Sarjana Pendidikan. Penulisan Skripsi ini selesai berkat bantuan berbagai pihak. Untuk itu ucapan terima kasih tersampaikan kepada:

1. Bapak Dr. Nur Qudus, M. T. sebagai Dekan Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang yang telah memberi izin dalam penyusunan skripsi.
2. Bapak Dr.-Ing. Dhidik Prastiyanto S.T., M.T., sebagai Ketua Jurusan Teknik Elektro sekaligus Kaprodi Pendidikan Teknik Elektro.
3. Bapak Drs. Sutarno M.T., dan Ibu Riana Defi Mahadji Putri, ST, M.T., sebagai dosen pembimbing I dan dosen pembimbing II yang telah memberi masukan saran, bimbingan dan motivasi dalam penyusunan skripsi.
4. Bapak Guntur dan Bapak Feri. sebagai Pembimbing lapangan dan Kepala Bagian Produksi yang telah memberi izin penelitian di PDAM Tirta Moedal Produksi II Kota Semarang dan memberi masukan.
5. Bapak, Ibu, adik serta keluarga yang selalu menyayangiku, memberi nasihat, dan selalu mengiringi langkahku dengan doa.
6. Karyawan PDAM Tirta Moedal Produksi II Kota Semarang yang memberi izin dan membantu selama penelitian.
7. Teman-teman PTE 2012 yang sudah membantu selama kuliah dan penyusunan skripsi.

Semoga Skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi semua pihak yang memerlukan.

Semarang, 1 Desember 2016



Penulis



**UNNES**  
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG



## DAFTAR ISI

### Halaman

HALAMAN JUDUL.....	i
PERSETUJUAN PEMBIMBING.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iv
MOTTO DAN PERSEMBAHAN.....	v
ABSTRAK.....	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR GRAFIK.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
<b>BAB I. PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Identifikasi Masalah.....	3
1.3 Pembatasan Masalah.....	3
1.4 Rumusan Masalah.....	4
1.5 Tujuan Penelitian.....	5
1.6 Manfaat Penelitian.....	5
1.6.1 Manfaat Teoritis.....	5
1.6.2 Manfaat Praktis.....	5
<b>BAB II. KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI</b>	
2.1 Kajian Pustaka.....	7
2.2 Landasan Teori.....	8
2.2.1 Profil PDAM Tirta Moedal Produksi II Kota Semarang.....	8
2.2.2 Manajemen Energi.....	10
2.2.3 Audit Energi.....	13
1. Jenis Audit Energi.....	14
2. Langkah-langkah Pelaksanaan Audit Energi.....	15
2.2.4 Motor Induksi.....	18
1. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Effisiensi Motor Induksi.....	21
2. Hubungan Antara Beban dan Effisiensi.....	22
2.2.5 Pompa Sentrifugal.....	24
1. Effisiensi Pompa Sentrifugal.....	24
2. Karakteristik Pompa.....	26
2.2.6 Daya Listrik.....	27
2.2.7 Kualitas Daya Listrik.....	32
2.2.8 Jenis-Jenis Permasalahan Kualitas Daya Listrik.....	33
1. <i>Unbalance Voltage</i> .....	34

## Halaman

2. <i>Unbalance Current</i> .....	35
3. Distorsi Harmonik.....	38
2.2.9 Perbaikan Faktor daya .....	42
2.2.10 Filter harmonisa .....	45
 BAB III. METODE PENELITIAN	
3.1 Waktu dan Tempat Pelaksanaan .....	48
3.2 Desain Penelitian .....	48
3.3 Alat dan Bahan Penelitian .....	48
3.4 Parameter Penelitian .....	49
3.5 Teknik Pengumpulan Data .....	49
3.6 Instrumen Penelitian .....	53
3.7 Teknik Analisis Data .....	54
 BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	
1.1 Hasil Penelitian .....	56
4.1.1 Profil Penggunaan Energi Pompa .....	56
4.1.2 Kinerja Pompa.....	58
1. Load motor.....	58
2. Rpm dan Debit Air pada Pompa.....	59
4.1.3 Efisiensi Hidrolis Pompa .....	60
4.1.4 Kualitas Daya Listrik pada Pompa.....	61
1. Faktor daya ( $\cos \phi$ ) .....	61
2. <i>Unbalance Voltage</i> .....	61
3. <i>Unbalance Current</i> .....	63
4. THD ( <i>Total Harmonics Distrotion</i> ).....	64
4.2 Pembahasan.....	66
4.3.Rekomendasi Penghematan Energi .....	71
1. Pergantian Motor .....	72
2. Perbaikan Faktor Daya dengan Kompensasi Individual.....	74
3. Reduksi Harmonisa.....	76
 BAB V. PENUTUP	
5.1 Kesimpulan .....	81
5.2 Saran.....	82
5.3 Rekomendasi .....	83
 DAFTAR PUSTAKA .....	84
LAMPIRAN.....	86

## DAFTAR TABEL

	<b>Halaman</b>
Tabel 2.1 Jenis kehilangan pada motor induksi .....	21
Tabel 2.2 Standar distorsi harmonisa tegangan.....	41
Tabel 2.3 Standar distorsi harmonisa arus .....	41
Tabel 3.1 Format pengukuran .....	51
Tabel 3.2 Spesifikasi alat ukur .....	53
Tabel 4.1 Data historis konsumsi energi listrik .....	56
Tabel 4.2 Konsumsi energi listrik pada pompa.....	57
Tabel 4.3 Hasil perhitungan load motor.....	58
Tabel 4.4 Kinerja pompa berdasarkan rpm dan debit air .....	59
Tabel 4.5 Efisiensi Hidrolis pada Pompa.....	60
Tabel 4.6 Nilai cos phi pada masing-masing pompa .....	61
Tabel 4.7 Persentase <i>Unbalance Voltage</i> pada masing-masing Pompa.....	62
Tabel 4.8 Persentase <i>Unbalance current</i> pada masing-masing Pompa .....	64
Tabel 4.9 Hasil Pengukuran persentase THD Tegangan pada pompa .....	64
Tabel 4.10 Hasil Pengukuran persentase THD Arus pada pompa .....	65
Tabel 4.11 <i>Distribution of losses in an ABB M3BP</i> .....	72
Tabel 4.12 Hasil perhitungan rekomendasi pergantian motor .....	74
Tabel 4.13 Hasil Perhitungan rekomendasi pemasangan kapasitor.....	76
Tabel 4.14 Perhitungan pemasangan filter harmonik .....	79
Tabel 4.15 Hasil penghematan biaya setelah pemasangan filter.....	80

## DAFTAR GAMBAR

	<b>Halaman</b>
Gambar 2.1 Proses Pengolahan air bersih di PDAM .....	9
Gambar 2.2 Variabel rugi-rugi motor induksi.....	19
Gambar 2.3 Perbandingan antara motor efisiensi tinggi dengan motor standar .....	22
Gambar 2.4 Efisiensi beban motor .....	23
Gambar 2.5 Pompa <i>Centrifugal</i> .....	25
Gambar 2.6 Kurva Head, Efisiensi, dan Daya .....	26
Gambar 2.7 Kurva kinerja pompa sentrifugal diberikan oleh pemasok.....	27
Gambar 2.8 Segitiga Daya .....	29
Gambar 2.9 Hubungan segitiga dan bintang pada beban seimbang.....	30
Gambar 2.10 Vektor Diagram Arus .....	35
Gambar 2.11 Gelombang terdistorsi .....	39
Gambar 2.12 Rangkaian filter pasif .....	45
Gambar 2.13 Desain instalasi filter pasif single tuned.....	46
Gambar 3.1 Metode pengukuran beban 3 fasa 4 wire.....	51
Gambar 3.2 Titik pengukuran pompa .....	52

## DAFTAR GRAFIK

	<b>Halaman</b>
Grafik 4.1 Penggunaan energi pada pompa .....	57
Grafik 4.2 Persentase load motor .....	58
Grafik 4.3 Penurunan Rpm pada pompa .....	59
Grafik 4.4 Penurunan Debit air .....	60
Grafik 4.5 Effisiensi Hidrolis Pompa.....	61
Grafik 4.6 Persentase <i>unbalance voltage</i> .....	62
Grafik 4.7 Persentase <i>unbalancecurrent</i> .....	64
Grafik 4.8 Persentase THD tegangan pada pompa .....	65
Grafik 4.9 Persentase THD arus pada pompa .....	65
Grafik 4.10 Profil Penggunaan energi listrik .....	66



## DAFTAR LAMPIRAN

	<b>Halaman</b>
Lampiran 1 Block Diagram Sistem Kelistrikan WTP Kudu.....	87
Lampiran 2 Data Teknis Spesifikasi Pompa .....	88
Lampiran 3 Jadwal Operasional Pompa.....	89
Lampiran 4 Data Konsumsi Energi Listrik PDAM .....	90
Lampiran 5 Data Hasil Pengukuran Pompa .....	92
Lampiran 6 Data Hasil Pengukuran THD Pada Pompa P606 Dan P602.....	96
Lampiran 7 Surat Usulan Dosen Pembimbing Penulisan Skripsi.....	97
Lampiran 8 Surat Penetapan Dosen Pembimbing Skripsi .....	98
Lampiran 9 Surat Permohonan Izin Penelitian .....	99
Lampiran 10 Surat Pengantar Penelitian.....	100
Lampiran 11 Surat Keterangan Selesai Penelitian .....	101
Lampiran 12 Dokumentasi Penelitian.....	102



## **BAB 1**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1 Latar Belakang**

Pengembangan sumber energi untuk memperoleh pencapaian kerja yang efektif dan efisien adalah kunci dari kemajuan dunia industri. Sektor energi mempunyai peran yang sangat penting dalam mewujudkan pembangunan nasional yang berkelanjutan. Oleh karena itu sesuai dengan visi misi pengelolaan energi, penyediaan dan pemanfaatan energi nasional perlu dilaksanakan secara optimal, arif dan bijaksana yang dilandasi oleh pertimbangan objektif mencakup aspek lingkungan, kepentingan antar generasi, kebutuhan energi, sosial politik, geopolitik dan ekonomi. Keenam aspek tersebut merupakan kriteria penting yang dipersyaratkan dalam pemanfaatan energi untuk pembangunan berkelanjutan. Perusahaan atau industri merupakan salah satu badan usaha yang memerlukan konsumsi energi listrik yang cukup besar. Maka menjadi hal yang wajib bagi pelaku industri untuk melakukan upaya-upaya penghematan dalam pemanfaatan energi listrik. Kapasitas produksi dari perusahaan akan bertambah banyak dengan diiringi pertumbuhan jumlah penduduk, sehingga akan berdampak terhadap besar energi listrik yang dikonsumsi.

Kebijakan Audit energi dimaksudkan untuk meningkatkan penggunaan energi secara efisien dan rasional tanpa mengurangi kuantitas energi yang diperlukan

sehingga audit energi merupakan suatu upaya konservasi energi yang dapat diterapkan pada seluruh pemanfaatan energi listrik dengan menggunakan teknologi adalah peningkatan efisiensi energi yang digunakan atau biasa disebut dengan proses penghematan energi. Konservasi energi dapat dicapai melalui penggunaan teknologi hemat energi dalam penyediaan, baik dari sumber terbarukan maupun sumber tak terbarukan dan menerapkan budaya hemat energi dalam pemanfaatan energi

Unit instalasi pengolahan air (IPA) kudu Kota Semarang merupakan salah satu cabang atau anak perusahaan PDAM di Kota Semarang yang mulai beroperasi pada tahun 2001 dengan kapasitas produksi air bersih mencapai 1250 liter/detik dengan daya PLN sebesar 2425 KVA dan Genset 1250 KVA. Dengan besarnya kapasitas produksi tersebut sudah tentu membutuhkan energi yang cukup besar terutama pada bagian sistem pemompaan air. Konsumsi energi listrik di PDAM Produksi II sangat besar setiap tahunnya, sehingga perlu adanya auditing agar dapat mengetahui bagian-bagian yang mengalami pemborosan khususnya pada bagian pemompaan, sehingga dapat dilakukan upaya penghematan energi yang efektif, efisien dan ekonomis. Salah satu metode yang sering dipakai untuk mengoptimalkan pemakaian energi listrik adalah metode konservasi energi.

