



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**ANALISIS PERBANDINGAN PEMBACAAN KWH METER  
ANALOG DENGAN KWH METER DIGITAL PADA  
KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN**

**SKRIPSI**

**Boromeus Sakti Wibisana  
04 04 03 022 9**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
TEKNIK ELEKTRO  
DESEMBER 2008**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**ANALISIS PERBANDINGAN PEMBACAAN KWH METER  
ANALOG DENGAN KWH METER DIGITAL PADA  
KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**Boromeus Sakti Wibisana  
04 04 03 022 9**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
TEKNIK ELEKTRO  
SARJANA TEKNIK REGULER  
DEPOK  
DESEMBER 2008**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINILITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar

**Nama** : Boromeus Sakti Wibisana

**NPM** : 04 04 03 022 9

**Tanda tangan** :

**Tanggal** : 12 Desember 2008

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Boromeus Sakti Wibisana  
NPM : 04 04 03 022 9  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul Skripsi : Analisa Perbandingan Pembacaan KWh meter Analog dengan KWh meter Digital pada Ketidakseimbangan Beban

**Telah berhasil dipertahankan dihadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.**

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Amien Rahardjo, MT

Penguji : Dr.Ir. Rudy Setiabudy

Penguji : Budi Sudiarto, ST,MT



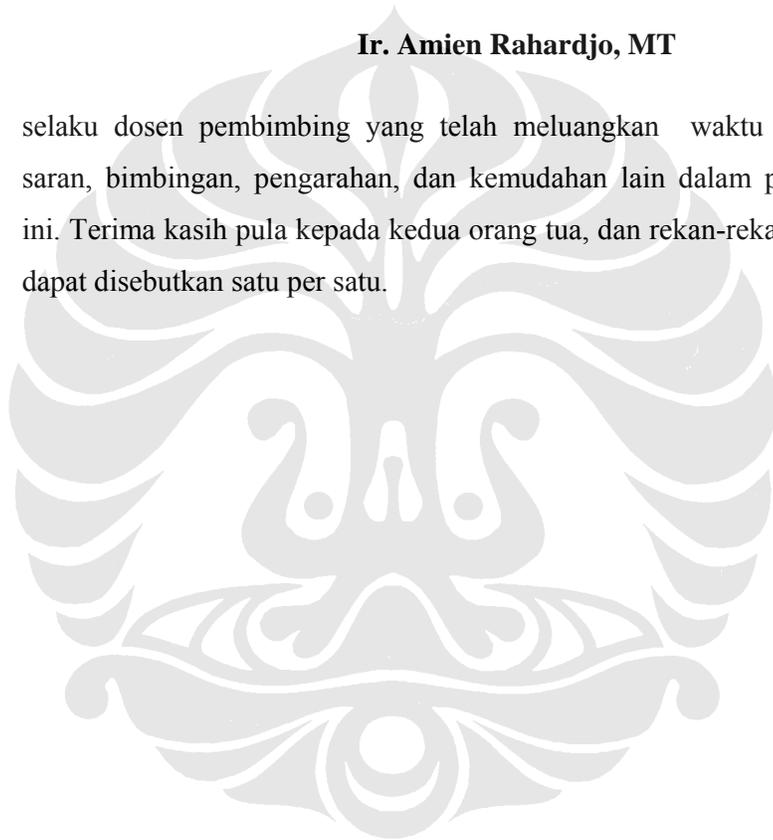
Ditetapkan di : Depok  
Tanggal : 12 Desember 2008

## UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Tak lupa penulis juga mengucapkan terima kasih kepada:

### **Ir. Amien Rahardjo, MT**

selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu untuk memberikan saran, bimbingan, pengarahan, dan kemudahan lain dalam penyelesaian skripsi ini. Terima kasih pula kepada kedua orang tua, dan rekan-rekan semua yang tidak dapat disebutkan satu per satu.



**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Boromeus Sakti Wibisana  
NPM : 04 04 03 022 9  
Program Studi : Teknik Elektro  
Departemen : Teknik Elektro  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**Analisis Perbandingan Pembacaan KWh meter Analog dengan KWh meter  
Digital pada Ketidakeimbangan Beban**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok  
Pada tanggal : 12 Desember 2008  
Yang menyatakan

(Boromeus Sakti Wibisana)

## ABSTRAK

Nama : Boromeus Sakti Wibisana  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul : Analisis Perbandingan Pengaruh Pembacaan KWh meter Analog dengan KWh meter Digital pada Ketidakseimbangan Beban

KWH meter merupakan instrumen yang memiliki fungsi utama melakukan pengukuran energi listrik. KWh-meter digunakan oleh PLN untuk mendata dan menganalisa penggunaan energi oleh konsumen. KWH meter yang dikenal luas oleh masyarakat umum adalah KWH meter konvensional yang memiliki fitur terbatas. KWh-meter konvensional ini kita kenal dengan KWh-meter analog. KWh-meter analog mampu membaca jumlah pemakaian daya aktif dengan cukup baik. Namun daya reaktif yang terbaca tidak cukup baik, oleh karena itu digunakan KWh-meter digital, yang dapat membaca daya aktif dengan baik begitu juga dengan daya reaktifnya. KWh-meter digital memiliki ketelitian yang lebih baik dari pada KWh-meter analog. Ketelitian dari KWh-meter digital ini membuat PLN akan melakukan penggantian pemasangan KWh-meter analog dengan KWh-meter digital.

Kata kunci:

KWh-meter, Daya aktif dan daya reaktif, Ketidakseimbangan beban

## ABSTRACT

Name : Boromeus Sakti Wibisana  
Study Program : Teknik Elektro  
Title : Comparative Analysis Reading of Analog kWh meter with Digital kWh meter in imbalance load

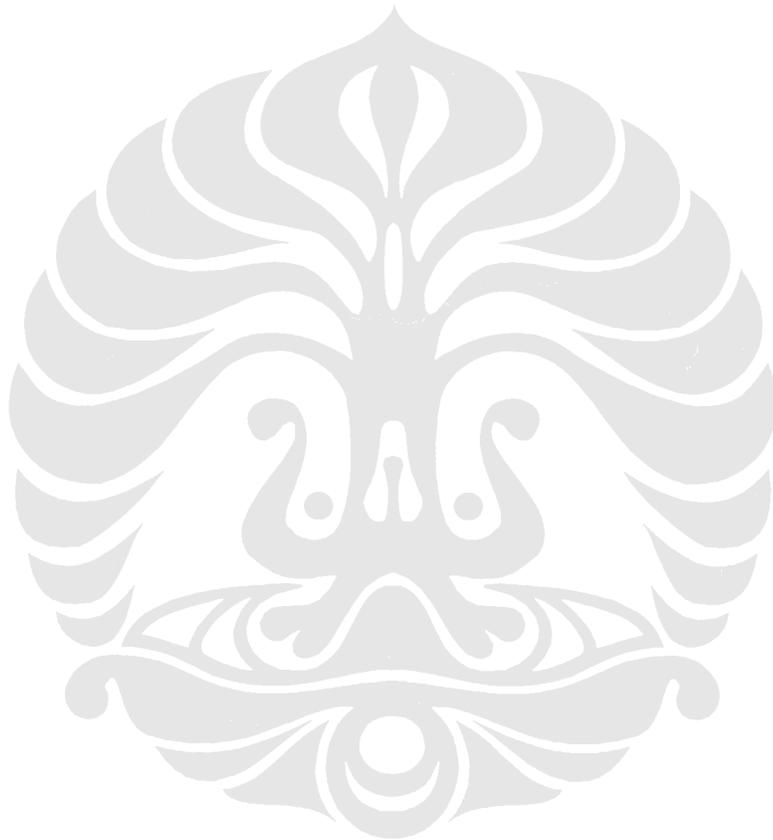
KWH meter is the instrument that have a main function to measure the electricity energy. KWh-meter is used by PLN to record and analyze the energy that used by konsumen. KWH meter that we already know is conventional KWH meter that have limited function. The conventional KWh-meter we know as analogue KWh-meter. The analogue KWh-meter can read total amount of active power used well enough. But the reactive power can't be read as well as the active power. therefore we use the digital KWh-meter, that can read the reactive power as well as the active power. Digital KWh-meter is also more accurate than the analogue. The accuracy of the Digital KWh-meter make PLN will change the installation of the analogue KWh-meter to Digital KWh-meter.

Key word:  
KWh-meter, active and reactive power, Imbalance load

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
UCAPAN TERIMA KASIH .....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR .....	v
ABSTRAK .....	vi
ABSTRACT .....	vii
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	x
DAFTAR TABEL .....	xii
<b>1 PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Tujuan Penulisan .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Sistematika Penulisan .....	2
<b>2 SISTEM TENAGA LISTRIK TIGA FASA .....</b>	<b>3</b>
2.1 Rangkaian Listrik 3 Fasa.....	3
2.2 Daya Pada Rangkaian Listrik 3 Fasa .....	6
2.3 Komponen Simetris.....	9
2.4 Pengukuran Besaran Listrik .....	12
2.4.1 Pengukuran Arus dan Tegangan Efektif Bolak-Balik.....	12
2.4.2 Pengukuran Daya dan Faktor Daya.....	13
2.4.3 Pengukuran Energi.....	13
<b>3 PENGUJIAN DAN HASIL PENGUKURAN .....</b>	<b>19</b>
3.1 Rangkaian dan Peralatan Pengujian .....	19
3.1.1 Rangkaian Pengujian.....	19
3.1.2 Peralatan Pengujian.....	20
3.1.2.1 KWH-meter Analog.....	22
3.1.2.2 KWH-meter Digital .....	23
3.2 Hasil Pengujian .....	24
<b>4 ANALISIS HASIL PENGUKURAN.....</b>	<b>35</b>
4.1 Beban Resistif .....	36
4.2 Beban Induktif.....	38
4.3 Beban Kapasitif.....	42
4.4 Beban Campuran .....	43
4.4.1 Beban Resistif-Induktif .....	43
4.4.2 Beban Resistif-Kapasitif .....	44
4.4 Analisa Perbandingan.....	45

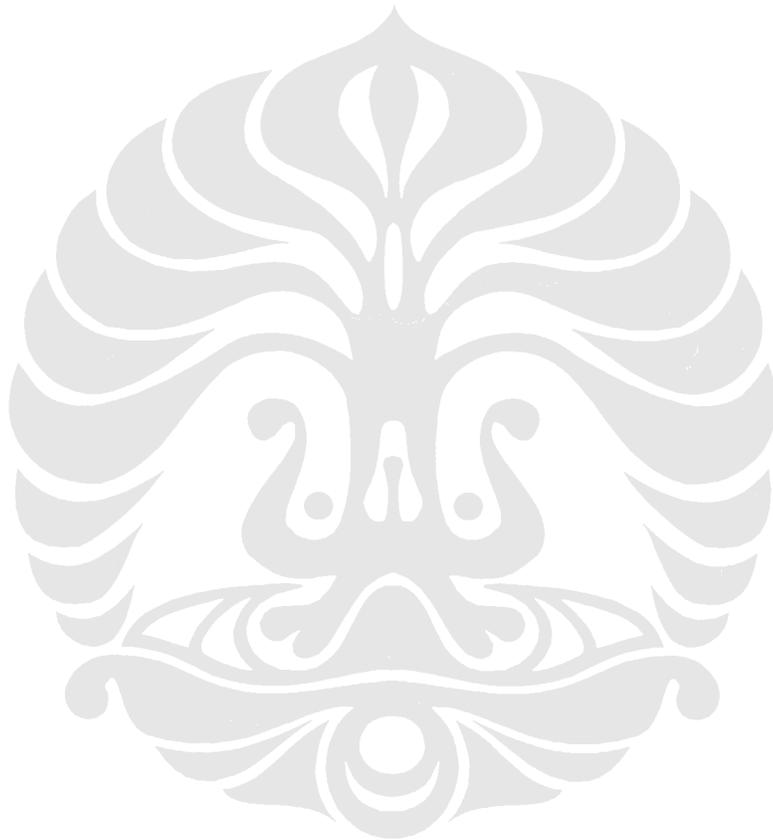
<b>V KESIMPULAN .....</b>	<b>48</b>
<b>DAFTAR REFERENSI .....</b>	<b>49</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>50</b>



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Skema Sistem Tenaga Listrik	3
Gambar 2.2	Gelombang Tiga Fasa	4
Gambar 2.3	Diagram Fasor Tegangan	4
Gambar 2.4	Rangkaian hubung bintang-bintang (Y-Y)	5
Gambar 2.5	Beban hubung bintang seimbang	6
Gambar 2.6	Diagram fasor dalam grafik V~I	8
Gambar 2.7	Komponen simetris tegangan dari sistem 3 fasa yang tidak seimbang	9
Gambar 2.8	Tegangan sistem sebagai penjumlahan dari komponen simetris	10
Gambar 2.9	Diagram fasor untuk beban R, L dan C	15
Gambar 2.10	Rangkaian kWh-meter satu fasa	16
Gambar 2.11	Rangkaian kWh-meter tiga fasa	17
Gambar 3.1	Rangkaian pengujian	19
Gambar 3.2	KWh-meter satu fasa Schlumberger	20
Gambar 3.3	KWh-meter satu fasa Actaris	21
Gambar 3.4	KWh-meter tiga fasa PT. Limaputra Vilindo	21
Gambar 3.5	KWh-meter tiga fasa PT. Indo Electric instrument	22
Gambar 3.6	Konstruksi kWh-meter analog tipe induksi	23
Gambar 3.7	Prinsip kerja kWh-meter digital	24
Gambar 4.1	Grafik Perbandingan Pengukuran KWh-meter 1 fasa dengan KWh-meter 3 fasa untuk beban resistif	36
Gambar 4.2	Grafik Perbandingan Pengukuran KWh-meter 1 fasa dengan KWh-meter 3 fasa untuk beban induktif	39
Gambar 4.3	Gambar prinsip kerja dari kWh-meter analog 1 fasa	43

Gambar 4.4	Grafik Perbandingan Pengukuran KWh-meter 1 fasa dengan KWh-meter 3 fasa untuk beban campuran	45
Gambar 4.4	Grafik Perbandingan Pengukuran KWh-meter 1 fasa dengan KWh-meter 3 fasa untuk beban resistif-induktif	46
Gambar 4.4	Grafik Perbandingan Pengukuran KWh-meter 1 fasa dengan KWh-meter 3 fasa untuk beban resistif-kapasitif	47



## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Data Pengujian untuk Beban Resistif dengan kWh-meter digital	27
Tabel 3.2	Data Pengujian untuk Beban Resistif dengan kWh-meter analog	28
Tabel 3.3	Data Pengujian untuk Beban Induktif dengan kWh-meter digital	29
Tabel 3.4	Data Pengujian untuk Beban Induktif dengan kWh-meter analog	30
Tabel 3.5	Data Pengujian untuk Beban Kapasitif dengan kWh-meter digital	31
Tabel 3.6	Data Pengujian untuk Beban Kapasitif dengan kWh-meter analog	32
Tabel 3.7	Data Pengujian untuk Pembebanan Resistif-Induktif	33
Tabel 3.8	Data Pengujian untuk Pembebanan Resistif-Capasitif	34
Tabel 4.1	Perbandingan hasil pengukuran kWh-meter 1 dan 3 fasa untuk beban r	34
Tabel 4.2	Perbandingan presentase kesalahan kWh-meter 3 fasa analog dan 3 fasa digital untuk beban resistif	37
Tabel 4.3	Perbandingan hasil pengukuran kWh-meter 1 dan 3 fasa untuk beban induktif	39
Tabel 4.4	Perbandingan presentase kesalahan kWh-meter 3 fasa analog dan 3 fasa digital untuk beban induktif	41
Tabel 4.4	Perbandingan hasil pengukuran kWh-meter 1 dan 3 fasa untuk beban campuran	44

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1.LATAR BELAKANG**

Penggunaan listrik sudah menjadi kebutuhan utama bagi semua masyarakat. Tanpa disadari semua kegiatan yang dilakukan oleh masyarakat luas selalu membutuhkan energi listrik baik itu untuk keperluan rumah tangga maupun untuk keperluan industri.