Penelitian ini membahas manajemen pemanfaatan energi melalui audit energi pada pompa dan peluang penghematannya serta pengukuran kualitas daya pada pompa di PDAM. Hasil dari audit energi listrik ini adalah dapat diketahui persentase penggunaan energi listrik tiap pompa, efisiensi pompa dapat dihitung,



konsumsi energi listrik pada sistem pemompaan dapat ditekan atau dihemat, kualitas daya dapat terukur.

## **1.2 Identifikasi Masalah**

Berdasarkan latar belakang di atas, maka masalah-masalah yang muncul di PDAM Tirta Moedal Produksi II Kota Semarang dapat diidentifikasi sebagai berikut:

1. Terdapat beberapa pompa kurang lebih sudah berumur 14 tahun sejak awal produksi dan kemungkinan terjadi penurunan efisiensi pada kinerja pompa.
2. Konsumsi energi listrik pada sistem pompa masih sangat besar sehingga dimungkinkan ada peluang pemborosan energi
3. Kualitas daya dalam sistem kelistrikan pada pompa seperti unbalance tegangan, unbalance arus, dan harmonisa tegangan maupun arus belum teridentifikasi

## **1.3 Pembatasan Masalah**

Agar penulisan skripsi sesuai dengan tujuan penulisan, dan untuk mempermudah dalam mendapatkan data serta informasi yang diperlukan, maka penulis memberikan batasan-batasan masalah sebagai berikut :

1. Pembahasan hanya di ruang lingkup PDAM Produksi II Kota Semarang
2. Audit dan peluang penghematan hanya pada sistem kelistrikan pompa.
3. Pompa yang di audit adalah pompa pada bagian intake, transmisi, dan distribusi.

4. Parameter kualitas daya yang diukur adalah (unbalance voltage, unbalance current dan THD) pada masing-masing pompa.
5. Audit yang dilakukan pada penelitian ini adalah audit energi awal (*preliminary audit*)

#### **1.4 Rumusan Masalah**

Pemanfaatan energi listrik secara bijak merupakan salah satu upaya dalam penghematan energi dan merupakan pelaksanaan konservasi energi. Dalam pemanfaatan energi listrik, sudah seharusnya dilakukan audit energi untuk mengetahui pola penggunaan energi. Sehingga dalam penelitian ini, peneliti merumuskan beberapa masalah diantaranya :

1. Bagaimana profil penggunaan energi listrik di PDAM Tirta Moedal Produksi II Kota Semarang?
2. Bagaimana kinerja dan efisiensi pompa pada unit produksi di PDAM Tirta Moedal Produksi II Kota Semarang?
3. Bagaimana kualitas daya listrik pada sistem pompa di PDAM Tirta Moedal Produksi II Kota Semarang?

Dalam rangka pemanfaatan energi secara efisien dan sesuai dengan rumusan masalah tersebut, maka penulis melakukan penelitian mengenai “Manajemen Pemanfaatan Energi Listrik Pada Sistem Pompa Melalui Audit Energi Listrik Di PDAM Tirta Moedal Produksi II Kota Semarang”

## **1.5 Tujuan Penelitian**

Suatu penelitian bertujuan untuk memahami permasalahan secara lebih rinci dan mendalam untuk mengembangkan teori yang sudah ada. Adapun tujuan-tujuan dari penelitian ini yaitu :

1. Untuk mengetahui besar penggunaan energi listrik di PDAM Tirta Moedal Produksi II Kota Semarang
2. Mengetahui kinerja dan efisiensi pompa pada unit produksi.
3. Mengetahui kualitas daya listrik pada sistem pompa di PDAM Tirta Moedal Produksi II kota Semarang.
4. Melakukan rekomendasi penghematan energi listrik berdasarkan hasil audit.

## **1.6 Manfaat Penelitian**

### **1.6.1 Manfaat Teoritis**

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat secara teoritis, sekurang-kurangnya dapat berguna sebagai sumbangan pemikiran bagi dunia pendidikan dan sebagai pengembangan dalam teori-teori manajemen energi.

### **1.6.2 Manfaat Praktis**

1. Bagi peneliti
  - a. Peneliti dapat menambah wawasan dan pengetahuan tentang upaya manajemen pemanfaatan energi dengan melakukan audit energi listrik.
2. Bagi Perusahaan
  - a. Dapat dijadikan sebagai laporan dan evaluasi penggunaan energi dalam jangka waktu tertentu.

- b. Dapat dijadikan sebagai acuan untuk pemilihan pompa yang lebih efisien.
- c. Dapat dijadikan sebagai bahan acuan untuk pengembangan sistem kelistrikan pada Instalasi Pengolahan Air di PDAM
- d. Dapat dijadikan sebagai acuan dalam upaya penghematan energi listrik



## BAB II

### KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

#### 2.1 Kajian Pustaka

Untuk mengkaji masalah, peneliti perlu membahas teori-teori dan penelitian yang relevan dengan variabel-variabel yang diteliti, guna mendapatkan wawasan yang lebih luas dan jelas tentang suatu variabel. Sehingga peneliti menentukan referensi sebagai acuan untuk melaksanakan penelitian. Beberapa penelitian yang relevan dengan penelitian ini adalah :

1. Hadi Prasetyo, 2008 : *Konservasi Energi Listrik Pada Industri Otomotif*, Fakultas Teknik Program Studi Teknik Elektro Universitas Indonesia. Dimana dalam penelitian tersebut, peneliti membahas rekomendasi aktivitas-aktivitas pelaksanaan konservasi energi listrik di industri otomotif yang meliputi audit energi serta peluang penghematan energi dengan menerapkan teknologi yang lebih efisien berdasarkan pertimbangan teknis dan otomatis.
2. Subhan Ramadhani, 2010 : *Analisa Konservasi Energi Listrik Pada Industri Tekstil*. Fakultas Teknik Program Studi Teknik Elektro Universitas Indonesia. Dalam penelitian ini peneliti membahas indentifikasi peluang penghematan pada industri tekstil khususnya pada sistem kelistrikan, analisa mengenai kualitas sistem kelistrikan yang terpasang, analisa deskripsi pola penggunaan energi dan memberikan rekomendasi peluang penghematan pada industri tekstil.

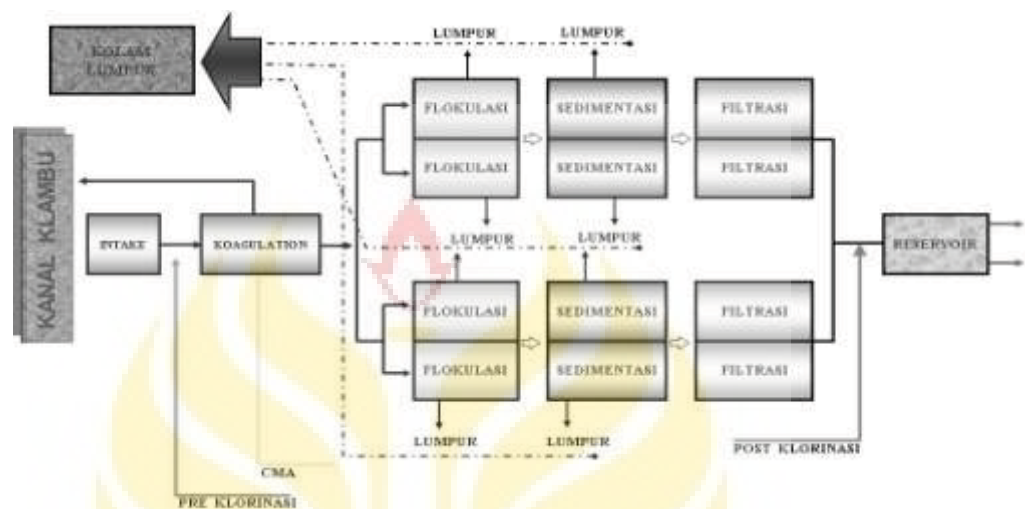
3. Jurnal techno ISSN, oleh Hari Prasetijo, 2012 mengenai *Analisa Perancangan filter pasif untuk meredam harmonik pada instalasi beban non linier*. Program studi teknik elektro universitas jenderal soedirman. Dalam penelitiannya, peneliti membahas perhitungan dan desain filter pasif untuk meredam harmonisa pada orde ke 3, 5, dan 7.

## 2.2 Landasan Teori

### 2.2.1 Profil PDAM Tirta Moedal Produksi II Kota Semarang

Instalasi Pengolahan Air (IPA) Kudu merupakan instalasi pengolahan air permukaan yang dirancang untuk menghasilkan 1250 l/s air bersih ( kapasitas kotor 1400 l/s) sesuai dengan standar departemen kesehatan. Saat pertama kali beroperasi tahun 2001, air baku di alirkan sepanjang 42 km yang menghubungkan Bendungan Kelambu dengan instalasi pengolahan. Tujuan dibangunnya instalasi pengolahan ini adalah untuk memperbesar suplai kebutuhan air minum kota Semarang, khususnya zona timur. Air minum yang diproduksi disuplai melalui suatu sistem transportasi dan distribusi untuk kebutuhan rumah tangga, niaga/industri dan pelanggan-pelanggan kelembagaan. Sesuai dengan pengembangan SUDP (*Semarrang Urban Development Program*) dengan tujuan terpenuhinya kebutuhan air pada tahun 2005. Pengembangan SUDP dipusatkan pada implementasi instalasi pengolahan air kudu (semarang bagian timur), yang akan melayani air ke zona Timur 1, zona Timur 2 dan pusat sebagian serta penambahan infrastruktur transport dan distribusi. Instalasi pengolahan air (IPA) kudu merupakan instalasi pengolahan air permukaan konvensional. Sasaran utama

pengolahan adalah untuk mengurangi kekeruhan, partikel padat terlarut dan warna dan menonaktifkan bakteri mikrobiologi patogen. Tahapan proses pengolahan mencakup beberapa proses, digambarkan seperti pada gambar 2.1 berikut :



Gambar 2.1 Proses Pengolahan air bersih di PDAM Tirta Moedal Produksi II Kota Semarang.

Seperti yang digambarkan diatas, bahwa beberapa proses dalam pengolahan air terdiri dari tahapan berikut :

1. Proses intake, yaitu proses pengambilan air baku pada aliran klambu dengan pompa berdaya 200 kW.
2. Koagulation, adalah proses pemberian koagulan (contoh : tawas\CMA) dengan maksud mengurangi gaya tolak menolak antar partikel koloid sehingga partikel tersebut bisa bergabung menjadi flok-flok kecil.
3. Flokulasi, yaitu proses pembentukan flokulan dengan maksud menggabungkan flok-flok kecil yang telah terbentuk pada proses sebelumnya (koagulasi)
4. Sedimentasi, didalam proses sedimentasi partikel-partikel / flok-flok yang terbentuk dari flokulasi akan mengendap pada bak sedimentasi. Pada bak

sedimentasi dilengkapi tube settler yang bertujuan untuk mempercepat proses pengendapan. Endapan flok akan dibuang melalui *sludge drain* (kolam lumpur).

5. Filtrasi, proses filtrasi bertujuan untuk melakukan penyaringan flok-flok halus yang belum terendapkan pada bak sedimentasi.
6. Post klorinasi, adalah pembubuhan zat Disinfektan (contoh : gas chlor, sodium hipochloride) yang bertujuan untuk membunuh bakteri, baik direservoir, jaringan pipa distribusi hingga sampai ke pelanggan.
7. Air hasil olahan dari filtrasi akan ditampung di bak reservoir air bersih dengan kapasitas  $2 \times 5.000 \text{ m}^3$  sebelumnya diinjeksi gas chlor setelah itu baru didistribusikan ke pelanggan baik melalui pipa transmisi maupun pipa distribusi.