Sistem tenaga listrik yang digunakan di Indonesia merupakan sistem 3 fasa arus bolak balik. Daya 3 fasa dibangkitkan oleh generator 3 fasa yang kemudian disalurkan melalui sistem transmisi yang kemudian disalurkan melalui saluran distribusi ke beban-beban. Daya yang disalurkan pada saluran distribusi ke beban-beban menggunakan kawat 3 fasa dan 1 kawat netral. Daya yang disalurkan dari generator merupakan daya yang sama untuk setiap fasanya sehingga ketika sampai di beban daya yang diterima seharusnya sama untuk setiap fasa. Namun pada kenyataannya daya tidak sama untuk setiap fasa yang bisa disebabkan oleh gangguan pada sistem transmisi maupun distribusi dan beban yang tidak seimbang untuk setiap fasa. Namun pada kondisi normal sistem transmisi dan sistem distribusi tidak terlalu berpengaruh karena tidak terlalu variatif, karena pada operasionalnya dengan yang kinerja yang diatur tidak terlalu berbeda. Sedangkan beban merupakan komponen yang sangat variatif karena nilainya, baik impedansi maupun faktor dayanya, cenderung selalu berubah-ubah.

Kwh meter merupakan komponen elektronik yang digunakan untuk melakukan pembacaan penggunaan daya pada rumah tangga maupun industri. Daya yang digunakan oleh konsumen listrik akan tercatat oleh kwh meter per satuan jam. Pada konsumen rumah tangga digunakan kwh meter 1 fasa karena daya yang digunakan adalah daya 1 fasa sedangkan pada industri, daya yang digunakan adalah daya 3 fasa sehingga kwh meter yang digunakan adalah kwh meter 3 fasa.

Ketidakseimbangan pada beban mengakibatkan daya yang diterima oleh beban pada masing-masing fasa juga akan berbeda. Pada skripsi ini akan

dilakukan percobaan untuk membuktikan pengaruh ketidakseimbangan beban pada pembacaan pengukuran, dalam hal ini menggunakan kwh meter, baik analog maupun digital, untuk melihat daya yang diterima oleh beban baik pada masing-masing fasa maupun untuk 3 fasa secara keseluruhan.

## **1.2.TUJUAN PENELITIAN**

Tujuan dari penulisan skripsi ini adalah untuk mengetahui pengaruh dari beban-beban yang tidak seimbang pada suatu sistem daya listrik 3 fasa terhadap hasil pembacaan dengan menggunakan kwh meter analog dan kwh meter digital. Kemudian dilihat perbedaan hasil pengukuran daya masing-masing fasa dengan hasil pengukuran 3 fasa serta pengaruhnya berupa kerugian yang diterima oleh produsen maupun konsumen listrik.

## **1.3.PEMBATASAN MASALAH**

Penulisan skripsi ini menggunakan data yang diperoleh dari hasil pengujian di laboratorium. Pengujian dilakukan dengan melakukan pembebanan terhadap jaringan tiga fasa yang merupakan tegangan tiga fasa dari PLN sebesar 220 volt untuk masing-masing tegangan fasanya. Pembebanan yang diberikan berupa beban resistif, induktif, kapasitif serta penggabungan ketiganya. Beban yang digunakan dibatasi sampai sebesar 1 kilo watt.

## **1.4.SISTEMATIKA PENULISAN**

Skripsi ini disusun dalam 5 bab. Bab pertama merupakan pendahuluan yang berisi latar belakang, tujuan penelitian, pembatasan masalah dan sistematika penulisan. Bab kedua membahas tentang teori sistem daya listrik 3 fasa, komponen simetris dan kwh meter. Bab ketiga merupakan metode pengukuran berisi data dan hasil-hasil pengujian. Bab keempat merupakan analisa dari hasil pengukuran yang telah dilakukan. Bab kelima merupakan kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan.

## BAB 2

### SISTEM TENAGA LISTRIK TIGA FASA

Sistem jaringan listrik yang terpasang di Indonesia merupakan jaringan listrik tiga fasa yang disalurkan oleh produsen listrik, dalam hal ini PLN, ke konsumen listrik yakni rumah tangga dan industri. Secara umum sistem tenaga listrik terbagi ke dalam beberapa bagian yakni pembangkitan, penyaluran (transmisi) dan beban. Berikut skema suatu sistem tenaga listrik tiga fasa.

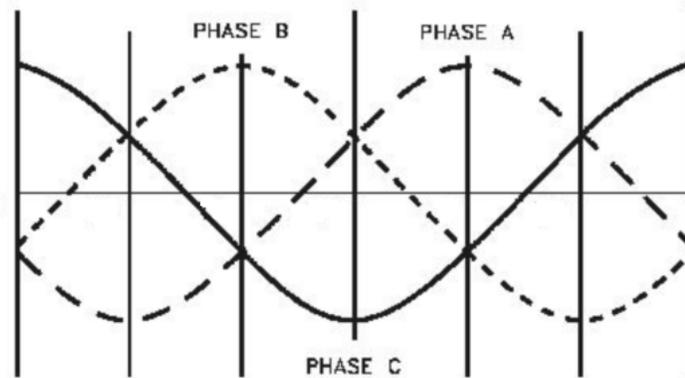


**Gambar 2.1** Skema sistem tenaga listrik

Generator akan membangkitkan daya listrik yang akan disalurkan, daya yang dibangkitkan adalah daya listrik tiga fasa. Pada sistem transmisi dibutuhkan daya yang besar, karena pada sistem transmisi ada kerugian daya yang disebabkan oleh faktor jarak. Karena itu, untuk mengurangi kerugian daya tersebut, tegangan akan dinaikkan menggunakan trafo *step-up* menjadi tegangan tinggi atau tegangan extra tinggi. Agar dapat digunakan oleh konsumen, sebelum didistribusikan, tegangan kembali diturunkan menjadi 380/220 V menggunakan trafo *step-down*. Daya yang diterima oleh konsumen adalah daya listrik arus bolak-balik tiga fasa. Untuk industri, daya yang digunakan adalah daya listrik tiga fasa, sedangkan untuk rumah tangga daya yang digunakan adalah daya listrik satu fasa.

#### 2.1. RANGKAIAN LISTRIK 3 FASA

Rangkaian listrik 3 fasa merupakan rangkaian listrik yang memiliki tiga buah keluaran simetris dan memiliki perbedaan sudut untuk setiap fasanya sebesar  $120^\circ$ . Berikut gambar dari gelombang 3 fasa :

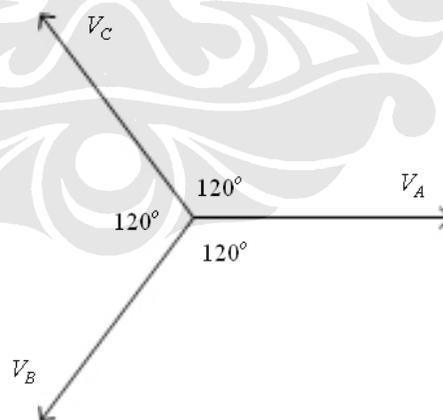


**Gambar 2.2** Gelombang tiga fasa

Dari gambar diatas terlihat bahwa setiap fasa memiliki perbedaan sudut dan didapatkan hubungan tegangan untuk masing-masing fasa sebagai berikut :

$$\begin{aligned} V_a &= V_m \angle 0^\circ \\ V_b &= V_m \angle -120^\circ \\ V_c &= V_m \angle -240^\circ \end{aligned} \quad (2.1)$$

Berikut diagram fasor dari tegangan 3 fasa :



**Gambar 2.3** Diagram fasor tegangan

Arus yang mengalir pada setiap beban dinyatakan sebagai :

$$I = \frac{V}{R} \quad (2.2)$$

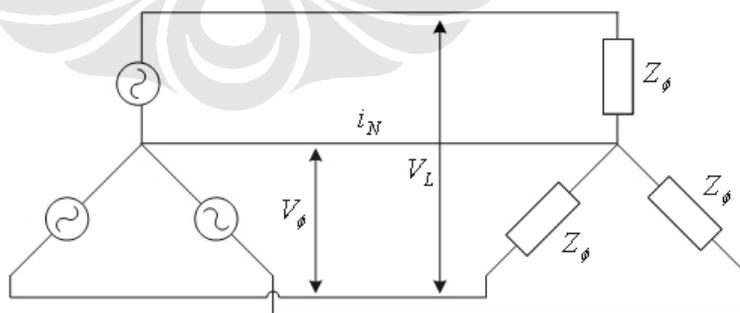
yang pada ketiga fasanya dapat dituliskan :

$$\begin{aligned}
 I_A &= \frac{V \angle 0^\circ}{Z \angle \theta} = I_m \angle -\theta \\
 I_B &= \frac{V \angle -120^\circ}{Z \angle \theta} = I_m \angle (-120^\circ - \theta) \\
 I_C &= \frac{V \angle -240^\circ}{Z \angle \theta} = I_m \angle (-240^\circ - \theta)
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

Pada rangkaian 3 fasa terdapat dua jenis hubungan yakni hubung bintang dan hubung delta. Rangkaian 3 fasa hubung delta menggunakan 3 kawat yakni kawat 3 fasa sedangkan pada rangkaian 3 fasa hubung bintang menggunakan 4 kawat, 3 kawat untuk fasa dan 1 kawat untuk netral. Arus netral pada rangkaian hubung bintang merupakan titik hubung antar ketiga fasanya. Arus netral ( $I_N$ ) merupakan penjumlahan arus ketiga fasanya karena jalur netral tersebut dilalui oleh ketiga fasa yang ada, menurut persamaan berikut :

$$\begin{aligned}
 I_N &= I_A + I_B + I_C \\
 &= 0
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

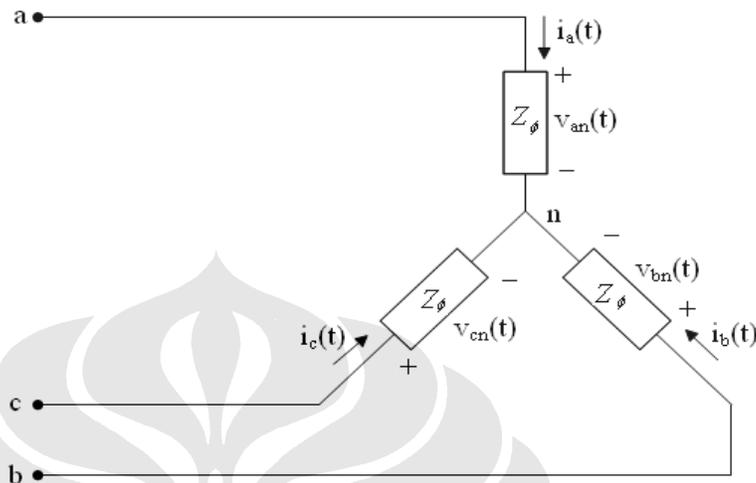
Persamaan (2.4) di atas menunjukkan jika beban yang diaplikasikan dalam suatu tegangan tiga fasa seimbang, maka arus netralnya sama dengan nol karena simetris dan saling meniadakan. Arus netral muncul akibat pembebanan yang tidak seimbang.



**Gambar 2.4** Rangkaian hubung bintang-bintang (Y-Y)

## 2.2 DAYA PADA RANGKAIAN LISTRIK 3 FASA

Suatu rangkaian listrik tiga fasa :



**Gambar 2.5** Beban hubung bintang seimbang

dengan impedansi fasa  $Z_\phi = Z \angle \theta^\circ$ . Bila dihubungkan dengan tegangan tiga fasa :

$$\begin{aligned} v_{an}(t) &= \sqrt{2}V \sin \omega t \\ v_{bn}(t) &= \sqrt{2}V \sin(\omega t - 120^\circ) \\ v_{cn}(t) &= \sqrt{2}V \sin(\omega t - 240^\circ) \end{aligned} \quad (2.5)$$

dan dengan  $I = \frac{V}{Z}$ , arus tiga fasanya menjadi :

$$\begin{aligned} i_a(t) &= \sqrt{2}I \sin(\omega t - \theta) \\ i_b(t) &= \sqrt{2}I \sin(\omega t - 120^\circ - \theta) \\ i_c(t) &= \sqrt{2}I \sin(\omega t - 240^\circ - \theta) \end{aligned} \quad (2.6)$$

Daya aktual setiap fasa beban dinyatakan dalam persamaan :

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (2.7)$$

Sehingga daya yang disuplai untuk tiap fasa :

$$\begin{aligned} p_a(t) &= 2VI \sin(\omega t) \sin(\omega t - \theta) \\ p_b(t) &= 2VI \sin(\omega t - 120^\circ) \sin(\omega t - 120^\circ - \theta) \\ p_c(t) &= 2VI \sin(\omega t - 240^\circ) \sin(\omega t - 240^\circ - \theta) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Dengan menggunakan persamaan identitas trigonometri :

$$\sin \alpha \sin \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)] \quad (2.9)$$

yang digunakan pada persamaan (1.8), didapat :

$$\begin{aligned} p_a(t) &= VI [\cos \theta - \cos(2\omega t - \theta)] \\ p_b(t) &= VI [\cos \theta - \cos(2\omega t - 240^\circ - \theta)] \\ p_c(t) &= VI [\cos \theta - \cos(2\omega t - 480^\circ - \theta)] \end{aligned} \quad (2.10)$$

Daya yang disalurkan pada rangkaian tiga fasa sama dengan jumlah daya pada ketiga fasanya. Dari persamaan (2.10), didapat daya masing-masing fasa terdiri dari komponen konstan dan komponen pulsa (yang berosilasi). Komponen pulsa masing-masing fasa berbeda  $120^\circ$ , sehingga penjumlahan daya ketiga fasa ini akan menghilangkan komponen pulsa dan didapat penjumlahan ketiga komponen konstan yang identik :

$$p_{total}(t) = p_a(t) + p_b(t) + p_c(t) = 3VI \cos \theta \quad (2.11)$$

Persamaan daya ini dapat ditulis [1] :

$$S = 3V_\phi I_\phi = 3I_\phi^2 Z \quad (2.12)$$

$$P = 3V_\phi I_\phi \cos \theta = 3I_\phi^2 Z \cos \theta \quad (2.13)$$

$$Q = 3V_\phi I_\phi \sin \theta = 3I_\phi^2 Z \sin \theta \quad (2.14)$$

Dalam hubungan :

$$\begin{aligned} S &= P + jQ \\ P &= S \cos \theta \\ Q &= S \sin \theta \end{aligned} \quad (2.15)$$