### 2.2.2 Manajemen Energi

Manajemen energi adalah kegiatan terpadu untuk mengendalikan konsumsi energi agar tercapai pemanfaatan energi yang efektif dan efisien untuk menghasilkan keluaran yang maksimal melalui tindakan teknis secara terstruktur dan ekonomis untuk meminimalisasi pemanfaatan energi termasuk energi proses produksi dan meminimalisasi konsumsi bahan baku dan bahan pendukung (Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2012). Efisiensi berhubungan dengan bagaimana perusahaan melakukan operasinya, sehingga dicapai optimalisasi penggunaan sumber daya yang dimiliki. Efisiensi berhubungan dengan metode kerja (operasi). Dalam hubungannya dengan konsep



input-proses-output, efisiensi adalah rasio antara output dan input. Seberapa besar output yang dihasilkan dengan menggunakan sejumlah tertentu input yang dimiliki perusahaan.

Metode kerja yang baik akan dapat memandu proses operasi berjalan dengan mengoptimalkan penggunaan sumber daya yang dimiliki perusahaan. Jadi, efisiensi merupakan ukuran proses yang menghubungkan antara input dan output dalam operasional perusahaan (Bayangkara, 2008). Dengan kata lain efisien merupakan penggunaan sumber daya minimum guna pencapaian optimum, sedangkan efektif menurut (Hidayat, 1986) yang menjelaskan bahwa : “Efektivitas adalah suatu ukuran yang menyatakan seberapa jauh target (kuantitas, kualitas dan waktu) telah tercapai. Dimana makin besar persentase target yang dicapai, makin tinggi efektivitasnya”. Efektivitas merupakan pencapaian tujuan secara tepat atau memilih tujuan-tujuan yang tepat dari serangkaian alternative atau pilihan cara dan menentukan pilihan dari beberapa pilihan lainnya. Efektivitas juga bisa diartikan sebagai pengukuran keberhasilan dalam pencapaian tujuan-tujuan yang telah ditentukan.

Manajemen energi merupakan suatu program yang direncanakan dan dilaksanakan secara sistematis untuk memanfaatkan energi secara efektif dan efisien dengan melakukan perencanaan, pencatatan, pengawasan dan evaluasi secara kontinu tanpa mengurangi kualitas produksi dan pelayanan (Wahyudi, 2014). Manajemen energi mencakup perencanaan dan pengoperasian unit konsumsi dan produksi yang berkaitan dengan energi. *Program Energy Management* (PEM) merupakan salah satu solusi yang telah diterapkan di

berbagai negara-negara maju. Terdapat dua target umum dari PEM. Pertama, menghemat dan menggunakan energi secara efisien. Kedua, di beberapa industri, mungkin perlu mengganti bahan bakar yang biasa digunakan untuk pabrik mereka dengan yang lebih murah, misalnya mengganti BBM yang harganya relatif mahal dengan gas yang lebih murah. Dengan menerapkan PEM, didapat keuntungan sebagai berikut :

1. Memangkas biaya energi
2. Meningkatkan keuntungan perusahaan
3. Mengurangi resiko kekurangan suplai energi
4. Keuntungan lingkungan, yaitu dapat mengurangi emisi gas karbon
5. Meningkatkan kemampuan perusahaan dalam berkompetisi, karena dengan penghematan biaya yang dicapai perusahaan dapat meningkatkan kualitas produks dan servis.

Ada beberapa hal yang perlu dilakukan industri untuk menerapkan PEM, terdapat beberapa panduan salah satunya dengan metode *Departement of Primary Industries and Energy* (DPIE), yaitu :

1. Perusahaan menunjuk konsultan PEM
2. Konsultan melakukan investigasi awal untuk melihat pola penggunaan energi di perusahaan.
3. Jika proyek terlihat *feasible*, perusahaan menunjuk seorang Manager Energi yang akan mendampingi konsultan dan nantinya akan mengkoordinasi penerapan PEM.

4. Melakukan audit energi secara detail. Audit energi akan memperlihatkan bagian-bagian yang memungkinkan dilakukan penghematan energi.
5. Merumuskan strategi PEM. Pada tahap ini konsultan akan mengeluarkan rekomendasi untuk dilakukan oleh perusahaan.
6. PEM diterapkan dibawah koordinasi Manager Energi
7. Monitoring dan evaluasi program.

Salah satu bagian yang mendasari manajemen energi adalah audit energi. Laporan audit merupakan hasil dari audit plan yang akan di proses dan di analisa lebih lanjut dalam manajemen energi. Melalui hasil audit energi tersebut, maka aliran energi dapat terbaca dan memberikan gambaran tentang profil penggunaan energi sehingga dapat disusun suatu rancangan strategi untuk mengendalikan penggunaan energi.

### **2.2.3 Audit Energi**

Proses manajemen energi yang efektif haruslah berdasarkan pada tujuan yang telah ditetapkan dan harus diuraikan secara rinci tindakan-tindakan yang diperlukan untuk mencapai tujuan tersebut. Untuk memberi batasan suatu program manajemen energi di industri, perlu ditentukan secara teliti jenis dan jumlah energi yang digunakan di setiap tingkat proses manufaktur. Oleh karena itu, diperlukan suatu prosedur pencatatan penggunaan energi secara sistimatis dan berkesinambungan. Pengumpulan data kemudian diikuti dengan analisa dan pendefinisian kegiatan konservasi energi yang akan dilaksanakan. Gabungan antara pengumpulan data, analisa data dan definisi kegiatan konservasi disebut sebagai audit energi. (Kementerian Perindustrian, 2011).

Audit energi adalah suatu analisis terhadap konsumsi energi dalam sebuah sistem yang menggunakan energi, seperti gedung bertingkat, pabrik dan sebagainya. Hasil dari audit adalah laporan tentang bagian yang mengalami pemborosan energi dalam hal ini adalah konsumsi energi listrik. Audit energi dapat dilakukan setiap saat atau sesuai dengan jadwal yang sudah ditetapkan. Monitoring pemakaian energi secara teratur merupakan keharusan untuk mengetahui besarnya energi yang digunakan pada setiap bagian operasi selama selang waktu tertentu. Dengan demikian usaha-usaha penghematan dapat dilakukan. (Abdurachim, 2002)

Audit energi merupakan usaha atau kegiatan untuk mengidentifikasi jenis dan besarnya energi yang digunakan pada bagian-bagian operasi suatu industri atau bangunan dan mencoba mengidentifikasi kemungkinan penghematan energi. Sasaran dari audit energi adalah untuk mencari cara mengurangi konsumsi energi persatuan output dan mengurangi biaya operasi produksi. (Abdurachim : 2002)

### **1. Jenis Audit Energi**

Menurut Standar Nasional Indonesia No.03-6196 tahun 2011, secara teknis pelaksanaan audit energi ada beberapa jenis diantaranya audit energi singkat (*walk through audit*), audit energi awal (*preliminary audit*), dan audit energi rinci (*detailed audit*).

#### *a. Walk Through Audit*

*Walk Through Audit* ini sering disebut dengan mini audit. Audit yang dilakukan secara sederhana, tanpa perhitungan yang rinci, hanya melakukan

analisis secara sederhana. Umumnya fokus audit ini adalah pada bidang perawatan dan penghematan yang tidak terlalu memerlukan biaya investasi yang besar.

#### 1. *Preliminary audit*

Audit yang hanya dilakukan pada bagian vital saja. Analisa didapat dengan melakukan perhitungan yang cukup jelas. Audit ini meliputi indentifikasi mesin, analisis kondisi aktual, menghitung konsumsi energi, menghitung pemborosan energi dan beberapa usulan.

#### 2. *Detailed audit*

Audit energi yang dilakukan secara menyeluruh terhadap seluruh aspek yang mengkonsumsi energi listrik beserta semua kemungkinan penghematan yang dapat dilakukan. Biasanya dilakukan oleh lembaga auditor yang profesional dalam jangka waktu tertentu. Pelaksanaan audit didahului dengan analisis biaya audit energi, indentifikasi mesin, analisis kondisi aktual dan menghitung semua konsumsi energi. Konsumsi energi ini meliputi energi primer dan energi sekunder. Selain itu dilakukan perhitungan pemborosan energi, kesempatan konservasi energi, sampai beberapa usulan untuk melakukan penghematan energi beserta dengan dampak dari usulan tersebut. Untuk mencari kemungkinan penghematan maka harus diketahui terlebih dahulu analisa biaya audit energi, indentifikasi gedung, analisa kondisi sesungguhnya dan menghitung semua penggunaan energi.

## **2. Langkah Langkah Pelaksanaan Audit Energi**

Audit energi merupakan aktivitas /kegiatan teknis yang sistematis, bertujuan untuk mencari PPE (Peluang Penghematan Energi) pada suatu fasilitas pengguna

energi (mesin / peralatan yang terdapat di suatu *plant*). *Output* audit energi, berupa laporan peluang penghematan energi pada suatu cost center (pusat-pusat biaya energi) yang dapat dicapai setelah dilakukan pengamatan, pengukuran, dan analisa energi (Kementrian Perindustrian :2010). Dalam pelaksanaan pengkajian energi, ada beberapa langkah yang harus dilakukan diantaranya :

1. Identifikasi budaya hemat energi dan upayaupaya konservasi energi

Di dalam pelaksanaan audit energi identifikasi budaya hemat energi dan upaya-upaya konservasi energi dilakukan dengan cara wawancara guna mengevaluasi penghematan energi yang telah dilakukan oleh industri.

2. Pengumpulan data

Pengumpulan data pada pelaksanaan audit energi ditujukan untuk mendapatkan informasi mengenai kondisi performa peralatan pengguna energi dan teknologi yang digunakan serta kondisi operasi proses pada masing-masing peralatan. Data yang dikumpulkan berupa data primer dan sekunder.

- a. Pengumpulan Data Sekunder

Data sekunder yang dikumpulkan pada setiap industri yang dilakukan assesmen energi antara lain mencakup :

- 1) Informasi umum industri, deskripsi proses, plot plan, plant *layout* data desain peralatan utama
- 2) Informasi mengenai data-data kegiatan modifikasi yang pernah dilakukan, baik dalam rangka peningkatan efisiensi, reliabilitas, kapasitas maupun konservasi energi;

- 3) Pasokan dan distribusi penggunaan energi (*Energy Reference and Energy Balance*) untuk keseluruhan plant dan masing-masing proses/peralatan utama.
- 4) Profil konsumsi energi, data historis penggunaan energi (harian, bulanan dan tahunan) untuk keseluruhan plant dan masing masing proses/peralatan utama.

#### b. Pengumpulan Data Primer

Pengumpulan data primer dilakukan melalui survei dan pengukuran lapangan guna untuk mendapatkan informasi data teknis dan operasi aktual serta spesifikasi peralatan yang berkaitan dengan operasional peralatan pengguna energi di industri. Kegiatan pengumpulan data primer ini diawali dengan walk-trough ke lapangan mengetahui kondisi operasi peralatan pengguna energi serta menentukan titik-titik pengukuran yang diperlukan. Data operasi aktual pada masing-masing unit antara lain meliputi: input& output, spesifikasi peralatan, konsumsi energi, kondisi operasi (temperatur, tekanan, *flow rate*) serta faktor/parameter lain yang turut menentukan operasi yang akan dikumpulkan berdasarkan data logsheet peralatan pengguna energi.

#### 3. Analisis Data dan Peluang Penghematan Energi

Dari hasil pengumpulan data, selanjutnya dilakukan analisis data. Analisis tersebut dimaksudkan untuk mengetahui secara rinci besarnya potensi penghematan energi yang dapat dilakukan dan menyusun rekomendasi langkah-langkah penghematan energi dan dapat ditindaklanjuti oleh pihak industri.