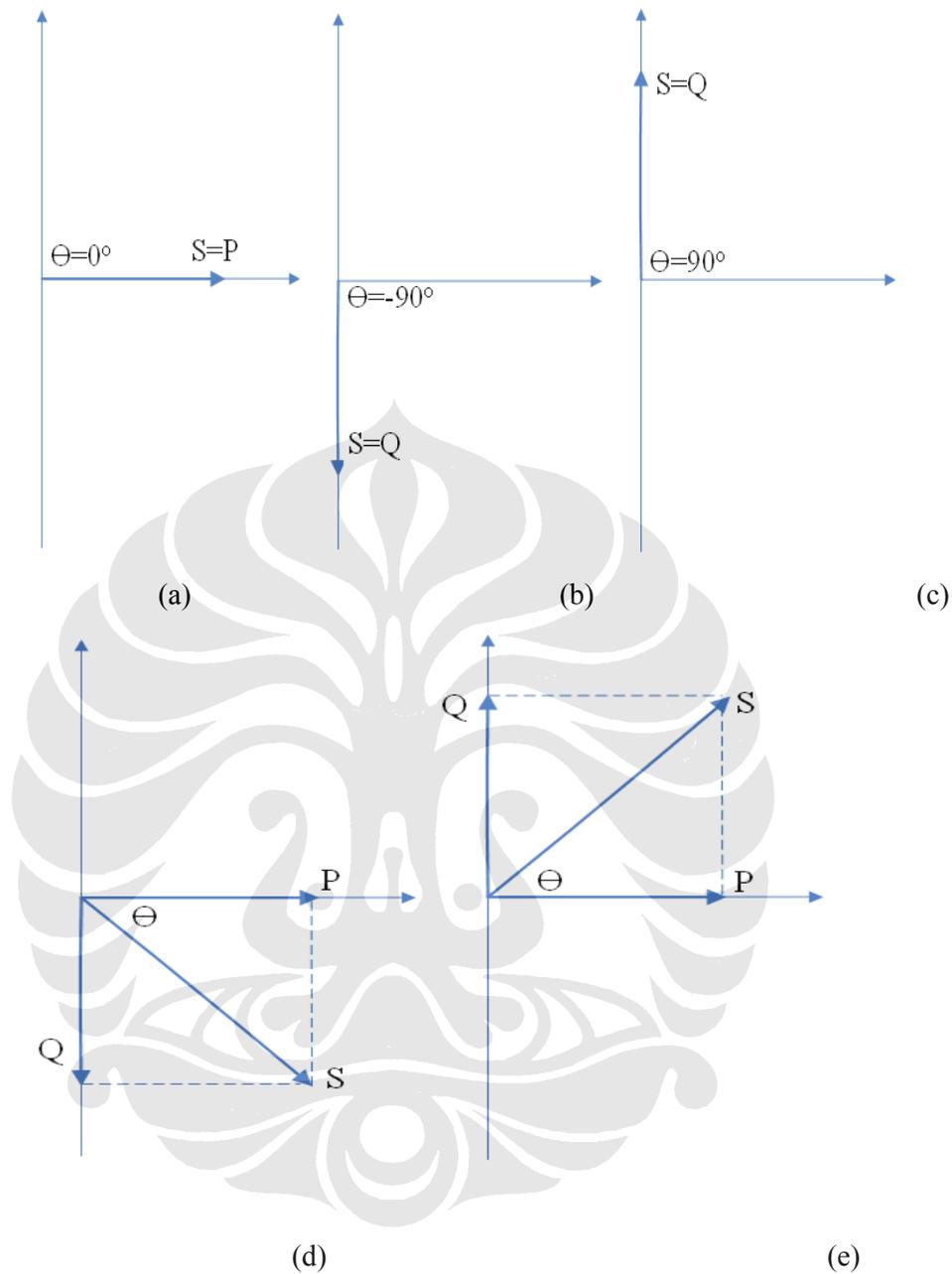
Dengan :

S = Daya total (satuan VA)

P = Daya nyata (satuan Watt)

Q = Daya reaktif (satuan VAR)

Berikut diagram fasor daya tergantung beban totalnya :



**Gambar 2.6** Diagram fasor dalam grafik  $V\sim I$  untuk

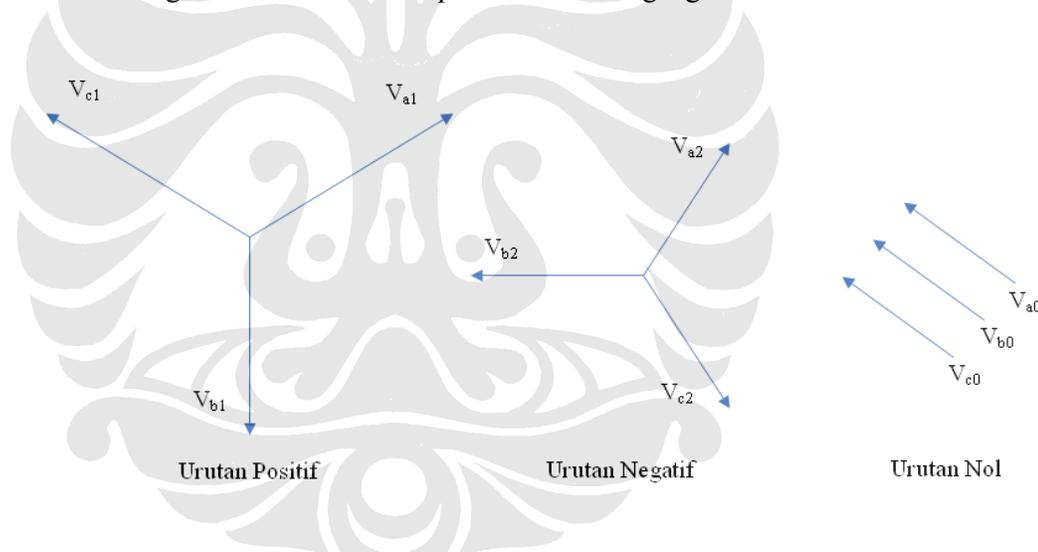
- Beban resistif murni
- Beban induktif murni
- Beban kapasitif murni
- Beban induktif resistif
- Beban kapasitif resistif

### 2.3 KOMPONEN SIMETRIS

Pada kenyataannya sistem 3 fasa yang ada diberikan beban tidak seimbang. Sistem tiga fasa yang tidak seimbang ini dapat diuraikan menjadi tiga buah komponen simetris untuk memudahkan analisis, yaitu :

1. Komponen urutan positif (*positive sequence*), yang fasornya sama besar dan mempunyai beda fasa  $120^\circ$ , serta urutan fasanya sama dengan urutan fasa aslinya.
2. Komponen urutan negative (*negative sequence*), yang sama seperti urutan positif, hanya urutan fasanya berlawanan dengan urutan fasa aslinya.
3. Komponen urutan nol (*zero sequence*) yang fasornya sama besar dan dengan pergeseran fasa nol antara fasor yang satu dengan yang lain.

Berikut gambar fasor dari komponen simetris tegangan.

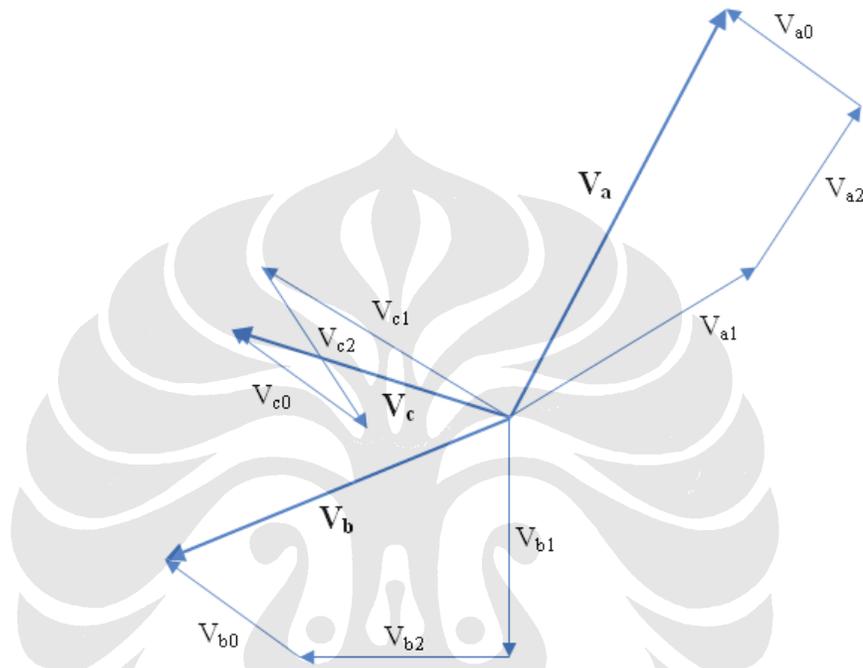


**Gambar 2.7** Komponen simetris tegangan dari sistem 3 fasa yang tidak seimbang

Notasi yang digunakan untuk komponen urutan tersebut biasanya diberikan subskrip 1, 2 dan 0 pada komponen arus dan tegangannya. Jadi, komponen urutan positif dari tegangan  $V_a$ ,  $V_b$  dan  $V_c$  adalah  $V_{a1}$ ,  $V_{b1}$  dan  $V_{c1}$ ; komponen urutan negatifnya  $V_{a2}$ ,  $V_{b2}$  dan  $V_{c2}$ ; serta komponen urutan nolnya  $V_{a0}$ ,  $V_{b0}$  dan  $V_{c0}$ .

Persamaan tegangan sistemnya merupakan penjumlahan dari masing-masing komponen simetrisnya, yaitu :

$$\begin{aligned}
 V_a &= V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \\
 V_b &= V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \\
 V_c &= V_{c1} + V_{c2} + V_{c0}
 \end{aligned}
 \tag{2.16}$$



**Gambar 2.8** Tegangan sistem sebagai penjumlahan dari komponen simetris

Dari gambar 2.8 di atas, didapatkan hubungan antara komponen-komponen simetrisnya, yaitu :

$$\begin{aligned}
 V_{b1} &= a^2 V_{a1} & V_{c1} &= a V_{a1} \\
 V_{b2} &= a V_{a2} & V_{c2} &= a^2 V_{a2} \\
 V_{b0} &= V_{a0} & V_{c0} &= V_{a0}
 \end{aligned}
 \tag{2.17}$$

dengan :

$$\begin{aligned}
 a &= 1 \angle 120^\circ = -0,5 + j0,866 \\
 a^2 &= 1 \angle 240^\circ = -0,5 - j0,866
 \end{aligned}$$

Berdasarkan persamaan (2.17), maka persamaan (2.16) menjadi :

$$\begin{aligned}
 V_a &= V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \\
 V_b &= a^2 V_{a1} + a V_{a2} + V_{a0} \\
 V_c &= a V_{a1} + a^2 V_{a2} + V_{a0}
 \end{aligned}
 \tag{2.18}$$

yang dapat dinyatakan dalam bentuk matriks :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix}
 \tag{2.19}$$

Dengan mengalikan matriks tersebut dengan matriks *invers*-nya ( $A^{-1}$ ) diperoleh :

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}
 \tag{2.20}$$

Sehingga, hubungan antara komponen-komponen simetrisnya dan tegangan sistemnya dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 V_{a0} &= \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \\
 V_{a1} &= \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) \\
 V_{a2} &= \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c)
 \end{aligned}
 \tag{2.21}$$

Komponen urutan nol tidak terdapat dalam sistem tenaga listrik apabila sistem seimbang. Pada sistem tiga fasa yang tidak seimbang, pada kabel netralnya dapat mengandung komponen urutan nol. Persamaan-persamaan tegangan tersebut berlaku juga pada persamaan untuk arusnya yang dinyatakan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 I_a &= I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \\
 I_b &= a^2 I_{a1} + a I_{a2} + I_{a0} \\
 I_c &= a I_{a1} + a^2 I_{a2} + I_{a0} \\
 I_{a0} &= \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \\
 I_{a1} &= \frac{1}{3}(I_a + a I_b + a^2 I_c) \\
 I_{a2} &= \frac{1}{3}(I_a + a^2 I_b + a I_c)
 \end{aligned}
 \tag{2.22}$$

Arus netral yang mengalir adalah jumlah arus yang mengalir pada tiap fasanya. Jadi, berdasarkan persamaan (2.22), maka persamaan arus netralnya dapat dituliskan menjadi :

$$I_n = I_a + I_b + I_c = 3I_{a0} \tag{2.23}$$

## 2.4 PENGUKURAN BESARAN LISTRIK

Dalam suatu rangkaian listrik, terdapat berbagai komponen listrik dengan besar dan satuannya masing-masing. Untuk mendapatkan besar nilai-nilai tersebut, diperlukan pengukuran besaran listrik.

Pengukuran yang dilakukan pada pengujian ini adalah pengukuran arus dan tegangan efektif bolak-balik, pengukuran daya dan faktor daya serta pengukuran energi.

### 2.4.1 Pengukuran arus dan tegangan efektif bolak-balik

Sumber tegangan yang tersedia untuk konsumen listrik, rumah tangga dan industri, adalah tegangan *sinusoidal* yang memiliki frekuensi 50 Hz dan tegangan 220 V. ini berarti tegangan maksimumnya adalah  $220 \sqrt{2}$  V atau sekitar 311,1 V sedangkan tegangan efektifnya adalah 220 V. Harga ini adalah ukuran keefektifan sumber tegangan bolak-balik dalam memberikan daya pada sebuah beban penahan.

Nilai efektif dari setiap arus bolak-balik sama dengan nilai dari arus searah yang mengalir melalui tahanan R yang sama. Daya yang diberikan oleh arus searah terhadap tahanan R adalah sama dengan daya yang diberikan oleh arus bolak-balik. Arus bolak-balik yang diberikan terhadap

tahanan R memiliki daya sesaat sebesar  $i^2R$ . Kemudian suatu arus searah mengalir melalui tahanan R yang sama dan menjaga agar arus searah dan memperoleh harga daya yang sama dengan rata-rata arus bolak-balik. Besar arus searah tersebut adalah arus efektif dari arus bolak-balik.

Faktor  $\sqrt{2}$  merupakan faktor perbandingan harga maksimum dari arus periodik dengan nilai efektifnya dan hanya dipakai jika fungsi periodik tersebut berupa sinusoidal.

#### 2.4.2 Pengukuran daya dan faktor daya

Untuk sumber arus bolak-balik daya yang berubah terhadap waktu atau daya sesaat merupakan perkalian antara tegangan dan arus.

$$S(t) = V(t) \cdot I(t)$$

Untuk tahanan murni R, daya yang dipakai adalah positif sehingga daya yang dikembalikan ke sumber adalah 0. Untuk insuktansi, ketika mendapat energi bolak-balik, untuk setengah periode akan menyimpan energi elektromagnetis, dan mengembalikan energi tersebut pada sumbernya pada setengah periode berikutnya. Sehingga daya rata-ratanya adalah 0.

Faktor daya adalah perbandingan antara daya aktif terhadap daya kompleks. Dapat dinyatakan dengan :

$$\text{Cos } \varphi = \frac{P}{S}$$

Untuk pembebanan resistif murni, faktor dayanya adalah 1, untuk induktif murni dan kapasitif murni faktor dayanya adalah 0. Beban kapasitif memiliki faktor daya *leading*, dan beban induktif memiliki faktor daya *lagging*.

#### 2.4.3 Pengukuran energi

Energi dalam hal ini adalah energi listrik yang merupakan perkalian dari daya yang digunakan dengan waktu atau pemakaian daya selama waktu tertentu.

$$E = P \cdot t$$

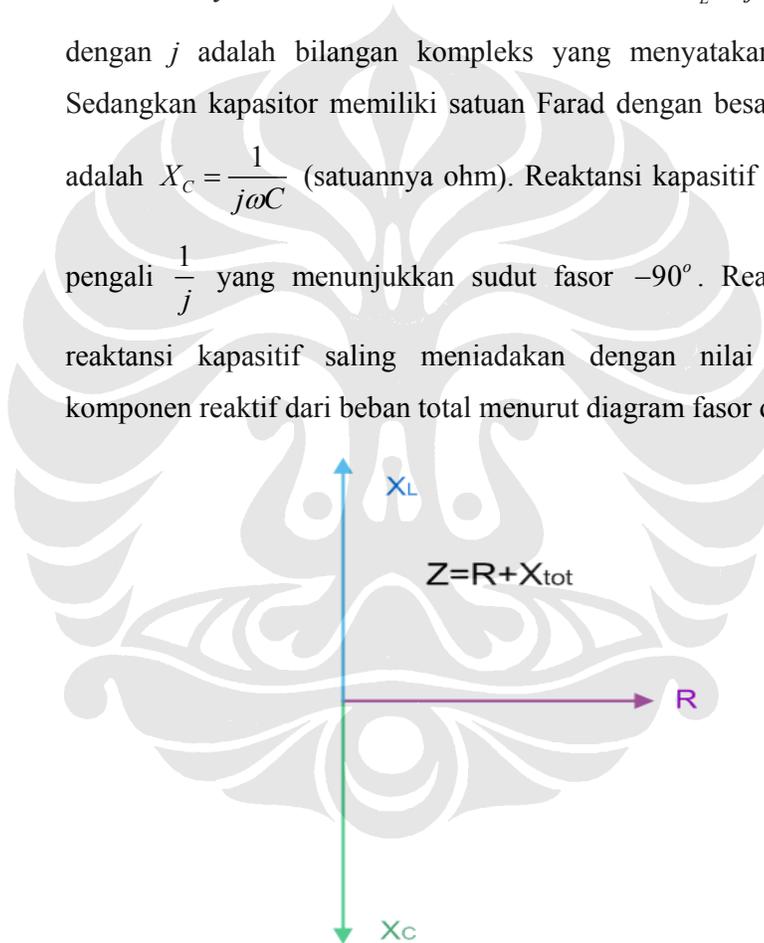
$$E = V \cdot I \cdot \text{Cos } \varphi t \text{ (untuk 1 fasa)}$$

Alat ukur yang digunakan adalah KWhmeter yang umum digunakan untuk pengukuran pemakaian energi listrik komersil oleh perusahaan listrik. Jumlah pemakaian energi listrik oleh konsumen dicatat oleh perusahaan listrik menggunakan KWhmeter untuk kemudian ditagihkan kepada para konsumen listrik tersebut.

Pengujian membutuhkan nilai-nilai dari besaran arus, tegangan, daya, faktor daya dan energi listrik. Maka, alat yang digunakan adalah Amperemeter, Voltmeter, Wattmeter, pf-meter dan kWh-meter.

1. Amperemeter, merupakan alat ukur arus listrik. Amperemeter menjadi dua, yaitu Amperemeter arus searah (DC) dan Amperemeter arus bolak-balik (AC). Amperemeter ini harus dipasang seri sebelum rangkaian listrik dihidupkan. Pemindahan alat ukur ini akan memutuskan rangkaian. Masalah ini dapat diatasi dengan Amperemeter yang menggunakan trafo arus (*current transformer*).
2. Voltmeter, merupakan alat ukur tegangan listrik antar dua buah titik. Voltmeter dirangkai secara paralel dengan menghubungkan kedua terminal Voltmeter dengan dua buah titik yang akan diukur tegangannya. Karena dihubung paralel, Voltmeter dapat digunakan bergantian tanpa memutus rangkaian saat pemindahan alat ukur.
3. Wattmeter, merupakan alat ukur daya. Rumus perhitungan daya adalah  $P = VI$ , yaitu merupakan perkalian nilai tegangan yang ada dengan arus yang mengalir pada konduktor tersebut. Dengan demikian, maka Wattmeter terdiri dari komponen pengukur arus (Amperemeter) yang dirangkai seri dan komponen pengukur tegangan (Voltmeter) yang dirangkai paralel, sehingga Wattmeter dirangkai secara seri-paralel dengan rangkaian seri pada jalur yang diukur arusnya dan kutub alat ukur lain dihubungkan dengan kutub tegangan yang lain yang akan diukur tegangannya dengan jalur yang pertama.
4. Pf-meter, merupakan alat ukur faktor daya ( $\text{pf} / \cos \varphi$ ). Alat ukur ini membandingkan nilai daya nyata dengan nilai daya kompleks. Seperti Wattmeter, alat ukur ini juga dirangkai secara seri-paralel.

Sesuai persamaan (2.15), daya kompleks terdiri dari komponen daya nyata dan daya reaktif. Daya nyata dan daya reaktif dihasilkan dari beban nyata dan beban reaktif. Beban nyata atau beban linier adalah hambatan/ tahanan/ resistor, yang besar nilai bebannya dinyatakan dalam satuan  $\Omega$  (ohm) yang memiliki sudut fasor  $0^\circ$ . Jenis beban lain selain beban nyata adalah beban reaktif. Beban reaktif memiliki diagram fasor tegak lurus dengan fasor beban nyata. Beban reaktif dibagi dua yaitu induktor dan kapasitor. Satuan induktor adalah Henry dan besar reaktansi induktif adalah  $X_L = j\omega L$  (satunya ohm) dengan  $j$  adalah bilangan kompleks yang menyatakan sudut fasor  $90^\circ$ . Sedangkan kapasitor memiliki satuan Farad dengan besar reaktansi kapasitif adalah  $X_C = \frac{1}{j\omega C}$  (satunya ohm). Reaktansi kapasitif memiliki komponen pengali  $\frac{1}{j}$  yang menunjukkan sudut fasor  $-90^\circ$ . Reaktansi induktif dan reaktansi kapasitif saling meniadakan dengan nilai selisih merupakan komponen reaktif dari beban total menurut diagram fasor di bawah ini :



**Gambar 2.9** Diagram fasor untuk beban R, L dan C

Apabila suatu tegangan dicatu kepada ketiga komponen beban ini, maka akan dihasilkan arus yang mempunyai karakteristik berlainan, yaitu :

- Arus pada beban hambatan (*resistance*) murni

$$I_R = \frac{V \angle 0^\circ}{R} \text{ dimana sudut antara arus dengan tegangan adalah sefasa.}$$

b. Arus pada beban induktif murni

$$I_L = \frac{V \angle 0^\circ}{X_L} = \frac{V \angle 0^\circ}{j\omega L} = \frac{V \angle 0^\circ}{\omega L \angle 90^\circ} = \frac{V}{\omega L} \angle -90^\circ$$

dimana terlihat sudut arus tertinggal (lagging)  $90^\circ$  terhadap tegangan.

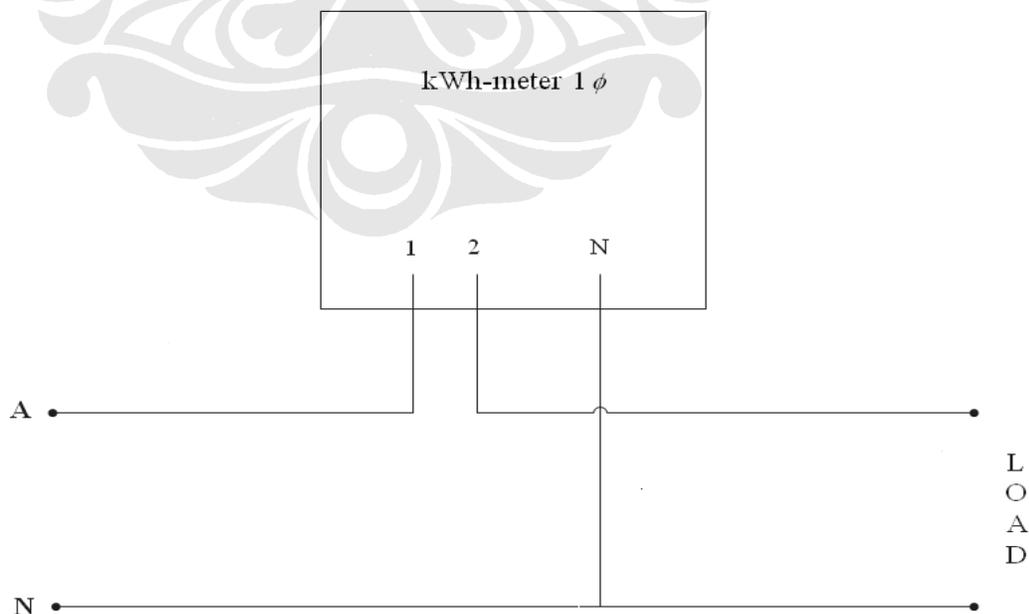
c. Arus pada beban kapasitif murni

$$I_C = \frac{V \angle 0^\circ}{X_C} = \frac{V \angle 0^\circ}{1/j\omega C} = V \angle 0^\circ \cdot j\omega C = V \angle 0^\circ \cdot \omega C \angle 90^\circ = V \omega C \angle 90^\circ$$

dimana terlihat sudut arus mendahului (leading)  $90^\circ$  terhadap tegangan.

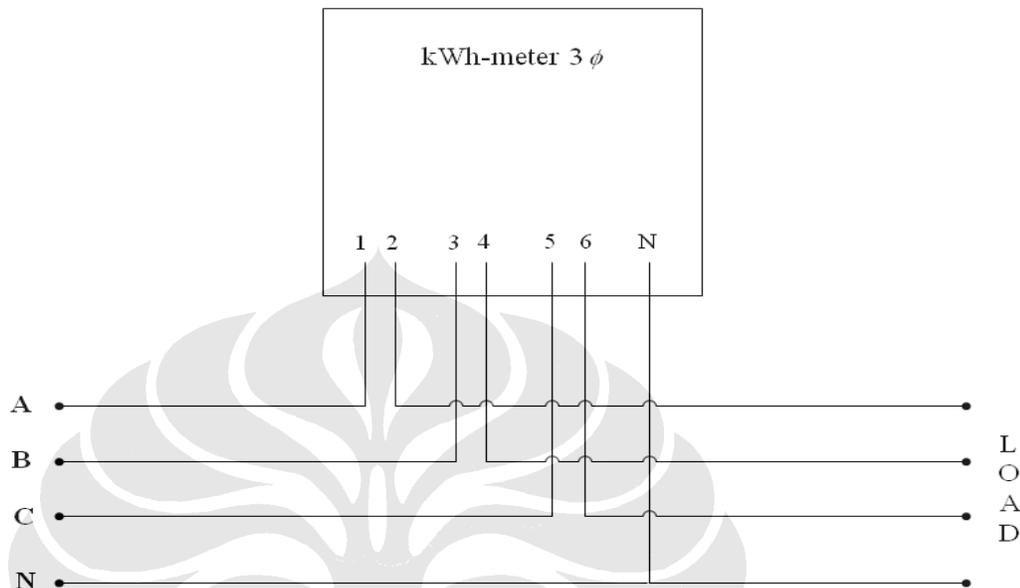
Berbagai kemungkinan diagram fasor untuk beban yang bervariasi dapat dilihat pada gambar 2.6 serta terlihat bahwa nilai daya nyata ( $P$ ) tidak pernah negatif.

5. kWh-meter, merupakan alat ukur energi listrik dalam satuan kWh (*kilowatt-hour*). Alat ini memiliki komponen pengukuran daya seperti Wattmeter, sehingga juga memiliki komponen pengukur arus (dihubung seri) dan komponen pengukur tegangan (dihubung paralel), yang terlihat pada rangkaian di bawah :



Gambar 2.10 Rangkaian kWh-meter satu fasa

Dan rangkaian untuk kWh-meter tiga fasa :



**Gambar 2.11** Rangkaian kWh-meter tiga fasa

Komponen waktu pada pengukuran energi ini dinyatakan oleh durasi penggunaan kWh-meter. kWh-meter bekerja memanfaatkan arus yang mengalir untuk menggerakkan lempengan logam *ferromagnetic* bundar sehingga berputar. Perputaran lempengan ini diteruskan dengan hubungan roda gigi ke *counter*. *Counter* merupakan tampilan angka yang dikalibrasi sedemikian rupa sehingga penggunaan daya listrik sebesar 1(satu) kilowatt selama satu jam akan tepat memutar *counter* sebesar 1(satu) kWh atau 10(sepuluh) skala perpuluhan kWh.

Pada gambar 2.9, terlihat *counter* berupa tampilan angka pada bagian atas. Untuk mengetahui penggunaan energi listrik yang terpakai, dilakukan dengan menghitung selisih angka yang tertera sebelum dan sesudah pemakaian.

kWh-meter satu fasa digunakan untuk mencatat pemakaian listrik pada konsumen perumahan dengan tegangan 220 Volt, sedangkan kWh-meter tiga fasa digunakan pada konsumen industri yang menggunakan jaringan listrik tiga fasa. kWh-meter tiga fasa mencatat seluruh penggunaan energi listrik pada jaringan tiga fasa yang diukur. Berdasarkan persamaan (2.11), kWh-meter tiga fasa

mencatat jumlah penggunaan pada ketiga fasanya. Pada konstruksinya, lempengan bundar pada kWh-meter tiga fasa dihubungkan ketiga fasa yang ada. Penggunaan hanya salah satu atau dua buah fasa tetap memutar lempengan bundar pada alat ini, sehingga penggunaannya tetap tercatat.



## BAB 3

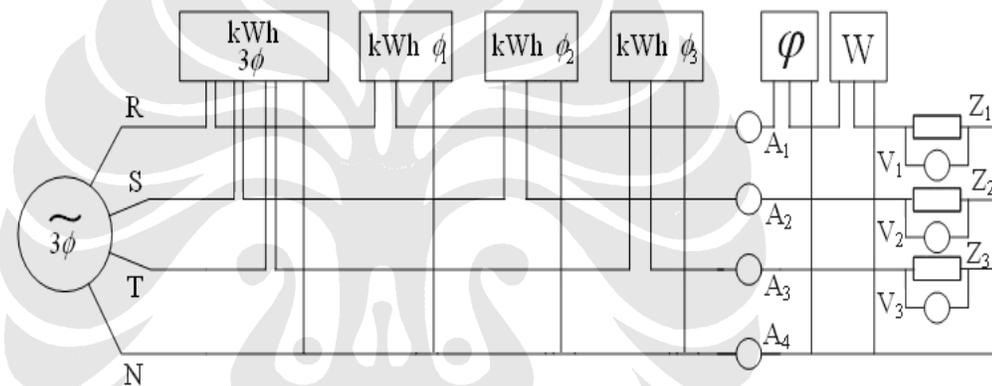
### PENGUJIAN DAN HASIL PENGUKURAN

#### 3.1 Rangkaian dan Peralatan Pengujian

Pengujian dilakukan di Laboratorium Tegangan Tinggi dan Pengukuran Listrik (TTPL) Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Secara umum, pengujian terbagi atas 2 macam pengujian, yakni pengujian dengan menggunakan KWh-meter analog dan pengujian dengan KWh-meter digital.

##### 3.1.1. Rangkaian pengujian

Berikut rangkaian pengujian sebagai berikut :



**Gambar 3.1** Rangkaian pengujian

Catu daya yang digunakan adalah jaringan listrik AC tiga fasa 4 kawat dari PLN yang dirangkai hubung bintang. Tegangan fasa yang digunakan adalah 220 V, namun pada pengujian tegangan tidak murni sebesar 220 V. Rangkaian suplai tiga fasa ini dihubungkan dengan KWh-meter tiga fasa sebagai masukan yang akan diukur pemakaian energinya secara keseluruhan. Keluaran dari KWh-meter tiga fasa ini menjadi masukan untuk tiga buah KWh-meter satu fasa yang digunakan untuk mengukur pemakaian energi pada masing-masing fasa. Seluruh kutub netral KWh-meter dihubungkan kawat netral jaringan PLN.