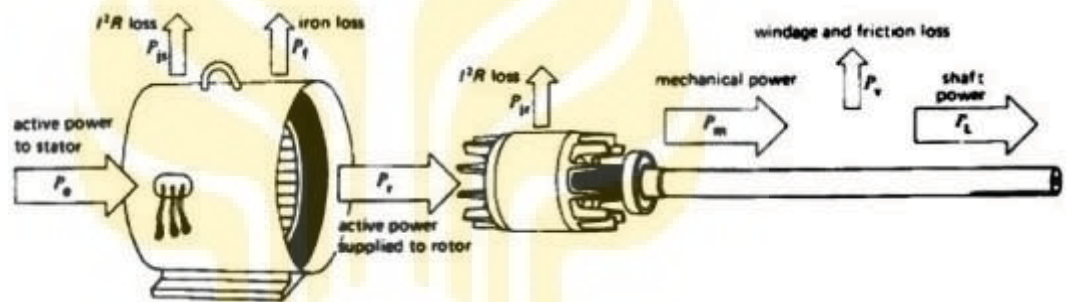
#### 2.2.4 Motor induksi

Motor induksi sangat banyak digunakan di dalam kehidupan sehari-hari baik di industri maupun di rumah tangga. Motor induksi yang umum dipakai adalah motor induksi 3-fase dan motor induksi 1-fase. Motor induksi 3-fase dioperasikan pada sistem tenaga 3-fase dan banyak digunakan di dalam berbagai bidang industri dengan kapasitas yang besar. Pada sebuah motor induksi terdapat beberapa rugi - rugi yang ditimbulkan karena komponen - komponen yang menyusun motor itu sendiri, seperti komponen tembaga yang terdapat pada gulungan stator dan rotor. Komponen - komponen tersebut akan menimbulkan rugi - rugi seperti rugi - rugi tembaga , rugi - rugi pada inti besi , rugi - rugi mekanik seperti hambatan yang ditimbulkan karena gesekan dan angin. Pada rugi - rugi tembaga, rugi - rugi yang ditimbulkan sebanding dengan nilai  $I^2.R$  , dimana  $I$  merupakan arus yang mengalir pada belitan tembaga dan  $R$  merupakan besarnya nilai tahanan tembaga tersebut.

Sehingga semakin besar arus maka semakin besar rugi - rugi pada tembaga tersebut. Yang berarti semakin besar beban yang dikerjakan oleh sebuah motor, semakin besar arus yang mengalir dibelitan tembaga sehingga rugi - rugi tembaga pada motor tersebut akan menjadi besar. Untuk rugi - rugi pada inti besi, rugi - rugi tersebut tidak terkait penuh dengan besar kecilnya beban yang diberikan pada motor tersebut. Sedangkan untuk rugi - rugi mekanik pada umumnya disebabkan faktor mekanikal seperti hambatan dan gesekan, seperti pada bearing, udara dll. Sehingga dalam hal ini audit energi perlu dilakukan untuk mengetahui besarnya penggunaan energi listrik dengan memperhatikan perilaku beban dan



pembebanan pada motor listrik. Total rugi - rugi yang dijelaskan diatas akan memperbesar daya listrik yang dibutuhkan untuk menggerakkan beban oleh sebuah motor. Effisiensi sebuah motor dinyatakan sebagai persentase perbandingan antara daya output yang dapat diberikan oleh sebuah motor untuk kerja ( $P_{out}$ ) terhadap daya input ( $P_{in}$ ) yang dibutuhkan oleh motor tersebut. Umumnya pada name plate nilai efisiensi sebuah motor tidak dinyatakan secara jelas, namun dapat dihitung berdasarkan data - data arus , tegangan ,  $\cos \phi$  dan daya motor yang tertera pada name plate motor.



Gambar 2.2 Variabel rugi-rugi pada motor induksi

Daya *input* dan *output* motor dapat dihitung dengan persamaan (Stephen J.Chapman : 2004) :

$$P_{in} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos \phi \quad (\text{watt}) \quad (2.1)$$

Dengan :  $P_{in}$  = daya listrik yang dipasang ke stator  
 $V_L$  = tegangan line (Volt)  
 $I_L$  = arus line (Ampere)

Sebagian dari input daya ini digunakan untuk memasok kerugian stator dimana terdapat beberapa rugi-rugi yaitu rugi besi stator dan rugi tembaga stator.

Sehingga daya input ke rotor adalah (input daya listrik - kerugian stator ) dipasok ke rotor sebagai masukan rotor .

$$P_{AG} = P_{in} - P_{SCL} - P_{core} \quad (\text{Stephen J.Chapman : 2004}) : \quad (2.2)$$

$$P_{Conv} = P_{AG} - P_{RCL} \quad (2.3)$$

$$P_{out} = P_{conv} - P_{F\&W} - P_{stray} \quad (2.4)$$

Dengan :

$P_{AG}$	=	air gap power (Watt)	
$P_{SCL}$	=	rugi-rugi stator	
$P_{core}$	=	rugi-rugi inti tembaga	
$P_{RCL}$	=	rugi-rugi rotor	
$P_{Conv}$	=	daya mekanik motor	
$P_{out}$	=	daya output	
$P_{F\&W}$	=	rugi-rugi gesekan dan udara	(2.5)

Sehingga, Effisiensi motor dapat dihitung dengan persamaan :

$$\eta_m = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100 \% \quad (2.6)$$

Dengan :

$\eta_m$	=	effisiensi motor induksi
$P_{out}$	=	daya output motor induksi (Watt)
$P_{in}$	=	daya input motor induksi (Watt)

Perhitungan % beban motor, untuk mencari besar pembebanan motor terlebih dahulu menentukan nilai daya mekanik dengan mengambil data name plate atau dengan rumus

$$\%beban = \frac{P_{in}}{P_r} \times 100 \% \quad (2.8)$$

Kecepatan sinkron motor :

$$n_s = 120 \cdot \frac{f}{p} (\text{rpm}) \quad (2.9)$$

Dengan :

$P_r$	= Daya mekanis atau daya rated motor
$n_s$	= Kecepatan sinkronmotor (rpm)
$f$	= Frekuensi (Hz)
$p$	= Jumlah kutub

### 1. Faktor – Faktor Yang Mempengaruhi Efisiensi Motor Induksi

Motor mengubah energi listrik menjadi energi mekanik untuk melayani beban tertentu. Tentunya besar energi mekanik ini pasti lebih rendah dari energi listrik. Besar efisiensi motor ditentukan oleh kehilangan dasar yang dapat dikurangi hanya oleh perubahan pada rancangan motor dan kondisi operasi. Kehilangan dapat bervariasi kurang lebih 20 % hingga 20%.

Tabel 2.1 jenis kehilangan pada motor induksi (BEE India, 2004)

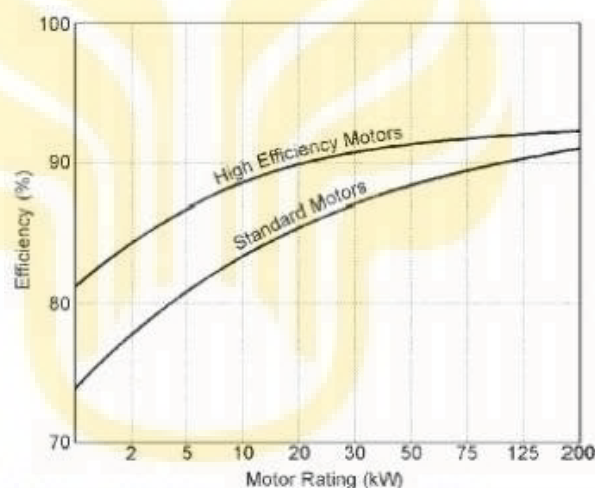
Jenis kehilangan	Presentase kehilangan total (100%)
Kehilangan tetap atau kehilangan inti	25 %
Kehilangan variabel : kehilangan stator $I^2 R$	34 %
Kehilangan variabel : kehilangan rotor $I^2 R$	21 %
Kehilangan gesekan dan penggulangan ulang	15 %
Kehilangan beban yang menyimpang	5 %

Faktor –faktor yang mempengaruhi efisiensi adalah :

1. Usia, motor baru lebih efisien akan lebih efisien dari pada motor lama.
2. Kapasitas, sebagaimana pada hampir kebanyakan peralatan, efisiensi motor meningkat dengan lanju kapasitasnya.
3. Kecepatan, motor dengan kecepatan tinggi memiliki tingkat efisiensi yang lebih tinggi.
4. Jenis, motor sangkar tupai biasanya lebih efisien daripada motor cincin geser

5. Suhu, motor yang didinginkan oleh fan dan tertutup total (TEFC) lebih efisien daripada motor *screen protected drip-proof*(SPDP)
6. Penggulungan ulang motor dapat mengakibatkan penurunan efisiensi.

Motor dengan energi yang efisien mencakup kisaran kecepatan dan beban penuh yang luas. Efisiensinya 3% hingga 7% lebih tinggi dibanding dengan motor standar sebagaimana ditunjukkan dalam gambar dibawah menggambarkan peluang perbaikan yang sering digunakan pada perancangan motor yang efisien energinya.

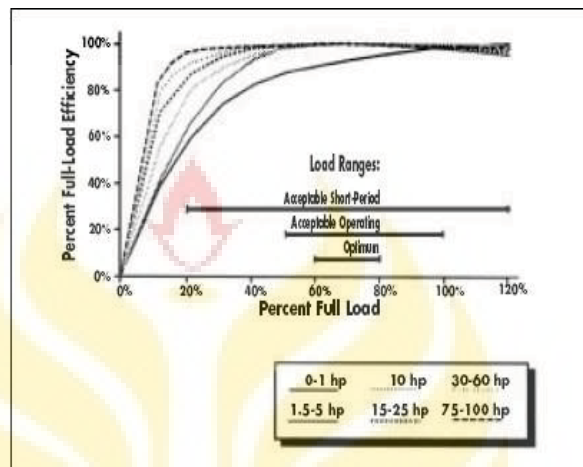


Gambar 2.3 Grafik Perbandingan Antara Motor yang Bereffisiensi Tinggi dengan Motor Standar

## 2. Hubungan Antara Beban Dan Efisiensi

Terdapat hubungan yang jelas antara efisiensi motor dan beban. Pabrik motor membuat rancangan motor untuk beroperasi pada beban 50-100% dan akan paling efisien pada beban 75%. Tetapi, jika beban turun dibawah 50% efisiensi turun dengan cepat seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2 . Mengoperasikan motor dibawah laju beban 50% memiliki dampak pada faktor dayanya. (*United Nations*

*Environment Programme*, 2006), Effisiensi 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.



Gambar 2.4 Effisiensi beban motor (US DOE)

Untuk alasan ini maka dalam mengkaji kinerja motor akan bermanfaat bila menentukan beban dan effisiensinya. Pada hampir kebanyakan negara, merupakan persyaratan bagi pihak pembuat untuk menuliskan effisiensi beban penuh pada pelat label motor. Namun demikian, bila motor beroperasi untuk waktu yang cukup lama, kadang-kadang tidak mungkin untuk mengetahui effisiensi tersebut sebab pelat label motor kadangkala sudah hilang atau sudah dicat. Untuk mengukur effisiensi motor, maka motor harus dilepaskan sambungannya dari bebandan dibiarkan untuk melalui serangkaian uji. Hasil dari uji tersebut kemudian dibandingkan dengan grafik kinerja standar yang diberikan oleh pembuatnya. Jika tidak memungkinkan untuk memutuskan sambungan motor dari beban, perkiraan nilai effisiensi didapat dari tabel khusus untuk nilai efiesiensi

motor. Lembar fakta dari US DOE memberikan tabel dengan nilai efisiensi motor untuk motor standar yang dapat digunakan jika pabrik pembuatnya tidak menyediakan data ini. Nilai efisiensi disediakan untuk :

1. Motor dengan efisiensi standar 900, 1200, 1800 dan 3600 rpm
2. Motor yang berukuran antara 10 hingga 300 HP
3. Dua jenis motor: motor anti menetes terbuka/ *open drip-proof* (ODP) dan motor yang didinginkan oleh fan dan tertutup total/ *enclosed fan-cooled motor* (TEFC)
4. Tingkat beban 25%, 50%, 75% dan 100%.