##### 3.1.2. Peralatan Pengujian

Pengujian ini menggunakan peralatan sebagai berikut :

- a. 3 buah KWh-meter 1 fasa
- b. 1 buah KWh-meter 3 fasa analog

- c. 1 buah KWh-meter 3 fasa digital
- d. Wattmeter
- e. Cos  $\phi$  meter
- f. Volt meter
- g. Ampere meter
- h. Beban variabel yang terdiri dari :
  - 1. Resistor variabel
  - 2. Induktansi variabel
  - 3. Kapasitansi variabel

KWh-meter yang digunakan adalah :

- 1. KWh-meter 1 fasa yang digunakan adalah buatan Indonesia merk Schlumberger tahun 2002 jenis M2XS4V3 kelas 2, merk Actaris oleh PT. Mecoindo tahun 2002 jenis M2XS4V3 kelas 2.

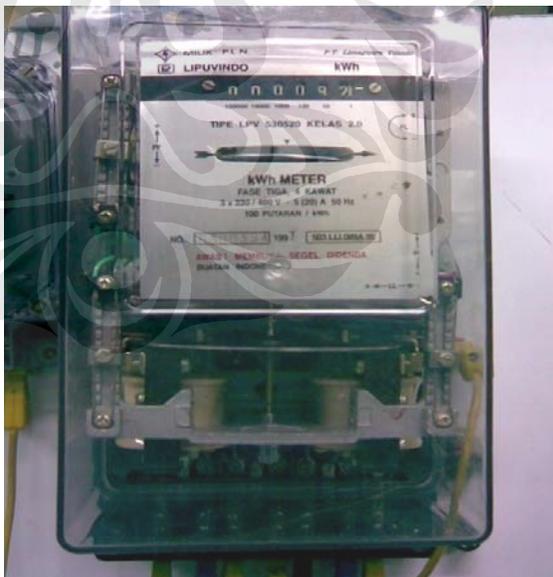


**Gambar 3.2** KWh-meter satu fasa Schlumberger



**Gambar 3.3** KWh-meter satu fasa Actaris

2. KWh-meter tiga fasa analog yang digunakan buatan Indonesia oleh PT. Limaputra Vilindo tahun 1997 tipe LPV 530520 kelas 2.0 untuk tegangan AC tiga fasa, 4 kawat.



**Gambar 3.4** KWh-meter tiga fasa PT. Limaputra Vilindo

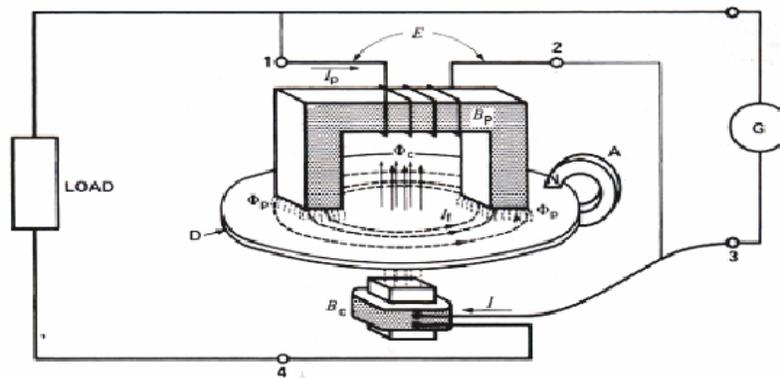
3. KWh-meter tiga fasa digital yang digunakan adalah buatan Indonesia oleh PT. Indo Electric Instrument tipe DTSD63 kelas 1.0 untuk tegangan AC 3 fasa 4 kawat.



**Gambar 3.5** KWh-meter tiga fasa PT. Indo Electric instrument

### 3.1.2.1. KWH Meter Analog

Penggunaan daya di Indonesia menggunakan satuan *kilowatt hour*, dimana KWH adalah sama dengan 3.6 MJ. Bagian utama dari sebuah KWH meter adalah kumparan tegangan, kumparan arus, piringan aluminium, magnet tetap dan gear mekanik yang mencatat jumlah perputaran piringan aluminium. Apabila meter dihubungkan ke daya satu fasa maka piringan mendapat torsi yang dapat membuatnya berputar seperti motor dengan tingkat kepresisian yang tinggi. Berikut diberikan gambar konstruksi KWh meter analog tipe induksi.



**Gambar 3.6** Konstruksi KWh meter analog tipe induksi

Dari gambar tersebut di atas dapat dijelaskan bahwa arus beban  $I$  menghasilkan fluks bolak-balik  $\Phi_c$ , yang melewati piringan aluminium dan menginduksinya, sehingga menimbulkan tegangan. Kumputan tegangan  $B_p$  juga menghasilkan fluks bolak-balik  $\Phi_p$  yang memintas arus  $I_f$ . Karena itu piringan mendapat gaya, dan resultan dari torsi membuat piringan berputar. Torsi ini sebanding dengan fluks  $\Phi_p$  dan arus  $I_f$  serta harga cosinus dari sudut antaranya. Karena  $\Phi_p$  dan  $I_f$  sebanding dengan tegangan  $E$  dan arus beban  $I$ , maka torsi motor sebanding dengan  $EI \cos \theta$ , yaitu daya aktif yang diberikan ke beban. Karena itu kecepatan putaran piringan sebanding dengan daya aktif yang terpakai. Semakin besar daya yang terpakai, kecepatan piringan semakin besar, demikian pula sebaliknya. Secara umum perhitungan untuk daya listrik dapat di bedakan menjadi tiga macam, yaitu

$$\text{Daya kompleks} : S(\text{VA}) = V.I$$

$$\text{Daya reaktif} : Q(\text{VAR}) = V.I \sin \phi$$

$$\text{Daya aktif} : P(\text{Watt}) = V.I \cos \phi$$

Hubungan dari ketiga daya diatas dapat dituliskan dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$S = \sqrt{(VI)^2 \cdot (\sin^2 \phi + \cos^2 \phi)}$$

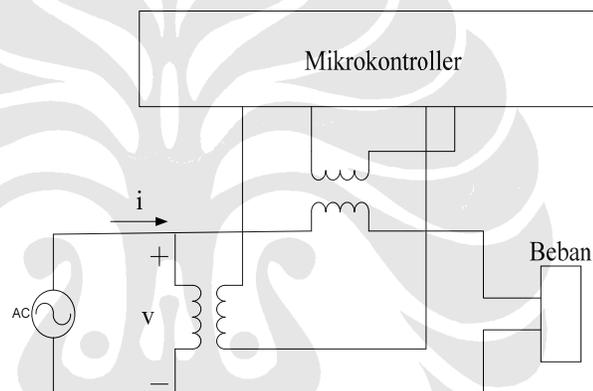
$$S = V.I$$

Dari ketiga daya diatas, yang terukur pada KWH meter adalah daya aktif, yang dinyatakan dengan satuan *Watt*. Sedangkan daya reaktif dapat diketahui besarnya

dengan menggunakan alat ukur *Varmeter*. Untuk pemakaian pada rumah, biasanya hanya digunakan KWH meter.

### 3.1.2.2. KWH Meter Digital

KWh-meter digital merupakan suatu alat pengukuran yang memiliki fungsi utama sama seperti kWh-meter analog yakni mengukur jumlah pemakaian energi atau jumlah pemakaian daya dalam satuan waktu. Jika pada kWh-meter analog bekerja berdasarkan induksi, kWh-meter digital bekerja berdasarkan program yang dirancang pada mikroprosesor yang terdapat di dalam piranti kWh-meter digital tersebut. Berikut gambar prinsip kerja dari kWh-meter digital :



**Gambar 3.7** Prinsip dasar KWh-meter digital

Tegangan dan arus yang diterima oleh kWh-meter digital ini akan dibaca terpisah. Tegangan yang masuk akan dibaca dan kemudian akan diteruskan ke dalam suatu mikrokontroler. Arus yang dibaca juga akan diteruskan ke dalam mikrokontroler. Di dalam mikrokontroler sudah di atur suatu program untuk mengolah tegangan dan arus yang masuk menjadi suatu besaran. Besaran yang dimaksud adalah daya aktif dan energi. Sehingga dengan kWh-meter digital ini dapat dibaca jumlah pemakaian energi yang terpakai.

Kelebihan kWh-meter digital ini dibandingkan kWh-meter analog adalah kemampuan untuk membaca daya reaktif dan jumlah pemakaian daya reaktif per satuan waktu (energi reaktif). Di dalam mikrokontroler ini juga terdapat program untuk mengukur besaran tegangan (voltmeter), arus (amperemeter), dan faktor daya ( $\cos \phi$  meter). Sehingga untuk pengukuran menggunakan kWh-meter digital,

**Universitas Indonesia**

tidak perlu menggunakan piranti tambahan untuk mengukur besaran-besaran tersebut.

### 3.2. Pengujian

Pada pengujian ini terdapat beberapa tahap pengujian. Tahap – tahap pengujiannya adalah sebagai berikut :

1. Pemasangan beban
2. Pengukuran energi pada setiap kombinasi beban dalam waktu tertentu dengan menggunakan kWh-meter analog dan kWh-meter digital
3. Pengukuran dan pencatatan data yang dilakukan yaitu :
  - a. Arus beban
  - b. Daya yang terbaca pada masing – masing alat ukur
  - c. Kecepatan putaran piringan oleh kWh meter
  - d. Faktor daya
4. Analisa dari penelitian

Pada pengujian pertama, digunakan rangkaian seperti pada gambar 3.1 dengan menggunakan kWh-meter 3 fasa analog. Pada pengujian ini diberikan variasi pembebanan yakni beban resistif murni, induktif, kapasitif, dan campuran ( resistif + induktif + kapasitif). Pada pengujian kedua, digunakan kWh-meter digital dengan rangkaian yang sama seperti pada percobaan pertama. Pembebanannya pun sama seperti pada percobaan pertama.

Pembebanan yang diberikan maksimal sebesar 1 kilo Watt atau 1045 Watt, untuk beban resistif, dan 1045 VAR untuk beban reaktifnya.

Arus untuk tiap fasa dan arus netral diukur dengan menggunakan empat buah amperemeter AC. Pada gambar 3.1, fasa 1 dihubungkan dengan  $\cos \phi$ -meter dan wattmeter sebagai referensi daya yang terukur dengan faktor daya tertentu. Pada fasa 2 dan fasa 3, juga dilakukan pengukuran daya dan faktor daya dengan menggunakan  $\cos \phi$ -meter dan wattmeter bergantian dengan fasa 1. Sedangkan pengukuran tegangan pada tiap fasa, dilakukan juga secara bergiliran untuk ketiga fasanya tanpa memutus hubungan rangkaian yang sedang diuji.

Pengujian dilakukan dari pagi hari lebih kurang pk 08.00 sampai malam hari pk 20.00. Durasi pengujian tiap data adalah 30 menit untuk masing-masing beban resistif, beban induktif dan kapasitif.

### 3.3. Hasil pengujian

Data yang diambil merupakan data atas perbedaan nilai beban yang diberikan, yaitu beban linier (resistif murni) dan beban non linier (induktif dan kapasitif), serta beban campuran (resistif dan induktif dan kapasitif). Data tersebut merupakan besarnya daya, tegangan, arus, dan faktor daya pada masing-masing fasa dan penjumlahannya.

Pada setiap jenis beban, dilakukan variasi nilai ketidakseimbangan beban mulai dari 0%, 2%, 5%, 10%, 20%, 50% hingga salah satu fasa dihilangkan, kemudian juga dua buah fasa dihilangkan. Nilai ketidakseimbangan 0% merupakan pembebanan seimbang dengan nilai daya masing-masing fasa 1.045 Watt (beban resistif) dan 1.045 VAR (beban reaktif). Kemudian nilai variasi beban yang terendah dilepaskan pada salah satu fasa yang dinaikkan dengan nilai beban yang lebih besar, juga pada fasa yang lain sehingga dicapai ketidakseimbangan pada dua fasa sampai salah satu dan dua buah fasa dilepaskan seluruh bebannya.

Berikut data hasil pengujian :

Tabel 3.1. Data Pengujian untuk Bahan Resistif dengan kWh-meter digital

No.	Load <sub>1</sub> (W)	Load <sub>2</sub> (W)	Load <sub>3</sub> (W)	V <sub>1</sub> (V)	V <sub>2</sub> (V)	V <sub>3</sub> (V)	I <sub>n</sub> (A)	I <sub>1</sub> (A)	I <sub>2</sub> (A)	I <sub>3</sub> (A)	P <sub>1</sub> (kW)	P <sub>2</sub> (kW)	P <sub>3</sub> (kW)	cos			W <sub>1</sub> (kWh)	W <sub>2</sub> (kWh)	W <sub>3</sub> (kWh)	W 1 fase (kWh)	W 3 fase (kWh)
														1	2	3					
1	1045	1045	1045	216	217	218	0.09	4.61	4.62	4.64	1	1	1.01	1	1	1	0.4675	0.464	0.4685	1.4	1.52
2	1045	990	1045	219	219	219	0.22	4.64	4.4	4.66	1.01	0.96	1.03	1	1	1	0.473	0.439	0.478	1.39	1.48
3	1045	990	990	219	219	220	0.3	4.65	4.41	4.42	1.01	0.96	0.97	1	1	1	0.464	0.448	0.453	1.365	1.46
4	1045	935	990	219	219	219	0.45	4.65	4.16	4.41	1.02	0.91	0.97	1	1	1	0.462	0.412	0.444	1.318	1.45
5	1045	935	935	220	220	221	0.54	4.67	4.17	4.18	1.02	0.91	0.92	1	1	1	0.469	0.4125	0.4165	1.298	1.35
6	1045	825	935	219	219	221	0.83	4.65	3.69	4.17	1.02	0.81	0.92	1	1	1	0.458	0.365	0.408	1.231	1.31
7	1045	605	825	219	219	219	1.4	4.66	3.19	3.69	1.02	0.7	0.81	1	1	1	0.4745	0.2795	0.3835	1.1375	1.28
8	1045	220	550	220	219	219	3.08	4.67	0.98	2.94	1.03	0.21	0.64	1	1	1	0.462	0.099	0.25	0.811	0.93
9	1045	0	550	220	221	221	3.54	4.67	0	2.99	1	0	0.65	1	0	1	0.458	0	0.241	0.609	0.8
10	1045	0	0	218	218	221	4.61	4.61	0	0	1	0	0	1	0	0	0.4515	0	0	0.4515	0.51

Tabel 3.2. Data Pengujian untuk Beban Resistif dengan kWh-meter analog

No.	Load <sub>1</sub> (W)	Load <sub>2</sub> (W)	Load <sub>3</sub> (W)	V <sub>1</sub> (V)	V <sub>2</sub> (V)	V <sub>3</sub> (V)	I <sub>N</sub> (A)	I <sub>1</sub> (A)	I <sub>2</sub> (A)	I <sub>3</sub> (A)	P <sub>1</sub> (W)	P <sub>2</sub> (W)	P <sub>3</sub> (W)	cos			W <sub>1</sub> (kWh)	W <sub>2</sub> (kWh)	W <sub>3</sub> (kWh)	W 1 fase (kWh)	W 3 fase (kWh)
														1	2	3					
1	1045	1045	1045	210	208	211	0,17	4,49	4,49	4,49	930	925	930	1	1	1	0,473	0,469	0,48	1,422	1,36
2	1045	990	1045	209	208	210	0,31	4,47	4,21	4,48	930	880	930	1	1	1	0,465	0,446	0,472	1,383	1,35
3	1045	990	990	210	209	211	0,26	4,48	4,28	4,28	933	880	880	1	1	1	0,473	0,439	0,478	1,39	1,27
4	1045	935	990	210	209	210	0,51	4,46	3,96	4,22	928	842	880	1	1	1	0,464	0,448	0,453	1,365	1,32
5	1045	935	935	211	208	210	0,63	4,50	3,95	3,98	942	842	842	1	1	1	0,462	0,412	0,444	1,318	1,29
6	1045	825	935	210	209	209	0,93	4,46	3,52	3,94	917	747	842	1	1	1	0,46	0,416	0,415	1,291	1,25
7	1045	605	825	210	209	208	1,71	4,48	2,58	3,51	938	555	747	1	1	1	0,458	0,365	0,408	1,231	1,21
8	1045	220	550	208	209	208	3,06	4,41	0,79	2,32	915	198	496	1	1	1	0,464	0,271	0,371	1,106	1,11
9	1045	-	550	208	209	208	3,70	4,41	0	2,32	910	0	495	1	1	1	0,452	0,1	0,243	0,795	0,81
10	1045	-	-	209	211	209	4,42	4,42	0	0	910	0	0	1	1	1	0,456	0	0,244	0,464	0,44

Tabel 3.3. Data Pengujian untuk Beban Induktif dengan kWh-meter digital

No.	Load <sub>1</sub>	Load <sub>2</sub>	Load <sub>3</sub>	V	V	V	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>	I <sub>n</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	cos			W	W
	(VAR)	(VAR)	(VAR)	(V)	(V)	(V)	(A)	(A)	(A)	(A)	(VAR)	(VAR)	(VAR)	(KW)	(KW)	(KW)	1	2	3	(KVAR)	(kWh)
1	1045	1045	1045	211	212	209	4,74	4,7	4,69	0,14	0,98	0,98	0,97	0,98	0,98	0,97	0,06	0,06	0,06	1,51	0,11
2	1045	990	1045	213	215	211	4,79	4,51	4,75	0,35	1	0,94	1	1	0,94	1	0,06	0,06	0,06	1,49	0,09
3	1045	990	990	212	214	210	4,8	4,51	4,48	0,38	1	0,94	0,93	1	0,93	0,93	0,06	0,06	0,06	1,37	0,09
4	1045	935	990	210	212	209	4,74	4,22	4,44	0,6	0,98	0,89	0,92	0,98	0,89	0,92	0,06	0,06	0,06	1,34	0,09
5	1045	935	935	209	211	209	4,7	4,19	4,17	0,6	0,97	0,88	0,86	0,97	0,88	0,86	0,06	0,06	0,06	1,33	0,08
6	1045	825	935	213	214	212	4,75	3,73	4,23	0,93	1	0,79	0,89	1	0,79	0,89	0,06	0,05	0,06	1,32	0,09
7	1045	605	825	212	214	212	4,75	2,71	3,77	1,85	1	0,58	0,79	1	0,58	0,79	0,06	0,05	0,05	1,19	0,08
8	1045	220	550	215	216	214	4,81	0,98	3,04	3,37	1	0,21	0,65	1	0,21	0,65	0,06	0,05	0,05	0,95	0,06
9	1045	0	550	213	214	212	4,76	0	3	4,23	1	0	0,63	1	0	0,63	0,06	0	0,05	0,82	0,05
10	1045	0	0	215	216	215	4,79	0	0	4,74	1	0	0	1	0	0	0,07	0	0	0,52	0,04

Tabel 3.4. Data Pengujian untuk Beban Individif dengan kWh-meter analog

No.	Load <sub>1</sub> (VAR)	Load <sub>2</sub> (VAR)	Load <sub>3</sub> (VAR)	I <sub>1</sub> (A)	I <sub>2</sub> (A)	I <sub>3</sub> (A)	I <sub>N</sub> (A)	V <sub>1</sub> (V)	V <sub>2</sub> (V)	V <sub>3</sub> (V)	P <sub>1</sub> (W)	P <sub>2</sub> (W)	P <sub>3</sub> (W)	W <sub>1</sub> (kWh)	W <sub>2</sub> (kWh)	W <sub>3</sub> (kWh)	cos			W 1 fasa (kWh)	W 3 fasa (kWh)
																	1	2	3		
1.	1045	1045	1045	4,8	4,8	4,8	0,5	214	213	214	10	11	11	0,034	0,031	0,035	0,1	0,1	0,1	0,1	0,11
2.	1045	990	1045	4,7	4,5	4,7	0,6	210	210	211	10	10	11	0,032	0,03	0,033	0,1	0,1	0,1	0,095	0,1
3.	1045	990	990	4,8	4,5	4,6	0,6	211	211	212	10	10	10	0,033	0,03	0,032	0,1	0,1	0,1	0,095	0,1
4.	1045	935	990	4,8	4,2	4,5	0,75	211	210	212	11	9	10	0,034	0,027	0,032	0,1	0,1	0,1	0,093	0,09
5.	1045	935	935	4,8	4,2	4,3	0,75	210	208	211	11	9	9	0,035	0,025	0,024	0,1	0,1	0,1	0,084	0,09
6.	1045	825	935	4,8	3,8	4,3	1,1	212	210	213	10	9	9	0,033	0,02	0,024	0,1	0,1	0,1	0,077	0,09
7.	1045	605	825	4,8	2,7	3,7	1,90	212	209	212	13	9	9	0,035	0,018	0,021	0,1	0,13	0,1	0,074	0,09
8.	1045	220	550	4,8	0,8	3	3,43	211	208	211	13	1	2	0,035	0,005	0,018	0,1	0,35	0,13	0,058	0,07
9.	1045	0	550	4,7	0	2,9	4,24	209	208	211	11	0	2	0,032	-	0,018	0,1	1	0,13	0,05	0,07
10.	1045	0	0	4,6	0	0	4,65	214	211	215	16	0	0	0,033	-	-	0,1	1	1	0,033	0,04

Table 3.5: Data Pengujian untuk Beban Kapasitif dengan kWh-meter digital

V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>	I <sub>N</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	cos			W 3 fase (KVAR)	W 3 fase (kWh)
												1	2	3		
(V)	(V)	(A)	(A)	(A)	(A)	(W)	(W)	(W)	(VAR)	(VAR)	(VAR)					
212	209	4.68	4.7	4.69	0.1	0	0	0	-0.98	-0.97	-0.97	0	0	0	0	0
212	212	4.65	4.33	4.57	0.25	0	0	0	-0.97	-0.9	-0.96	0	0	0	0	0
211	212	4.65	4.33	4.34	0.73	0	0	0	-0.97	-0.9	-0.91	0	0	0	0	0
211	211	4.67	4.08	4.33	0.48	0	0	0	-0.97	-0.84	-0.91	0	0	0	0	0
212	212	4.66	4.08	4.09	0.58	0	0	0	-0.97	-0.84	-0.85	0	0	0	0	0
211	211	4.64	3.6	4.09	0.89	0	0	0	-0.97	-0.75	-0.85	0	0	0	0	0
211	212	4.66	2.65	3.62	1.75	0	0	0	-0.97	-0.55	-0.75	0	0	0	0	0
211	212	4.65	0.95	2.88	3.19	0	0	0	-0.96	-0.19	-0.6	0	0	0	0	0
211	211	4.66	0	2.87	4.05	0	0	0	-0.97	0	-0.6	0	0	0	0	0
210	211	4.67	0	0	4.07	0	0	0	-0.97	0	0	0.07	0	0	0	0

Tabel 3.6: Data Pengujian untuk Beban Kapasitif dengan kWh-meter analog

No	Load <sub>1</sub> (W)	Load <sub>2</sub> (W)	Load <sub>3</sub> (W)	V <sub>1</sub> (V)	V <sub>2</sub> (V)	V <sub>3</sub> (V)	I <sub>1</sub> (A)	I <sub>2</sub> (A)	I <sub>3</sub> (A)	I <sub>n</sub> (A)	P <sub>1</sub> (W)	P <sub>2</sub> (W)	P <sub>3</sub> (W)	cos			W <sub>1</sub> (kWh)	W <sub>2</sub> (kWh)	W <sub>3</sub> (kWh)	W <sub>1 fase</sub> (kWh)	W <sub>3 fase</sub> (kWh)
														1	2	3					
1.	1045	1045	1045	213	210	212	4.62	4.55	4.6	0.85	52	51	51	0	0	0	0.003	0.003	0.003	0.009	-
2.	1045	990	1045	214	212	214	4.66	4.4	4.67	1.05	50	49	51	0	0	0	0.003	0.003	0.003	0.009	-
3.	1045	990	990	212	210	212	4.65	4.35	4.38	1.16	50	49	49	0	0	0	0.002	0.002	0.003	0.007	-
4.	1045	935	990	212	210	212	4.65	4.1	4.4	1.25	50	47	49	0	0	0	0.002	0.002	0.003	0.007	-
5.	1045	935	935	210	208	210	4.68	4.05	4.08	1.36	49	47	48	0	0	0	0.002	0.002	0.002	0.006	-
6.	1045	825	935	212	210	212	4.65	3.6	4.15	1.7	50	40	48	0	0.05	0	0.002	0.002	0.002	0.006	-
7.	1045	605	825	212	209	212	4.65	2.65	3.65	2.1	50	29	40	0	0.12	0.05	0.003	0.002	0.002	0.007	-
8.	1045	220	550	212	210	211	4.65	1	2.42	3.37	51	9	25	0	0.34	0.14	0.002	0.001	0.002	0.005	-
9.	1045	-	550	212	210	211	4.66	-	2.42	4.14	52	-	25	0	1	0.14	0.003	-	0.002	0.005	-
10.	1045	-	-	214	212	212	4.72	-	-	4.73	52	-	-	0	1	1	0.003	-	-	0.003	-

Tabel 3.7. Data Pengujian Untuk Pembebanan Resistif-Induktif

No.	Load <sub>1</sub> (W)	Load <sub>2</sub> (W)	Load <sub>3</sub> (W)	V <sub>1</sub> (V)	V <sub>2</sub> (V)	V <sub>3</sub> (V)	I <sub>0</sub> (A)	I <sub>1</sub> (A)	I <sub>2</sub> (A)	I <sub>3</sub> (A)	P <sub>1</sub> (kW)	P <sub>2</sub> (kW)	P <sub>3</sub> (kW)	cos			W 3 fase analog (kWh)	W 3 fase digital (kWh)
														1	2	3		
1	1045	1045	1045	216	217	218	0.09	4.61	4.62	4.64	0.95	0.95	0.96	1	1	1	2.7	2.9
2	1045	440 + J 605	495 + J 550	211	215	211	3.39	4.47	3.46	3.31	0.93	0.44	0.48	1	0.6	0.7	1.7	1.89
3	1045	495 + J 550	550 + J 495	212	215	211	3.08	4.47	3.37	3.41	0.93	0.49	0.52	1	0.7	0.8	1.83	1.97
4	1045	550 + J 495	660 + J 385	216	218	214	2.09	4.54	3.41	3.43	0.97	0.56	0.63	1	0.8	0.9	1.98	2.19

Tabel 3.8. Data Pengujian Untuk Pembebanan Resistif-Capasitif

No.	Load <sub>1</sub> (W)	Load <sub>2</sub> (W)	Load <sub>3</sub> (W)	V <sub>1</sub> (V)	V <sub>2</sub> (V)	V <sub>3</sub> (V)	I <sub>v</sub> (A)	I <sub>1</sub> (A)	I <sub>2</sub> (A)	I <sub>3</sub> (A)	P <sub>1</sub> (kW)	P <sub>2</sub> (kW)	P <sub>3</sub> (kW)	cos			W 3 fasa analog (kWh)	W 3 fasa digital (kWh)
														1	2	3		
1	1045	1045	1045	216	217	218	0.09	4.61	4.62	4.64	0.95	0.95	0.96	1	1	1	2.7	2.9
2	1045	440 - 495	495 - 550	211	215	210	3.65	4.47	3.33	3.19	0.94	0.41	0.44	1	0.6	0.7	1.65	1.8
3	1045	495 - 550	550 - j 495	212	215	211	3.28	4.47	3.26	3.19	0.94	0.47	0.5	1	0.7	0.8	1.72	1.92
4	1045	550 - j 495	660 - j 385	213	216	214	2.86	4.5	3.25	3.33	0.95	0.51	0.61	1	0.8	0.9	1.95	2.12

## BAB 4

### ANALISIS HASIL PENGUKURAN

Skripsi ini bertujuan untuk melihat perbedaan hasil pengukuran yang didapat dengan menggunakan KWh-meter analog 3 fasa dan KWh-meter digital 3 fasa. Perbandingan yang dilihat adalah perbandingan pembacaan KWh-meter karena adanya ketidakseimbangan beban. Hasil pengukuran diperoleh dengan menjumlahkan hasil pengukuran menggunakan kWh-meter satu fasa untuk ketiga fasanya kemudian dibandingkan dengan hasil pengukuran yang didapat dari pengukuran energi terpakai menggunakan kWh-meter tiga fasa secara langsung. Perbedaan yang terdapat pada nilai keduanya, yakni penjumlahan KWh-meter 1 fasa dengan KWh-meter 3 fasa dikaitkan dengan ketidakseimbangan beban yang dicatu pada sistem tiga fasa.

Ketidakseimbangan ditunjukkan oleh keberadaan arus netral. Suatu sistem tiga fasa seimbang ideal tidak akan memiliki arus netral, atau arus netralnya sama dengan nol sesuai persamaan (2.4). Beban yang semakin tidak seimbang, maka semakin besar arus netralnya. Nilai ketidakseimbangan ini dihitung dengan membandingkan selisih terbesar dari daya beban antara dua buah fasa. Ketidakseimbangan ditentukan berdasarkan selisih beban antar fasa yang terbesar. Nilai ketidakseimbangan berkisar dari angka 0% sampai 100%. Ketidakseimbangan sebesar 0% berarti beban seimbang, sedangkan ketidakseimbangan 100% jika ada salah satu atau dua fasa yang tidak berbeban dan fasa yang lain memiliki suatu nilai.