Dengan kata lain, survei terhadap motor dapat dilakukan untuk menentukan beban, yang juga memberi indikasi kinerja motor. Load motor dapat ditentukan dengan rumus :

$$\text{Load} = \frac{P_{in}}{P_r} \times 100 \% \text{ (lembar fakta U.S. DOE)} \quad (2.10)$$

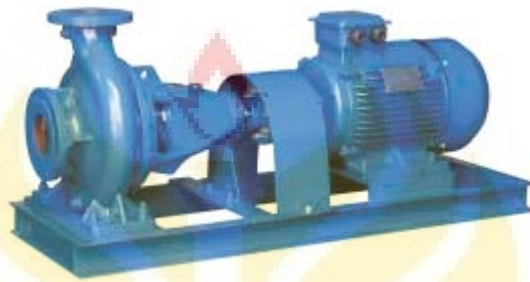
Dengan :  $P_{in}$  = Daya input motor 3 fasa (kW)  
 $P_r$  = Daya full rated load pada name plate (kW)

## 2.2.5 Pompa Sentrifugal

### 1. Efisiensi Pompa Sentrifugal

Pompa merupakan salah satu jenis mesin yang berfungsi untuk memindahkan zat cair dari suatu tempat ke tempat yang diinginkan. Zat cair tersebut contohnya adalah air, oli atau minyak pelumas, serta fluida lainnya yang tak mampu mengalir. Industri-industri banyak menggunakan pompa sebagai salah satu peralatan bantu yang penting untuk proses produksi (Sunyoto, dkk : 2008).

Pompa yang sangat umum didalam suatu industri, biasanya sekitar 70% pompa yang digunakan dalam suatu industri adalah pompa sentrifugal. Pompa Sentrifugal adalah pompa dengan prinsip kerja merubah energi kinetis (kecepatan) cairan menjadi energi potensial (tekanan) melalui suatu impeler yang berputar dalam suatu casing.



Gambar 2.5 Pompa *Centrifugal*

Pompa ini terdiri dari komponen utama berupa kipas (*impeler*) yang dapat berputar dalam sebuah casing (rumah pompa), casing tersebut dihubungkan dengan saluran isap dan saluran tekan. Untuk menjaga agar didalam casing selalu terisi cairan, maka ada saluran isap yang harus dilengkapi dengan katup kaki (*foot valve*). Impeler yang berputar akan memberikan gaya sentrifugal sehingga cairan yang ada pada bagian pusat impeler akan terlempar keluar dari impeler yang kemudian ditahan casing sehingga menimbulkan tekanan alir. Effisiensi pompa dapat dihitung dengan rumus :

$$\eta_p = \frac{P_h}{P_s} \times 100 \% \quad (2.11)$$

Dengan :

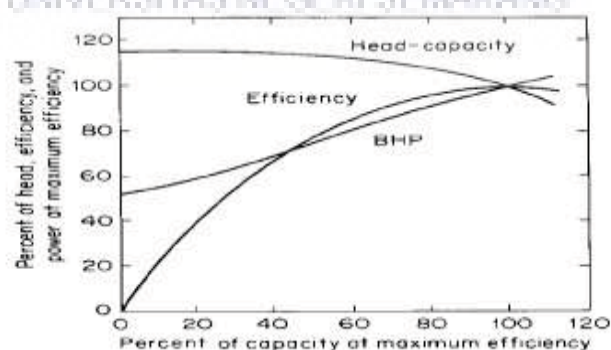
- $\eta_p$  = Effisiensi pompa (%)
- $P_h$  = Daya hidrolis pompa (Watt)
- $P_s$  = Daya input motor (Watt)

## 2. Karakteristik Pompa

Karakteristik dari pompa sentrifugal merupakan hubungan antara tekanan yang dibangkitkan (*head*) dan kecepatan aliran volum (kapasitas). Karakteristik dapat juga menyertakan kurva efisiensi dan harga brake horse power-nya. Karakteristik pompa sentrifugal dapat digambarkan dalam kurva karakteristik yang melukiskan jalannya lintasan dan besaran-besaran tertentu terhadap besaran kapasitas, besaran-besaran itu adalah :

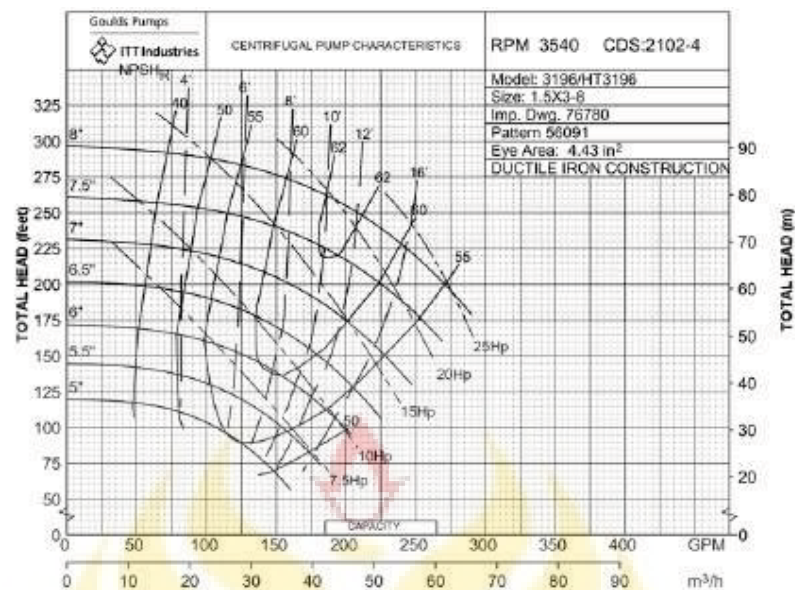
1. *Head* pompa ( H )
2. Daya pompa ( P )
3. Efisiensi pompa (  $\eta$  )

Karakteristik pompa berbeda-beda berdasarkan pada jenis pompa, putaran spesifik dan pabrik pembuatnya. Contoh karakteristik sebuah pompa dapat digambarkan dalam Gambar 2.4. Kurva-kurva karakteristik, yang menyatakan besarnya head total pompa, daya poros, dan efisiensi pompa, terhadap kapasitas. Kurva performansi tersebut, pada umumnya digambarkan pada putaran yang tetap. Kurva efisiensi terhadap kapasitas dari pompa sentrifugal umumnya berbentuk lengkung seperti kurva berikut ini:



Gambar 2.6 Kurva *Head*, Efisiensi dan Daya





Gambar 2.7 Kurva kinerja pompa sentrifugal diberikan oleh pemasok (Biro Efisiensi Energi, 2004)

## 2.2.6 Daya Listrik

### 1. Daya listrik pada sistem listrik 1 fasa

Terdapat tiga macam daya listrik yang digunakan untuk menggambarkan penggunaan energi listrik, yaitu daya nyata atau daya aktif, daya reaktif serta daya semu atau daya kompleks (Sanjeev Sharma, 2007). Daya nyata atau daya aktif adalah daya listrik yang digunakan secara nyata, misalnya untuk menghasilkan panas, cahaya atau putaran pada motor listrik. Daya nyata dihasilkan oleh beban-beban listrik yang bersifat resistif murni (Heinz Reiger, 1987). Besarnya daya nyata sebanding dengan kuadrat arus listrik yang mengalir pada beban resistif dan dinyatakan dalam satuan Watt (Sanjeev Sharma, 2007), di mana :

$$P = I^2 R \quad (2.12)$$

Dimana :  $P$  = Daya (Watt)

$I$  = Arus listrik (Ampere)

$R$  = Tahanan (Ohm)

Daya reaktif dinyatakan dengan satuan VAR (Volt Ampere Reaktan) adalah daya listrik yang dihasilkan oleh beban-beban yang bersifat reaktansi. Terdapat dua jenis beban reaktansi, yaitu reaktansi induktif dan reaktansi kapasitif. Beban - beban yang bersifat induktif akan menyerap daya reaktif untuk menghasilkan medan magnet. Contoh beban listrik yang bersifat induktif antara lain transformator, motor induksi satu fasa maupun tiga fasa yang biasa digunakan untuk menggerakkan kipas angin, pompa air, lift, eskalator, kompresor, konveyor dan lain-lain. Beban – beban yang bersifat kapasitif akan menyerap daya reaktif untuk menghasilkan medan listrik. Contoh beban yang bersifat kapasitif adalah kapasitor (Heinz Reiger, 1987). Besarnya daya reaktif sebanding dengan kuadrat arus listrik yang mengalir pada beban reaktansi di mana (Sanjeev Sharma, 2007) :

$$Q = I^2 X \quad (2.13)$$

$$X = X_L - X_C \quad (2.14)$$

Dimana :

- $Q$  = Daya (VAR)
- $X$  = Reaktansi total (Ohm)
- $X_L$  = Reaktansi induktif (Ohm)
- $X_C$  = Reaktansi kapasitif (Ohm)

Daya kompleks atau lebih sering dikenal sebagai daya semu adalah penjumlahan secara vektor antara daya aktif dan daya reaktif, di mana :

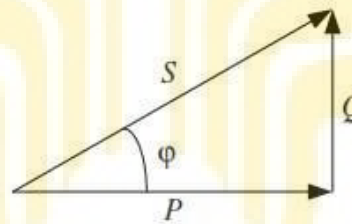
$$S = P + jQ \quad (2.15)$$

Daya kompleks dinyatakan dengan satuan VA (Volt Ampere) adalah hasil kali antara besarnya tegangan dan arus listrik yang mengalir pada beban (Sanjeev Sharma, 2007), di mana :

$$S = V \cdot I \quad (2.16)$$

Dimana :  
 S = Daya semu (VA)  
 V = Tegangan (Volt)  
 I = Arus listrik (A)

Hubungan ketiga buah daya listrik yaitu daya aktif P, daya reaktif Q serta daya kompleks S, dinyatakan dengan sebuah segitiga, yang disebut segitiga daya (B. L. Theraja, 1984) sebagai berikut :



Gambar 2.8 Segitiga daya

Dari gambar segitiga daya tersebut, hubungan antara ketiga daya listrik dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.17)$$

$$P = S \cos \varphi \quad (2.18)$$

$$P = VI \cos \varphi \quad (2.19)$$

$$Q = S \sin \varphi \quad (2.20)$$

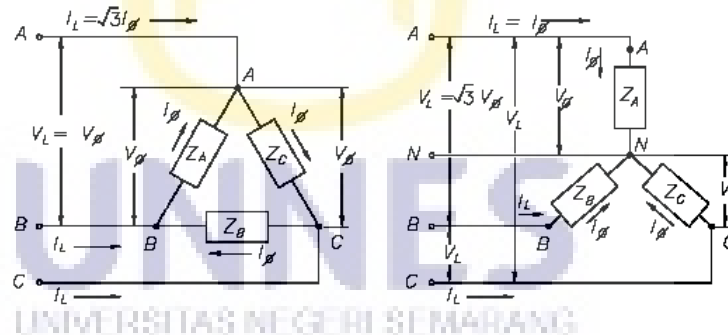
$$Q = VI \sin \varphi \quad (2.21)$$

$$\cos \varphi = pf = \frac{P}{S} \quad (2.22)$$

$\varphi$  adalah sudut antara daya aktif dan daya kompleks  $S$ , sehingga  $\cos \varphi$  didefinisikan sebagai faktor daya (power factor atau  $pf$ ). Untuk beban yang bersifat induktif,  $pf$  *lagging* di mana arusnya tertinggal dari tegangannya. Dan untuk beban yang bersifat kapasitif, maka faktor dayanya *leading* di mana arusnya mendahului tegangannya.

## 2. Daya Listrik Pada Sistem Listrik 3 fasa

Daya yang diberikan oleh generator tiga fasa atau yang diserap oleh beban tiga fasa adalah jumlah daya dari tiap-tiap fasa Pada suatu rangkaian yang seimbang, daya pada semua fasa adalah sama yaitu 3 kali daya dari masing-masing fasa. (William D. Steven, Jr. 1994).