Besar ketidakseimbangannya dihitung dengan :

$$\% \text{ ketidakseimbangan} = \frac{Z_{\max} - Z_{\min}}{Z_{\max}} \times 100 \%$$

Dengan Z = beban yang terpasang

Kondisi ketidakseimbangannya sebagai berikut :

A : R = 100 %	B : R = 100 %	C : R = 100 %
S = 95 %	S = 95 %	S = 89 %
T = 100 %	T = 95 %	T = 95 %

D : R = 100 %    E : R = 100 %    F : R = 100 %  
 S = 89 %        S = 79 %        S = 58 %  
 T = 89 %        T = 89 %        T = 79 %

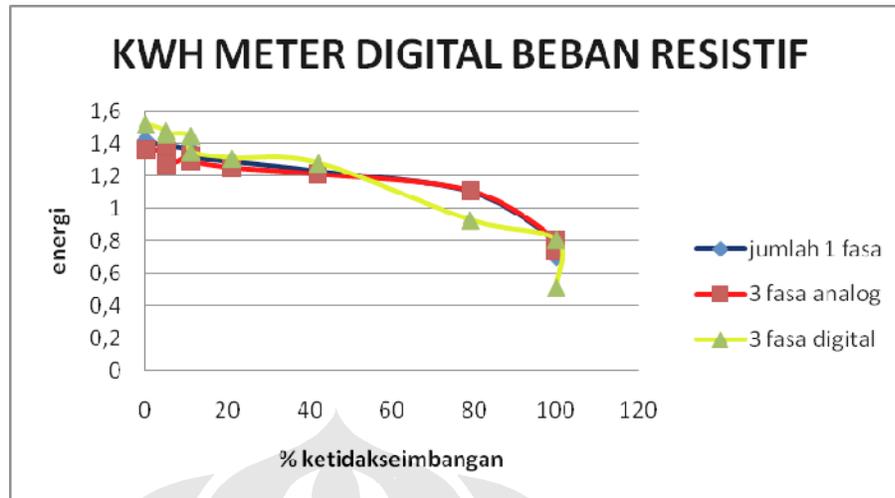
G : R = 100 %    H : R = 100 %    I : R = 100 %  
 S = 21 %        S = 21 %        S = 0 %  
 T = 52 %        T = 0 %        T = 0 %

#### 4.1. Beban Resistif

Pengujian dengan beban resistif murni dengan melakukan variasi sebanyak 11 data selama masing-masing 30 menit. Pengujian pada satu tabel dilakukan sekaligus berurutan. Berikut perbandingan hasil pengujian dengan menggunakan kWh analog dengan kWh digital serta grafik perbandingannya.

**Tabel 4.1** Perbandingan hasil pengukuran kWh-meter 1 dan 3 fasa untuk beban resistif

No.	% ketidakseimbangan	$\sum kWh_{1\phi}$	$kWh_{3\phi}$ analog	$kWh_{3\phi}$ digital
1.	0	1,422	1,36	1,52
2.	5	1,383	1,35	1,48
3.	5	1,39	1,27	1,46
4.	11	1,365	1,32	1,45
5.	11	1,318	1,29	1,35
6.	21	1,291	1,25	1,31
7.	42	1,231	1,21	1,28
8.	79	1,106	1,11	0,93
9.	100	0,795	0,81	0,81
10.	100	0,7	0,74	0,51



**Gambar 4.1** Grafik perbandingan pengukuran kWh-meter analog dan digital untuk beban resistif

Grafik hasil pengukuran di atas menunjukkan bahwa pada tingkat ketidakseimbangan rendah, hasil pengukuran dengan menggunakan kWh-meter tiga fasa analog lebih rendah dibanding hasil pengukuran langsung menggunakan kWh-meter 1 fasa yang dijumlahkan. Begitu pula dengan hasil menggunakan kWh-meter 3 fasa digital. Kesamaan hasil pengukuran dengan menggunakan kWh-meter satu fasa dan kWh-meter tiga fasa terjadi pada kisaran persentase ketidakseimbangan 40% (antara data ketujuh dan data kedelapan).

Berikut tabel persen kesalahan energi yang dihasilkan :

**Tabel 4.2** Perbandingan presentase kesalahan kWh-meter 3 fasa analog dan 3 fasa digital untuk beban resistif

No.	% ketidakseimbangan	Kesalahan KWh analog (%)	Kesalahan KWh digital (%)
1.	0	3,22833133	0,540404675
2.	5	1,84352404	1,343199013
3.	5	7,24510663	1,235904131
4.	11	0,39389686	0,166483604
5.	11	1,03187694	5,876775269
6.	21	0,17069086	4,658973883

7.	42	9,49730781	1,29547415
8.	79	41,8575673	1,372303646
9.	100	15,7275117	5,055779729
10.	100	4,73922362	1,494557106

Contoh perhitungan (data 1 kWh analog) :

$$V_1 = 210 \text{ V} ; V_2 = 208 ; V_3 = 208 \quad ; \cos \Phi = 1$$

$$I_1 = 4,48 \text{ A} ; I_2 = 4,49 ; I_3 = 4,49 \quad ; \quad t = 30 \text{ menit} = 0,5 \text{ jam}$$

Maka,

$$P_1 = V_1 I_1 \cos \Phi t = 210 \times 4,48 \times 1 \times 0,5/1000 = 0,47415 \text{ kwh}$$

$$P_2 = V_2 I_2 \cos \Phi t = 208 \times 4,49 \times 1 \times 0,5/1000 = 0,467 \text{ kwh}$$

$$P_3 = V_3 I_3 \cos \Phi t = 208 \times 4,49 \times 1 \times 0,5/1000 = 0,467 \text{ kwh}$$

$$P_{\text{total}} = 0,47415 + 0,467 + 0,467 = 1,40537$$

$$\% = \frac{P_{\text{hita}} - P_{\text{perc}}}{P_{\text{hita}}} \times 100 \% = \frac{1,40537 - 1,368}{1,40537} \times 100 \% = 2,63 \%$$

Dari tabel perhitungan diatas terlihat bahwa hasil pengujian menggunakan kWh-meter digital lebih akurat dibandingkan dengan menggunakan kWh-meter analog.

Ketidakseimbangan beban akan menghasilkan komponen negatif. Komponen negatif ini akan mengurangi komponen fundamentalnya (positif *sequence*) yang akan mengacaukan pembacaan.

Dari hasil yang diperoleh, ketidakseimbangan beban mengacaukan pembacaan kWh-meter analog. Presentase kesalahan dengan menggunakan kWh-meter analog mencapai >10%. Sedangkan untuk pengujian menggunakan kWh-meter digital, ketidakseimbangan beban tidak terlalu mempengaruhi pengukuran, presentase kesalahan sekitar 3-5%. Presentase kesalahan pengujian dengan kWh-meter digital masih sesuai dengan standar internasional IEC 62035. Terlihat bahwa pengukuran menggunakan kWh-meter digital, tingkat keakurasiannya lebih tinggi dibandingkan dengan kwh-analog.

Dari hasil pengukuran didapatkan arus netral. Untuk ketidakseimbangan sebesar 100 % didapatkan arus netral sekitar 4 ampere. Arus pada netral merupakan arus berlebih yang didapatkan dari penjumlahan arus setiap fasanya,

**Universitas Indonesia**

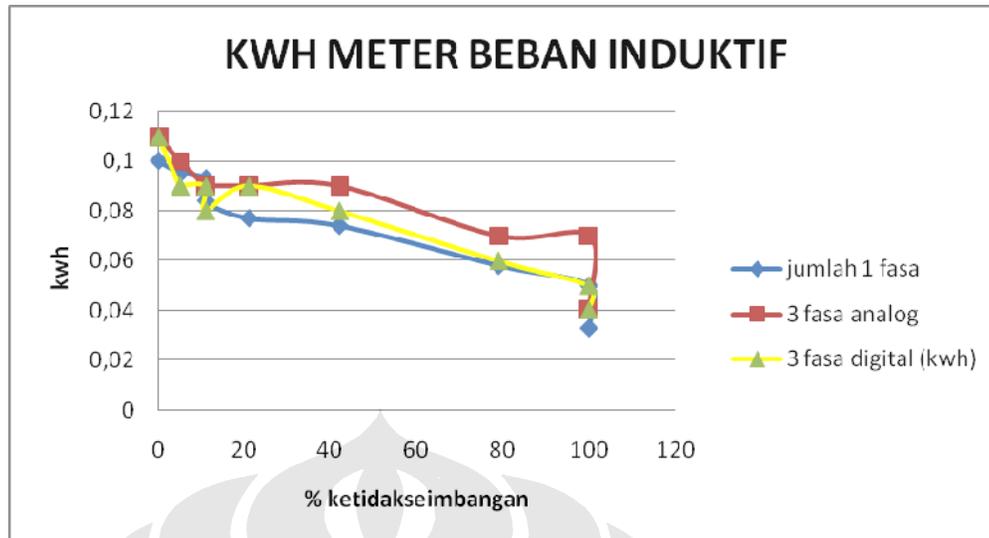
sesuai dengan persamaan 2.23. Penambahan arus pada netral mengakibatkan mengalirnya panas pada kabel netral.

#### 4.2. Beban Induktif

Pengujian dilakukan dengan variasi beban induktif murni sebanyak 10 buah data dengan durasi pengujian tiap data 30 menit. Berikut hasil perbandingan data pengukuran yang diperoleh beserta grafik perbandingannya.

**Tabel 4.3** Perbandingan hasil pengukuran kWh-meter 1 dan 3 fasa untuk beban induktif

No.	% ketidakseimbangan	$\sum kWh_{1\phi}$	$kWh_{3\phi}$ analog	$kWh_{3\phi}$ digital (Kwh)	$kWh_{3\phi}$ digital (Kvarh)
1.	0	0,1	0,11	0,11	1,51
2.	5	0,095	0,1	0,09	1,49
3.	5	0,095	0,1	0,09	1,37
4.	11	0,093	0,09	0,09	1,34
5.	11	0,084	0,09	0,08	1,33
6.	21	0,077	0,09	0,09	1,32
7.	42	0,074	0,09	0,08	1,19
8.	79	0,058	0,07	0,06	0,95
9.	100	0,05	0,07	0,05	0,82
10.	100	0,033	0,04	0,04	0,52



**Gambar 4.2** Grafik perbandingan pengukuran kWh-meter analog dan digital untuk beban induktif

Secara umum, grafik hasil pengukuran dengan beban induktif di atas menunjukkan nilai yang terukur menggunakan kWh-meter satu fasa lebih rendah dibanding nilai yang terukur langsung menggunakan kWh-meter tiga fasa (kecuali data keempat yang menyimpang dari grafik). Keadaan ini berlaku pada seluruh jangkauan ketidakseimbangan.

KWh-meter analog hanya melakukan pembacaan energi aktif saja, sehingga energi reaktif tidak terukur, sedangkan daya yang dihasilkan adalah daya reaktif. Oleh karena itu pembacaan kWh-meter analog kurang akurat dan yang terbaca hanya besar kWh saja. Pada kWh-meter digital, kVARh sudah terintegrasi di dalamnya, sehingga energi reaktifnya terukur.

Pada beban induktif ini, besar daya aktifnya tetap terbaca, walaupun hanya sedikit. Ini dikarenakan adanya reaktansi bahan pada beban induktif itu sendiri. Daya VAR yang dihasilkan oleh beban induktif ini memiliki nilai positif. Ini berarti meskipun ada arus yang mengalir kembali ke sumber, arus dari sumber tetap diteruskan oleh beban. Sehingga daya aktifnya tetap ada.

VAR yang dihasilkan merupakan pengurangan dari daya kompleks (S) dengan daya aktif (P)  $S = P + Q$  (2.15). Untuk perbandingan, VARh yang tidak terbaca pada kWh-meter analog, diperoleh dengan persamaan tersebut. Penjumlahan daya kompleks untuk masing-masing fasa dikurangi dengan daya

aktif yang terbaca pada kWh-meter analog. Sehingga didapatkan perbandingan sebagai berikut :

**Tabel 4.4** Perbandingan presentase kesalahan kWh-meter 3 fasa analog dan 3 fasa digital untuk beban induktif

No.	% ketidakseimbangan	Kesalahan kWh analog (%)	Kesalahan kWh digital (%)
1.	0	6,9875511	1,6562393
2.	5	6,7512362	0,2071425
3.	5	6,8939686	6,0901858
4.	11	6,4608338	4,7065031
5.	11	6,7944249	2,6512586
6.	21	6,8611973	2,2698762
7.	42	7,5061472	0,0591096
8.	79	6,8687734	0,391144
9.	100	8,7091132	0,3996307
10.	100	1,494557106	1,2894488

Contoh perhitungan (data 1 kWh analog) :

$$V_1 = 214 \text{ V} ; V_2 = 213 \text{ V} ; V_3 = 214 \text{ V} ; \cos \Phi = 1$$

$$I_1 = 4,78 \text{ A} ; I_2 = 4,75 \text{ A} ; I_3 = 4,75 \text{ A} ; t = 30 \text{ menit} = 0,5 \text{ jam}$$

Maka,

$$Q_1 = V_1 I_1 \sin \Phi t = 214 \times 4,78 \times 1 \times 0,5 = 0,5078381 \text{ kvarh}$$

$$Q_2 = V_2 I_2 \sin \Phi t = 213 \times 4,75 \times 1 \times 0,5 = 0,5057088 \text{ kvarh}$$

$$Q_3 = V_3 I_3 \sin \Phi t = 214 \times 4,75 \times 1 \times 0,5 = 0,5072335 \text{ kvarh}$$

$$Q \text{ total} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 1,5207803 \text{ kvarh}$$

$$\% = \frac{P_{\text{hitung}} - P_{\text{searc}}}{P_{\text{hitung}}} \times 100 \% = \frac{1,8207803 - 1,4143}{1,8207803} \times 100 \% = 6,99 \%$$

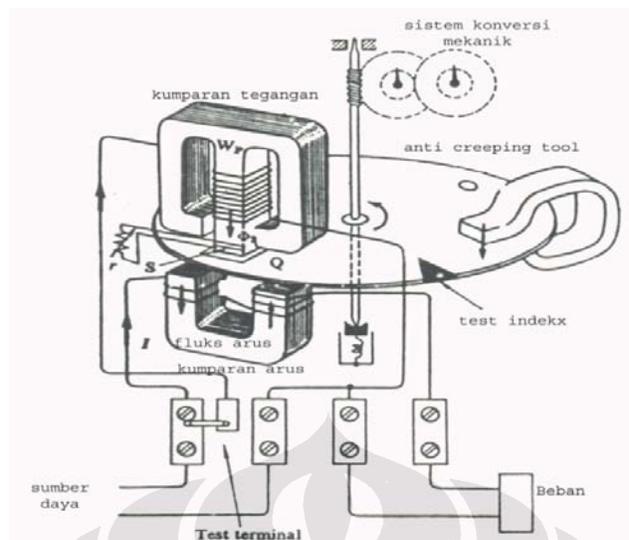
Dari tabel diatas terlihat untuk pembebanan induktif, pembacaan menggunakan kWh-meter digital memiliki presentase kesalahan yang lebih kecil dibandingkan dengan kWh-meter analog. Presentase kesalahan kWh-meter digital masih dalam standar internasional IEC 62035. Untuk pengukuran nilai daya aktifnya, kedua piranti memiliki tingkat kesalahan yang hampir sama.

Pada ketidakseimbangan beban induktif murni juga didapatkan adanya arus yang mengalir pada netral. Arus yang mengalir pada netral ini menandakan sistem yang bekerja tidak stabil.

#### **4.3 Beban Kapasitif**

Pada pengujian pertama, piringan pada unit kWh-meter berputar sangat lambat karena daya nyata yang terukur sangat rendah. Hasil pengukuran menunjukkan nilai kWh yang kecil pada kWh-meter satu fasa, sedangkan pada kWh-meter tiga fasa tidak terlihat perubahan tampilan angka, maka dianggap hasil pengukuran adalah nol. Ini dikarenakan adanya arus balik yang dikirimkan oleh beban kapasitif ke sumber.

Hasil pengukuran energi aktif pada kWh analog sangat kecil dikarenakan energi yang seharusnya dihasilkan adalah VARh. Putaran piringan kWh-meter analog sangat pelan dikarenakan VAR yang dihasilkan oleh beban memberikan arus balik ke kWh-meter. Arus tersebut akan masuk ke dalam kumparan arus pada kWh-meter. Arus ini berlawanan arah dengan arus yang masuk dari sumber. Arus balik ini mengalir pada kumparan arus yang kemudian akan menghasilkan fluks. Fluks ini akan menghasilkan ggl induksi. Ggl induksi yang dihasilkan ini mengakibatkan timbulnya ggl induksi pada piringan. Ggl ini menghasilkan arus yang menimbulkan gaya Lorentz ( $F = B \cdot i \cdot l \cdot \cos \Phi$ ). Interaksi antara arus putar dengan fluks magnetis akan menghasilkan suatu torsi mekanis dan perubahan torsi akan menyebabkan piringan berputar dengan arah yang berlawanan dengan arah putaran piringan seharusnya. Ini menyebabkan piringan berhenti berputar.



**Gambar 4.3** gambar prinsip kerja dari kWh-meter analog 1 fasa

Perbedaannya dengan beban induktif adalah besar daya reaktif yang dihasilkan oleh beban kapasitif bernilai negatif, artinya daya reaktif yang dihasilkan hampir sepenuhnya akan dibalikkan ke sistem yang mengganggu daya aktif yang dikirimkan ke beban.

Pada kWh-meter digital, daya reaktif yang dihasilkan oleh beban terbaca dengan nilai negatif (lihat tabel 3.5). Namun untuk pembacaan energi reaktif, perubahan energi yang terbaca tidak ada. Ini menandakan energi reaktif yang terbaca 0, demikian juga dengan energi aktifnya. Karena adanya daya reaktif yang dihasilkan oleh beban yang kemudian dikirimkan ke sistem, seolah-olah daya aktif yang diterima beban, secara vektor saling menghilangkan, sehingga tidak ada energi aktif yang terbaca.

Arus yang mengalir tetap ada, jadi ketika beban tidak seimbang, arus yang terbaca di netral tetap terbaca.

#### 4.4 Beban Campuran

Pengujian dilakukan dengan memberikan beban tiga fasa dengan nilai 1045 VA. Pada fasa 1 digunakan beban resistif. Pada fasa yang lain digunakan variasi

beban nyata (resistif murni) yang dikombinasikan dengan beban reaktif (induktif dan kapasitif). Pengujian dilakukan selama 1 jam untuk masing-masing variasi beban. Persentase ketidakseimbangan pada bagian ini dihitung berdasarkan porsi daya reaktifnya dibanding dengan 1045 VA. Berdasarkan pengujian sebelumnya (komponen murni),

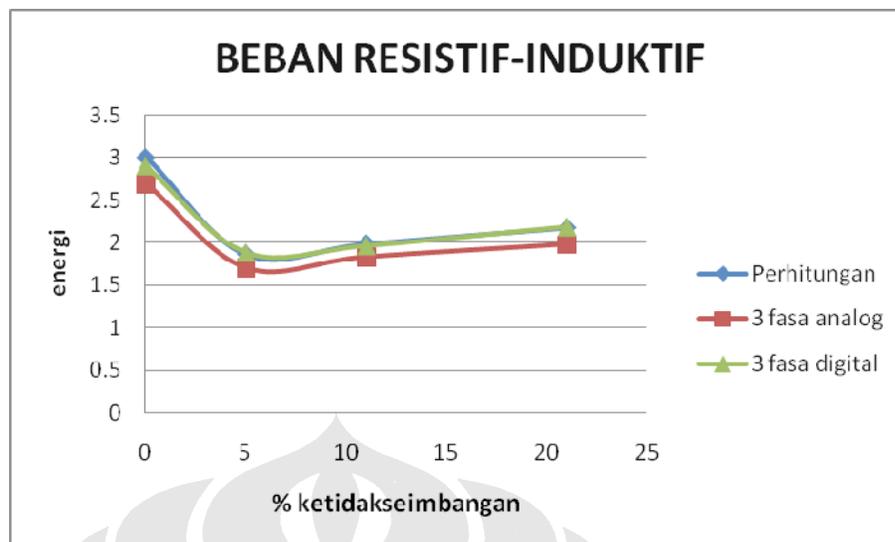
- a. pembebanan resistif hanya akan menambahkan besarnya daya aktif yang terpakai
- b. pembebanan induktif akan menghasilkan daya reaktif, arus mengalir tetap seperti biasa, tidak ada arus balik.
- c. pembebanan kapasitif akan menghasilkan daya reaktif dan arus balik yang berlawanan arah dengan daya aktif yang mengalir ke beban, secara vektor nilai keduanya saling mengurangi.

Ketidakseimbangan beban pada beban campuran ini didasarkan pada power faktornya, variasi dari 0,6 – 1.

Pengujian dilakukan 2 tahap yakni pengujian dengan pembebanan campuran resistif-induktif dan pembebanan resistif-capasitif.

#### **4.4.1. Beban Resistif-Induktif**

Pada pembebanan campuran resistif-induktif, berdasarkan pada percobaan resistif murni dan induktif murni, nilai daya yang digunakan oleh beban merupakan penjumlahan daya yang dipakai oleh beban resistif dan beban induktif. Besar daya aktif yang digunakan oleh induktif sangat kecil, sehingga yang terbaca oleh kWh-meter, baik analog maupun digital, adalah daya aktif dari beban resistif.



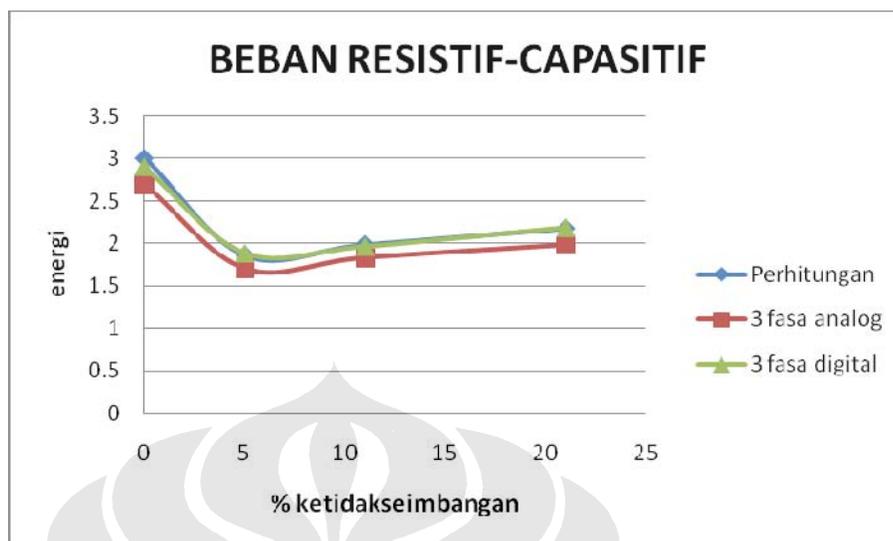
**Gambar 4.5** Grafik perbandingan pengukuran kWh-meter analog dan digital untuk beban resistif-induktif

Grafik diatas menunjukkan perbandingan nilai energi yang diukur menggunakan kWh-meter digital dengan kWh-meter analog. Pada kWh-meter analog, hasil pembacaan memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan hasil pembacaan kWh-meter digital sama seperti pada pengujian-pengujian sebelumnya. Pembacaan pada kWh-meter analog lebih kecil dibandingkan oleh kWh-meter digital dikarenakan perbedaan kelas, kWh-meter analog merupakan kelas 2 sedangkan kWh-meter digital merupakan kelas 1. Tingkat ketelitian dari kWh-meter digital juga mengakibatkan presentase kesalahan yang didapatkan lebih kecil dibandingkan dengan kWh-meter analog.

Pada pembebanan ini diperoleh presentase kesalahan pembacaan kWh-meter sebesar 0-3 % untuk kWh-meter digital dan 7-10 % untuk kWh-meter analog.

#### 4.4.2. Beban Resistif-Kapasitif

Pada beban resistif-kapasitif, beban reaktif dari kapasitifnya mengurangi daya aktif yang dikirimkan ke beban. Sehingga dalam pembacaan, daya aktif yang terbaca lebih kecil dibandingkan dengan daya aktif dengan beban resistif yang sama tanpa menggunakan kapasitif. (bandingkan tabel 3.1 dengan 3.7). Berikut grafik perbandingan kWh-meter analog dengan kWh-meter digital pada beban resistif-kapasitif.



**Gambar 4.6** Grafik perbandingan pengukuran kWh-meter analog dan digital untuk beban resistif-kapasitif

Pada beban resistif-kapasitif, besar daya yang terukur adalah representatif dari daya aktif resistif dan daya reaktif dari kapasitif. Daya yang terukur pada kWh-meter adalah daya aktif dari resistif. Besarnya tidak murni seperti beban resistif murni seperti telah dijelaskan di atas.

Persentase kesalahan yang diperoleh pada pembebanan resistif-kapasitif adalah sebesar 2-3 % untuk kWh-meter digital dan 10-13 % untuk kWh-meter analog.

#### 4.5. Analisa Perbandingan

Dilihat dari beban yang tidak seimbang, didapatkan adanya arus yang mengalir pada netral sistem (pengujian) secara keseluruhan. Arus yang mengalir pada netral ini menyebabkan mengalirnya panas pada netral. Panas yang muncul diakibatkan oleh arus berlebih karena netral dirancang untuk dialiri arus sekecil mungkin. Di dalam suatu sistem netral merupakan sebuah referensi, referensi sebaiknya ideal pada saat tidak ada gangguan. Jadi ketika sebuah referensinya mulai terganggu maka sistem pun ikut terganggu.

Ketidakseimbangan beban mempengaruhi pembacaan kWh-meter analog. Ketika beban tidakseimbang, arus yang masuk ke dalam kWh meter pun tidak

seimbang, sehingga menimbulkan 3 buah medan listrik yang berbeda. Seperti prinsip kerja kWh 1 fasa analog, kWh 3 fasa analog juga bekerja dengan prinsip induksi. Ketiga medan ini secara vektor akan saling mengurangi sehingga putaran piringan kWh-meter analog berkurang kecepatannya dari yang seharusnya.

Sedangkan pada kWh digital, penggunaan mikrokontroler mengurangi kesalahan pembacaan yang disebabkan oleh adanya perbedaan medan listrik. Karena itu pembacaan kWh-meter analog lebih rendah dibandingkan pembacaan kWh-meter digital.

Berdasarkan presentase kesalahan yang didapatkan dari perhitungan di atas, didapatkan rata-rata kesalahan pembacaan oleh kWh-meter analog adalah 5-10%. Ini berarti produsen listrik, PLN, memiliki kerugian sebesar 5-10% daya terpakai yang tidak dibayar oleh pelanggan. Sedangkan dengan menggunakan kWh-meter digital, rata – rata presentase kesalahan pembacaannya adalah sekitar 3-6%.

Dari segi *financial*, terlihat bahwa penggunaan kWh-meter digital lebih menguntungkan dari pihak produsen listrik. Sebaliknya, penggunaan kWh-meter analog jelas lebih menguntungkan bagi pihak konsumen. Para konsumen hanya perlu membayar sekitar 90% dari energi yang mereka gunakan.

Penggunaan kWh-meter digital juga dapat mengatasi krisis energi yang ada sekarang ini. Krisis yang terjadi karena adanya pemakaian energi yang tidak sesuai dengan jumlah yang dibayarkan. Penggunaan kWh-meter digital merupakan salah satu solusinya. KWH-meter digital mencegah terjadinya kecurangan dalam pemakaian listrik, seperti pencurian-pencurian listrik, karena sistem yang ada dalam kWh-meter digital ini mencatat semua pemakaian daya dan energi oleh konsumen.

Untuk itu perlu adanya pergantian instalasi pemasangan kWh-meter analog dengan kWh-meter digital.

Kelebihan kWh-meter digital :

1. Tingkat akurasi yang lebih baik dibandingkan kWh-meter analog
2. Dapat dimonitor dari pusat kontrol
3. Mampu membaca daya reaktif

Kekurangan kWh-meter digital :

1. Biaya alat yang mahal
2. Lebih mudah rusak dibandingkan kWh-meter analog karena menggunakan peralatan elektronik



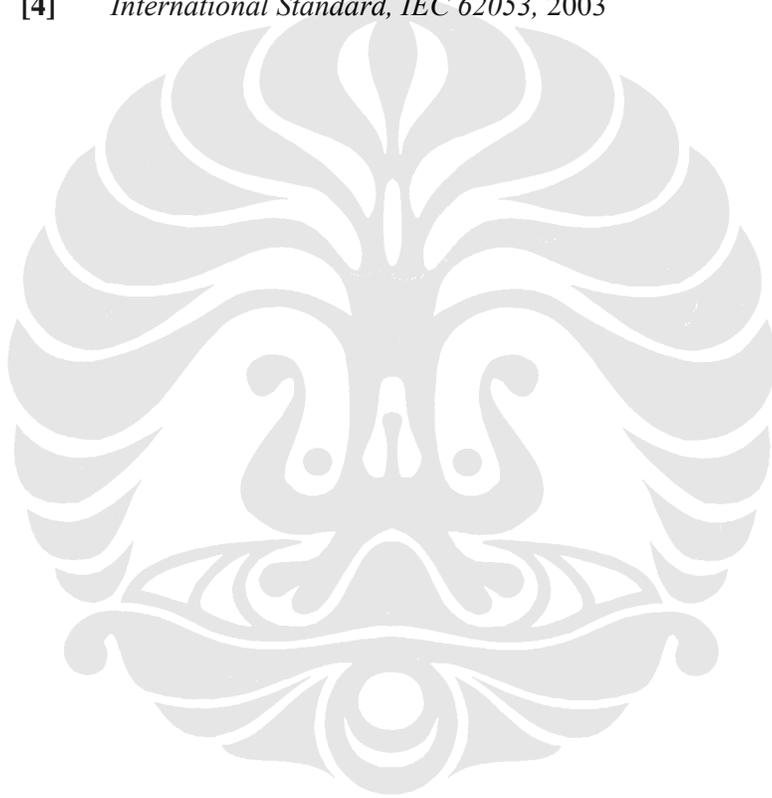
## **BAB 5**

### **KESIMPULAN**

1. Keunggulan dari kWh-meter digital adalah memiliki tingkat ketelitian yang lebih baik daripada kWh-meter analog
2. Ketidakseimbangan beban memiliki dampak pada panasnya arus netral
3. Pembacaan menggunakan kWh-meter digital lebih besar dibandingkan dengan kWh-meter analog
4. Penggunaan kWh-meter digital mempermudah dalam penganalisaan penggunaan daya yang terpakai.
5. Ketelitian kWh-meter digital berkisar antara 0 – 6 %, sedangkan ketelitian kWh-meter analog berkisar antara 5 – 13 %.

## DAFTAR REFERENSI

- [1] Chapman, Stephen J., *Electric Machinery and Power System Fundamentals International edition*, Mc Graw Hill, 2002
- [2] Handry K., Felix P., Deky L., “*Wireless Data Logger with Microcontroller MCS-51*”, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Kristen Petra, 2004
- [3] Setiabudy, Rudy, *Pengukuran Besaran Listrik*, LP-FEUI, 2007
- [4] *International Standard, IEC 62053*, 2003



## DAFTAR PUSTAKA

- Chapman, Stephen J., *Electric Machinery and Power System Fundamentals International edition*, Mc Graw Hill, 2002
- Johnson, David E., *Electric Circuit Analysis*, New Jersey: Prentice-Hall, Inc, 1997
- Sapie, Soedjana, *Pengukuran dan Alat-Alat Ukur Listrik*, Jakarta: P.T. Pradnya Paramita, 1979
- Setiabudy, Rudy, *Pengukuran Besaran Listrik*, Depok: Lembaga Penerbit Fakultas Ekonomi Universitas Indonesia, 2007
- Weedy, B.M. & B.J Cory, *Electric Power Systems Fourth Edition*, Chicester: John Wiley & Sons Ltd, 2001