Gambar 2.9 Hubungan segitiga dan bintang pada beban seimbang

Untuk suatu beban terhubung bintang (Y) seimbang maka berlaku persamaan

$$V_P = |V_{an}| = |V_{bn}| = |V_{cn}| \quad (2.23)$$

$$I_P = |I_{an}| = |I_{bn}| = |I_{cn}| \quad (2.24)$$

Maka daya tiga fasa total adalah :

$$P = 3 V_P I_P \cos \theta_P \quad (2.25)$$

$$Q = V_P I_P \sin \theta_P \quad (2.26)$$

Dimana  $\theta_P$  adalah sudut arus fasa yang tertinggal (*lagging*) terhadap tegangan fasanya, dan sama dengan sudut dari impedansi masing-masing fasa. Jika  $V_L$  dan  $I_L$  adalah besarnya tegangan antara saluran dan arus saluran, maka :

$$V_P = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \quad \text{dan} \quad I_P = I_L \quad (2.27)$$

Maka dengan mensubstitusikan ke persamaan (2.26) diperoleh :

$$P = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta_P \quad (2.28)$$

$$Q = \sqrt{3} V_L I_L \sin \theta_P \quad (2.29)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3} V_L I_L \quad (2.30)$$

Jika beban seimbang dihubungkan secara segitiga ( $\Delta$ ), tegangan pada masing-masing impedansi adalah tegangan antar saluran dan arus yang mengalir sama dengan besarnya arus saluran dibagi  $\sqrt{3}$  maka berlaku :

$$V_P = V_L \quad \text{dan} \quad I_P = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \quad (2.31)$$

Daya total adalah :

$$P = 3 V_P I_P \cos \theta_P \quad (2.32)$$

Dan dengan mensubstitusikan nilai  $V_P$  dan  $I_P$  kedalam persamaan (2.33) ke dalam persamaan (2.34), diperoleh

$$P = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta_P \quad (2.33)$$

Yang ternyata identik dengan persamaan (2.29). sehingga persamaan (2.30) dan (2.31) juga berlaku, tanpa memandang apakah beban dihubungkan secara  $\Delta$  atau Y.

### 2.2.7 Kualitas daya listrik

Istilah kualitas daya listrik merupakan suatu konsep yang memberikan gambaran tentang baik atau buruknya mutu daya listrik akibat adanya beberapa jenis gangguan yang terjadi pada sistem kelistrikan (Roger C. Dugan, 1996). Suatu industri manufaktur dapat mengartikan kualitas daya listrik adalah karakteristik dari suatu catu daya listrik yang memungkinkan peralatan-peralatan yang dimiliki industri tersebut dapat bekerja dengan baik. Kualitas daya listrik adalah setiap masalah daya listrik yang berbentuk penyimpangan tegangan, arus atau frekuensi yang mengakibatkan kegagalan ataupun kesalahan operasi pada peralatan-peralatan yang terjadi pada konsumen energi listrik (Roger C. Dugan, 1996). Daya adalah suatu nilai dari energi listrik yang dikirimkan dan didistribusikan, di mana besarnya daya listrik tersebut sebanding dengan perkalian besarnya tegangan dan arus listriknya. Sistem suplai daya listrik dapat dikendalikan oleh kualitas dari tegangan, dan tidak dapat dikendalikan oleh arus listrik karena arus listrik berada pada sisi beban yang bersifat individual, sehingga pada dasarnya kualitas daya adalah kualitas dari tegangan itu sendiri (Roger C. Dugan, 1996).

### 2.2.8 Jenis –Jenis Permasalahan Kualitas Daya Listrik

Permasalahan kualitas daya listrik disebabkan oleh gejala-gejala atau fenomena-fenomena elektromagnetik yang terjadi pada sistem tenaga listrik. Gejala elektromagnetik yang menyebabkan permasalahan kualitas daya adalah (Roger C. Dugan, 1996) :

1. Gejala Peralihan (*Transient*), yaitu suatu gejala perubahan variabel (tegangan, arus dan lain-lain) yang terjadi selama masa transisi dari keadaan operasi tunak (*steady state*) menjadi keadaan yang lain.
2. Gejala Perubahan Tegangan Durasi Pendek (*Short-Duration Variations*), yaitu suatu gejala perubahan nilai tegangan dalam waktu yang singkat yaitu kurang dari 1 (satu) menit.
3. Gejala Perubahan Tegangan Durasi Panjang (*Long-Duration Variations*), yaitu suatu gejala perubahan nilai tegangan, dalam waktu yang lama yaitu lebih dari 1 (satu) menit.
4. Ketidakeimbangan Tegangan, adalah gejala perbedaan besarnya tegangan dalam sistem tiga fasa serta sudut fasanya
5. Distorsi Gelombang, adalah gejala penyimpangan dari suatu gelombang (tegangan dan arus) dari bentuk idealnya berupa gelombang sinusoidal
6. Fluktuasi Tegangan, adalah gejala perubahan besarnya tegangan secara sistematis.
7. Gejala Perubahan Frekuensi Daya yaitu gejala penyimpangan frekuensi daya listrik pada suatu sistem tenaga listrik.

## 1. *Unbalance Voltage*

*Unbalance voltage* merupakan besarnya ketidakseimbangan tegangan antar fasa, dimana tiap fasa mempunyai besar dan sudut tegangan yang tidak standar sehingga tegangan antar fasa menjadi tidak sama. *Unbalance voltage* sangat mempengaruhi operasi beban tiga fasa, dimana menyebabkan timbulnya peningkatan temperatur, konsumsi kWh dan penurunan kemampuan operasi. Berdasarkan NEMA (MGI) part 14.35, unbalance voltage tidak lebih dari 1%. Kondisi *Unbalance* disebabkan antara lain oleh kondisi beban secara keseluruhan sistem, dimana beban satu phase tidak sama dengan phase yang lain, sehingga impedansi dari beban - beban tersebut tidak sama phase satu sama lain. Atau juga impedansi sebuah motor tidak sama phase satu dengan yang lain. Selain itu ada beberapa hal yang menyebabkan *Unbalance votage*, sebagai berikut :

1. *Unbalance* dari *power supply*.
2. Taping di trafo tidak sama.
3. Terdapat trafo *single phase* dalam sistem.
4. Terdapat *open phase* di primer trafo distribusi.
5. Terdapat *fault* atau *ground* di trafo power.
6. Terdapat *open delta* di trafo-bank.
7. Terdapat *fuse-blown* di 3 *phase* di *capasitor bank* ( *capasitor* untuk perbaikan *power factor* ) .
8. *Impedance* dari konduktor *power supply* tidak sama.
9. *Unbalance* distribusi / *single phase load* ( *lighting* ).
10. *Heavy reactive single phase load*, misal mesin *welder*.



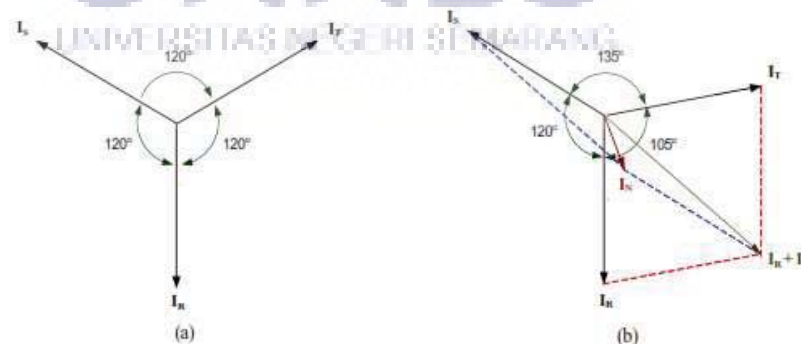
Untuk menghitung besarnya *unbalance voltage* dapat dihitung dengan persamaan:

$$\% \text{ Teg. Unbalance} = \frac{\text{teg.max} - \text{teg.rata-rata}}{\text{teg. rata-rata}} \times 100 \% \quad (2.34)$$

## 2. *Unbalance Current*

*Unbalance current* merupakan besarnya ketidakseimbangan arus yang mengalir antara tiap fasa, besar ketidakseimbangan ini menunjukkan ketidakseimbangan beban tiap fasa menyebabkan mengalirnya arus pada titik netral. Dimana arus netral ini mengakibatkan terjadinya beda tegangan antara titik netral dengan *ground* (*ground* efektif memiliki nilai nol), selain itu dengan mengalirnya arus pada titik netral maka reference tegangan pada titik netral tidak terpenuhi sehingga menyebabkan tegangan fasa ke netral turun. Kemungkinan terjadi keadaan tidak seimbang ada 3 yaitu :

1. Ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lain.
2. Ketiga vektor tidak sama besar tetapi membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lain.
3. Ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lain.



Gambar 2.10 Vektor Diagram Arus

Gambar 2.10 (a) menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya ( $I_R$   $I_S$   $I_T$ ) adalah sama dengan nol sehingga tidak muncul arus netral ( $I_N$ ), sedangkan pada gambar (b) menunjukkan vektor diagram arus yang tidak seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya ( $I_R$   $I_S$   $I_T$ ) tidak sama dengan nol sehingga muncul sebuah besaran yaitu arus netral ( $I_N$ ), yang besarnya bergantung dari seberapa besar faktor ketidak seimbangannya.

Dalam memenuhi kebutuhan tenaga listrik tersebut, terjadi pembagian beban-beban yang pada awalnya merata tetapi karena ketidakserempakan waktu penyalan beban-beban tersebut maka menimbulkan ketidakseimbangan beban yang berdampak pada penyediaan tenaga listrik. Ketidakseimbangan beban antara tiap-tiap fasa (fasa R, fasa S, dan fasa T) inilah yang menyebabkan mengalirnya arus di netral trafo. Menurut ANSI maksimum *unbalance current* yang diperbolehkan adalah 10 %. Daya trafo bila ditinjau dari sisi tegangan tinggi (primer) dapat dirumuskan dengan persamaan berikut :

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \quad (2.35)$$

Dimana :

- S = Daya transformator (kVA)
- V = Tegangan sisi primer transformator (kV)
- I = Arus jala-jala (A)

Sehingga untuk menghitung arus beban penuh (full load) dapat menggunakan rumus :

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V} \quad (2.36)$$

Dimana :  $I_{FL}$  = Arus beban penuh (A)  
 $S$  = Daya transformator (kVA)  
 $V$  = Tegangan sisi sekunder transformator (kV)

Sebagai akibat dari ketidakseimbangan beban antara tiap-tiap fasa pada sisi sekunder trafo (fasa R, fasa S, fasa T) mengalirlah arus di netral trafo. Arus yang mengalir pada penghantar netral trafo ini menyebabkan *losses* (rugi-rugi). *Losses* pada penghantar netral trafo ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N \quad (2.37)$$

Dimana :  $P_N$  = *Losses* pada penghantar netral trafo (watt)  
 $I_N$  = Arus yang mengalir pada netral trafo (A)  
 $R_N$  = Tahanan penghantar netral trafo ( $\Omega$ )

Sedangkan *losses* yang diakibatkan karena arus netral yang mengalir ke tanah (*ground*) dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$P_G = I_G^2 \cdot R_G \quad (2.38)$$

Dimana :  $P_G$  = *Losses* akibat arus netral yang mengalir ke tanah (watt)  
 $I_G$  = Arus netral yang mengalir ke tanah (A)  
 $R_G$  = Tahanan pembumian netral trafo ( $\Omega$ )

Misalnya daya sebesar P disalurkan melalui suatu saluran dengan penghantar netral. Apabila pada penyaluran daya ini arus-arus fasa dalam keadaan seimbang, maka besarnya daya dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$P = 3 \cdot V \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (2.39)$$

Dimana :  $P$  = Daya pada ujung kirim  
 $V$  = Tegangan pada ujung kirim  
 $\cos \varphi$  = Faktor daya

Daya yang sampai ujung terima akan lebih kecil dari P karena terjadi penyusutan dalam saluran. Jika  $[I]$  adalah besaran arus fasa dalam penyaluran daya sebesar P pada keadaan seimbang, maka pada penyaluran daya yang sama tetapi dengan keadaan tak seimbang besarnya arus-arus fasa dapat dinyatakan dengan koefisien a, b dan c sebagai berikut :

$$[I_R] = a [I] \quad (2.40)$$

$$[I_S] = b [I] \quad (2.41)$$

$$[I_T] = c [I] \quad (2.42)$$

Dengan  $I_R, I_S, I_T$  berturut-turut adalah arus di fasa R, S, dan T. Bila faktor daya di ketiga fasa dianggap sama walaupun besarnya arus berbeda, besarnya daya yang disalurkan dapat dinyatakan sebagai :

$$P = (a + b + c) \cdot V.I.\cos \varphi \quad (2.43)$$

Apabila persamaan (2.47) dan persamaan (2.43) menyatakan daya yang besarnya sama, maka dari kedua persamaan itu dapat diperoleh persyaratan untuk koefisien a, b, dan c yaitu :

$$a + b + c = 3 \quad (2.44)$$

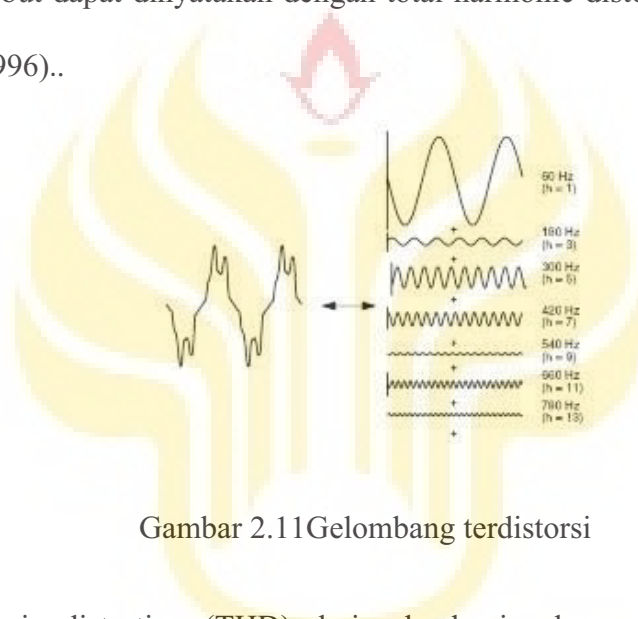
Dimana dalam keadaan seimbang nilai  $a = b = c = 1$

### 3. Distorsi Harmonik

Harmonisa adalah gangguan yang terjadi pada sistem distribusi tenaga listrik akibat terjadinya distorsi gelombang arus dan tegangan. Pada dasarnya harmonik adalah gejala pembentukan gelombang-gelombang dengan frekuensi berbeda yang

merupakan perkalian bilangan bulat dengan frekuensi dasarnya. Distorsi harmonisa berasal dari peralatan yang mempunyai karakteristik nonlinier perangkat dan beban pada sistem tenaga listrik (Roger C. Dugan, 1996).

Distorsi harmonisa, yang membentuk suatu bentuk distorsi mutu dari pada arus, tegangan, daya jaringan adalah besaran variabel yang berubah-ubah, besaran distorsi tersebut dapat dinyatakan dengan total harmonic distortion (THD)(Roger C. Dugan, 1996)..



Gambar 2.11 Gelombang terdistorsi

Total harmonic distortion (THD) dari sebuah sinyal merupakan pengukuran distorsi harmonik yang ada dan didefinisikan sebagai rasio dari jumlah daya dari seluruh komponen harmonik terhadap daya frekuensi dasar. THD dapat dinyatakan sebagai :

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} M_h^2}}{M_1} \quad (2.45)$$

Dengan  $M_h$  adalah nilai rms komponen harmonisa  $h$  dari kuantitas  $M$ . kuantitas  $M$  dapat berupa besaran tegangan  $V$  maupun besaran  $I$ , sehingga  $THD_V$  adalah

nilai distorsi harmonisa total tegangan dan  $THD_i$  adalah nilai distorsi harmonisa total arus listrik, dimana :

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1} \quad (2.46)$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} I_h^2}}{I_1} \quad (2.47)$$

Dengan :

$h$  = orde harmonisa

$I_1$  = nilai arus fundamental

$V_1$  = nilai tegangan fundamental

$I_h$  = arus harmonisa orde ke  $h$

$V_h$  = tegangan harmonisa orde ke  $h$

Presentase THD tidak boleh melebihi batas ketentuan yang direkomendasikan dalam standarisasi harmonisa IEEE-159 tahun 1992 yang menetapkan besar THD arus maksimum dijala-jala sistem atau di PCC (*Point of common coupling*) sebesar 20 %. Ada dua kriteria yang digunakan untuk mengevaluasi distorsi harmonisa, yaitu batasan untuk harmonisa arus, dan batasan untuk harmonisa tegangan. Untuk standar harmonisa arus, ditentukan oleh rasio  $I_{SC}/I_L$ .  $I_{SC}$  adalah arus hubung singkat yang ada pada PCC (*Point of Common Coupling*), sedangkan  $I_L$  adalah beban fundamental nominal. Sedangkan untuk standard harmonisa tegangan ditentukan oleh tegangan sistem yang dipakai. Standar harmonisa berdasarkan standar IEEE 519-1992.

Tabel 2.2 Standar Distorsi Harmonisa Tegangan  
Berdasarkan IEEE 519-1992.

Distrosi Tegangan Harmonik Dalam % Nilai Fundamental			
Sistem Tegangan	< 69 Kv	69-138 Kv	.138 Kv
THD	5,0	2,5	1,5

Tabel 2.3 Standar Distorsi Harmonisa  
Arus Berdasarkan IEEE 519-1992.

Distrosi Arus Harmonik Dalam % Nilai Fundamental	
$I_{SC}/I_L$	THD
<20	5,0
20-50	8,0
50-100	12,0
100-1000	15,0
>1000	20,0
THD = Total Harmonic Distortion	
$I_{SC}$ = Arus Hubungan Singkat Maksimum	
$I_L$ = Arus Beban Maksimum	

Banyaknya aplikasi beban non linier pada sistem distribusi listrik seperti konverter statis yang berbasis elektronika daya telah membuat arus sistem menjadi terdistorsi dengan persentase harmonisa arus THD yang sangat tinggi. Tingginya THD pada suatu sistem tenaga listrik dapat menyebabkan timbulnya beberapa persoalan harmonisa yang serius pada sistem tersebut dan lingkungannya, seperti terjadinya resonansi pada sistem menjadi lebih buruk, menimbulkan berbagai macam kerusakan pada peralatan listrik yang sensitif, yang semuanya menyebabkan penggunaan energi listrik menjadi tidak efektif. Seperti diketahui bahwa adanya distorsi harmonik dapat meningkatkan nilai rms tegangan dan arus sesuai dengan rumus berikut :

$$rms = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} M_h^2} = M_1 + \sqrt{1+THD^2} \quad (2.48)$$

Sehingga apabila nilai tegangan dan arus rms terukur mengalami peningkatan maka otomatis konsumsi energi dalam hal ini kWh juga mengalami peningkatan sesuai rumus :

$$kWh = |V| \cdot |I| \cdot \cos \theta \cdot t \quad (2.49)$$

Nilai rms terukur pada gelombang yang terdistorsi harmonik terdiri dari nilai rms fundamental dan nilai rms harmonik, sesuai rumus berikut :

$$rms_{terukur} = rms_{fundamental} + rms_{THD} \quad (2.50)$$

Sehingga jelas terlihat bahwa dengan meredam harmonik maka arus rms terukur, yang terukur hanya terdiri dari rms fundamental sistem, maka pengurangan konsumsi energi dapat berkurang setelah peredaman filter harmonik. Beberapa metode untuk mereduksi harmonik arus pada sistem tenaga listrik yaitu :

1. Penggunaan filter L-C
2. Penggunaan filter daya aktif
3. Penggunaan auto trafo penggeser fasa

### 2.2.9 Perbaikan Faktor Daya

Faktor daya yang tinggi sangat diperlukan dalam konsumsi daya yang besar semakin tinggi nilai faktor dayanya maka semakin baik alasannya adalah bahwa arus yang diperlukan untuk mengantarkan daya ke beban berbanding terbalik dengan faktor daya beban sebagaimana dibuktikan melalui persamaan berikut :



$$P = V.I.\cos\theta \quad (2.51)$$

$$I = \frac{P}{V \cos \theta} = \frac{P}{Vx PF} \quad (2.52)$$

Sehingga untuk tiap daya P yang diserap dan tegangan V yang digunakan, semakin kecil faktor daya yang digunakan maka akan semakin besar arus I ke beban. Arus yang lebih tinggi dari yang diperlukan sangat tidak diinginkan karena semakin besar pula rugi-rugi tegangan dan rugi-rugi daya  $I^2R$  pada saluran dan peralatan distribusi listrik yang lain. Dalam kenyataannya, faktor daya yang rendah selalu merupakan akibat dari beban induktif karena hampir seluruh beban bersifat induktif. Dari segitiga daya dapat dilihat bahwa nilai VAR yang dikonsumsi beban membuat sisi vertikal dari segitiga daya menjadi tinggi dan juga sudut  $\theta$  yang besar. Hasilnya adalah  $\cos \theta$  atau faktor daya yang kecil. Perbaikan faktor daya pada beban membutuhkan penambahan kapasitor untuk menyediakan nilai VAR yang dikonsumsi oleh beban induktif. Dari sudut pandang yang lain, kapasitor ini memulai arus ke beban dimana apabila tanpa kapasitor, arus ini akan berasal dari sumber tenaga listrik.

Untuk mendapatkan kapasitas minimum yang diperlukan untuk memperbaiki faktor daya menjadi nilai yang diinginkan, prosedur umum pertamanya adalah menghitung nilai VAR awal  $Q_i$  yang dikonsumsi beban. Hal ini diperoleh dengan rumus :

$$Q = P \tan \theta_i \quad (2.53)$$

Yang mana rumus ini diperoleh dari segitiga daya pada Gambar 2.8 kemudian menentukan sudut impedansi  $\theta_f$  dari nilai faktor daya yang diinginkan :

$$\theta_f = \cos^{-1} PF_f \quad (2.54)$$

sudut ini digunakan pada

$$Q_f = P \tan \theta_f \quad (2.55)$$

Untuk menentukan nilai total VAR  $Q_f$  untuk dikombinasikan dengan beban. Yang terakhir adalah mencari nilai VAR  $\Delta Q$  dari kapasitor yang harus disediakan.

$$\Delta Q = Q_i - Q_f \quad (2.56)$$

$$\Delta Q = P [(\tan (\cos^{-1} PF)) - \tan (\cos^{-1} PF_f)] \quad (2.57)$$

## 1. Metode Perbaikan Faktor Daya

### a. Kompensasi Global

Pada kompensasi global. Bank kapasitor dipasang paralel pada panel utama. Metode ini mudah dan sederhana. Tetapi masih ada arus reaktif yang mengalir di semua penghantar dari tempat pemasangan kapasitor hingga ke beban. Dengan demikian rugi-rugi daya pada penghantar tersebut tidak dapat ditekan.

### b. Kompensasi Sektoral

Pada kompensasi sektoral, kapasitor dipasang pada panel cabang. Kelebihan metode ini dibandingkan kompensasi global adalah ukuran kabel dari transformator hingga tempat pemasangan kapasitor dapat diperkecil, atau dengan

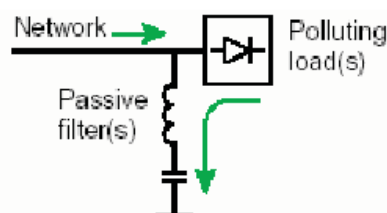
ukuran kabel yang sama dapat menyalurkan daya aktif lebih besar dan dimungkinkan penambahan beban pada sisi sekunder transformator.

### c. Kompensasi Individual

Pada kompensasi individual, kapasitor dipasang langsung pada terminal beban induktif. Metode ini paling bagus dibandingkan dengan dua metode lainnya. Rugi-rugi daya pada semua penghantar berkurang dan dapat dilakukan penambahan beban pada sisi sekunder transformator. Tetapi perlu dilakukan penyetelan ulang pada sistem proteksinya karena arus yang mengalir pada sistem proteksinya menjadi lebih kecil.

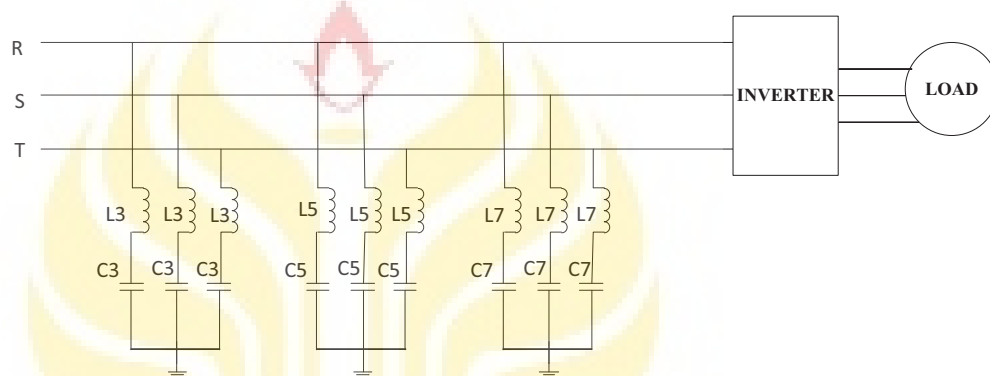
#### 2.2.10 Filter Harmonisa

Tujuan pokok dari filter harmonisa adalah untuk mereduksi amplitude frekuensi-frekuensi tertentu dari sebuah tegangan atau arus. Dengan penambahan filter harmonisa pada suatu sistem tenaga listrik yang mengandung sumber-sumber harmonisa, maka penyebaran arus harmonisa ke seluruh jaringan dapat ditekan sekecil mungkin. Selain itu filter harmonisa pada frekuensi fundamental dapat mengkompensasi daya reaktif dan dipergunakan untuk memperbaiki faktor daya sistem. Filter pasif banyak digunakan untuk mengkompensasi kerugian daya reaktif akibat adanya harmonisa pada sistem instalasi. Rangkaian filter pasif terdiri dari komponen R, L, dan C.



Gambar 2.12 Rangkaian filter pasif

Filter pasif dipasang pada sisi sumber yang dipakai untuk melewatkan arus harmonisa agar tidak menuju ke sumber. Filter Pasif tersusun dari kapasitor dan induktor dengan satu frekuensi yang disetting pada frekuensi tegangan harmonisa yang akan dihilangkan.



Gambar 2.13 Desain instalasi filter pasif single tuned

Pada prinsipnya, sebuah single tuned filter dipasang untuk setiap harmonik yang akan dihilangkan. Filter-filter ini dihubungkan pada busbar dimana pengurangan tegangan harmonik ditentukan. Bersama-sama, filter-filter ini membentuk filter bank. Langkah-langkah dalam merancang filter pasif adalah sebagai berikut:

1. Menentukan faktor daya awal dan faktor daya yang diinginkan
2. Menentukan nilai kapasitansi kapasitor sesuai dengan kebutuhan kompensasi faktor daya yang dihitung dengan persamaan :

$$Q_C = P (\tan \varphi_{awal} - \tan \varphi_{akhir}) \quad (2.58)$$

3. Menentukan frekuensi tuning filter
4. Menentukan nilai kapasitor

$$X_C = \frac{V^2}{Q_C} \quad (2.59)$$

$$\frac{1}{2 \pi F.C} = \frac{V^2}{Q_C} \quad (2.60)$$

$$C = \frac{Q_C}{2 \pi f.V^2} \quad (2.61)$$

Dengan :

- $X_C$  = impedansi jala-jala
- $C$  = Kapasitansi
- $Q_C$  = Besarnya kompensasi daya reaktif yang diperlukan
- $V$  = Tegangan pada sistem
- $f$  = Frekuensi fundamental (50 Hz)

5. Menentukan nilai induktor yang dicari berdasarkan prinsip resonansi pada orde tuningnya.

$$X_L = \frac{X_C}{n^2} \quad (2.62)$$

$$L = \frac{X_L}{2 \pi f} \quad (2.63)$$

- Dengan :
- $n$  = Orde harmonik yang difilter
  - $X_L$  = Impedansi jala-jala

6. Faktor kualitas (Q) filter didefinisikan sebagai perbandingan antara induktansi atau kapasitansi pada saat resonansi dengan besaran resonansi.

$$Q = \frac{X_0}{R} \quad (2.64)$$

- Dengan  $X_L = X_C = X_0$  (2.65)

## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan dapat disimpulkan beberapa hal, yaitu sebagai berikut :

1. Profil penggunaan energi listrik di PDAM Tirta Moedal, yaitu 10 % digunakan untuk penerangan, AC, dll, 21 % pompa P101, 8 % pompa P606, 5 % pompa P602, 26 % pompa P609 dan penggunaan energi listrik pada pompa P610 sebesar 30 %.
2. Dari hasil analisis data, terdapat beberapa pompa yang memiliki efisiensi dibawah BEP (*Best Efficiency Pump 80-90 %*) yaitu pompa P609 dengan efisiensi sebesar 76,6 % dan P610 dengan efisiensi sebesar 62,5 %. Kinerja pada beberapa pompa produksi sudah optimal, namun pada pompa P602 belum optimal dikarenakan load motor masih dibawah 50 % serta terjadi penurunan rpm 15 % dan debit yang cukup besar yaitu 21,1 %.
3. Kualitas daya pada beberapa pompa produksi sudah baik, namun pada pompa P602 masih kurang baik dimana didapatkan *unbalance voltage* sebesar 1,71 % dari standard NEMA (1%) , *unbalance current* 10,6 % dari standar ANSI (10 %), THD tegangan sebesar 6,3 % dari standar IEEE 519-1992(5%) dan THD arus sebesar 66,7 % dari standar IEEE 519-1992 (15 %), dimana dari hasil tersebut, semua parameter yang diukur tidak sesuai dengan standar maksimal yang diperbolehkan.

## 5.2 Saran

1. Untuk meningkatkan efisiensi pompa pada pompa P609 dan P610, perlu adanya peningkatan perawatan secara berkala pada pompa, memeriksa secara rutin *impeller* atau sudu-sudu pada pompa serta bagian mekanis lainnya agar rugi-rugi pada pompa dapat ditekan.
2. Perlu adanya pemasangan kapasitor bank secara individual pada setiap pompa untuk meningkatkan  $\cos \phi$  pada masing-masing pompa, dan pemasangan filter pasif single tuned untuk mereduksi harmonisa pada pompa P602.
3. Load atau pembebanan motor dapat ditingkatkan dengan pergantian motor baru pada pompa P602 dan P606 yaitu dengan daya desain 75 kW dan 150 kW. Sehingga dengan pergantian motor tersebut load motor pada pompa dapat meningkat serta dapat menekan rugi-rugi daya dan pemakaian energi listrik dapat dihemat.
4. Audit energi listrik yang dilakukan pada penelitian ini adalah audit energi awal (*preliminary audit*) yaitu audit yang dilakukan pada bagian tertentu saja sehingga untuk penelitian yang selanjutnya disarankan dilakukan audit energi menyeluruh atau rinci (*detailed audit*) pada pompa produksi yaitu pada pompa intake (P103 dan P102), dan pompa lainnya dalam proses produksi yang belum terdata dalam penelitian ini sehingga dapat diketahui bagian lain yang berpotensi mengalami pemborosan energi dan penurunan efisiensi.

### 5.3 Rekomendasi

1. Pergantian motor pada pompa P602 dan P606 dengan daya desain motor 150 kW dan 75 kW dengan untuk meningkatkan persentase load motor, sehingga penggunaan energi lebih efisien dan dapat mengurangi rugi-rugi daya sehingga konsumsi energi listrik dapat dihemat.
2. Melakukam kompensasi kapasitor individual pada setiap pompa untuk meningkatkan cos phi pada motor.
3. Penambahan filter pasif single tuned pada motor pompa P606 dan P602 untuk mereduksi persentase THD arus.



## DAFTAR PUSTAKA

- Abdurachim, Halim, Pasek, Darmawan Ari, dan Sulaiman, TA. 2002. *Audit Energi, Modul 2, Energi Conservation Efficiency And Cost Saving Course*. Bandung: PT. Fiqry Jaya Mandiri
- Ade Agustinus, Andrias. 2011. *Penggunaan Filter Pasif Untuk Mereduksi Harmonisa Akibat Pemakaian Beban Non Linear*. Solo: ITS
- Granger, John. J. 1994. *Power System Analysis*. Singapore : Mc. Graw.Hill Book co.
- HIOKI E.E CORPORATION. 2006. *HIOKI 3197 Power Quality Analyzer instruction manual*. Nagano :HIOKI E.E. CORPORATION Technical Support Section
- Kementrian Perindustrian. 2011. *Pedoman Teknis Audit Energi Dalam Implementasi Konservasi Energi Dan Pengurangan Emisi CO<sub>2</sub> Di Sektor Industri (Fase 1)*. Jakarta : BPKMI.
- PDAM Kabupaten Gresik. 2009. *Final Report Pelatihan Teknis Efisiensi Energi di Pdam Kabupaten Gresik*. Gresik : Akademi Teknik Tirta Wiyata
- Prasetyo, Hadi. 2008. *Konservasi Energi Listrik pada Industri Otomotif*. Depok : UI.
- Prasetyo, Hari. 2012. *Analisa perancangan pasif untuk meredam harmonik pada instalasi beban non linear*. *Techno Journal UNSOED*, ISSN 1410-8607 : 57-67
- Prasetyadi, Willy dkk. 2012. *Evaluasi Harmonisa dan Perencanaan filter pasif pada sisi tegangan 20 kV akibat penambahan beban pada sistem kelistrikan pabrik semen tuban*. *Jurnal Teknik ITS*, ISSN 2301-9271 : 97-102
- Ramadhani, Subhan. 2010. *Analisa Konservasi Energi Listrik pada Industri Tekstil*. Depok :UI.
- Rianto, Agus. 2007. *Audit Energi dan Analisis Peluang Penghematan Konsumsi Energi pada Sistem Pengkondisian Udara di Hotel Santika Premierer Semarang*. Semarang : UNNES.
- Sentosa Setiadji, Julius dkk. 2006. *Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses pada Trafo Distribusi*. Surabaya : Universitas Kristen Petra 68-73

- SNI 03-6196.2000. *Prosedur audit energi pada bangunan gedung*. Jakarta : Badan Standarisasi Nasional
- Sugiarto, Hadi. 2012. *Kajian Harmonisa Arus dan Tegangan Listrik di Gedung Administrasi Politeknik Negeri Pontianak*. Pontianak : Politeknik Negeri Pontianak
- Sugiyono. 2009. *Metode Penelitian Kuantitatif Kualitatif R & D*. Bandung: Alfabeta.
- Sungkowono, Heri. 2013. *Perancangan Filter Pasif Single Tuned Untuk Mereduksi Harmonisa pada Beban Non Linear*. Jurnal ELTEK, ISSN 1693 - 4024 : 146 - 157
- Sunyoto, Karnowo, S.M Bondan Respati. 2008. *Teknik Mesin Industri jilid 1*. Jakarta : Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan.
- Stephen J. Chapman. 2002. *Electrical Machinery and Power System Fundamentals*. New York : Mc. Graw. Hill
- \_\_\_\_\_. 2005. *Electrical Machinery Fundamentals fourth edition*. New York : Mc. Graw. Hill
- Thumann, Albert. & William J.Y. 2008. *Handbook of Energy audits (Seven edition)*. Lilburn: Farimont Press.
- UNEP.2006. *Pedoman Efisiensi Energi Untuk Industri di Asia*. “Motor listrik, pompa dan sistem pemompaan” Melalui [www.energyefficiency.org](http://www.energyefficiency.org) di unduh pada 27/03/2016 pukul 10.00 WIB
- William D.stevenson, Jr. 1994. *Analisis Sistem Tenaga Listrik*. Alih bahasa.Kamal idris.Jakarta : Penerbit Erlangga