

S1 REG

**PENGARUH KETIDAKSEIMBANGAN
BEBAN TIGA FASA
TERHADAP HASIL PENGUKURAN**

SKRIPSI

OLEH :

**FRANKY
04 03 03 047Y**



**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
JUNI 2008**

**PENGARUH KETIDAKSEIMBANGAN
BEBAN TIGA FASA
TERHADAP HASIL PENGUKURAN**

OLEH :

**FRANKY
04 03 03 047Y**



**SKRIPSI INI DIAJUKAN UNTUK MELENGKAPI SEBAGIAN
PERSYARATAN MENJADI SARJANA TEKNIK**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
JUNI 2008**

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul :

PENGARUH KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN TIGA FASA TERHADAP HASIL PENGUKURAN

yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada program studi Teknik Elektro Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari skripsi yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Depok, Juni 2008

(Franky)

NPM : 04 03 03 047Y

PERSETUJUAN

Skripsi dengan judul:

PENGARUH KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN TIGA FASA TERHADAP HASIL PENGUKURAN

dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada program studi Teknik Elektro Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia dan disetujui untuk diajukan dalam sidang ujian skripsi.

Depok, Juni 2008

Dosen Pembimbing,

Dr. Ir. Rudy Setiabudy
NIP.

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur dipanjatkan kepada kepada TUHAN yang sejak semula menyertai bahkan sebelum skripsi ini mulai dibuat dalam seluruh pertolonganNya sehingga skripsi ini dapat diselesaikan. Penulis juga ingin berterima kasih kepada:

Dr. Ir. Rudy Setiabudy

Selaku dosen pembimbing yang telah memberikan pengarahan, bimbingan, saran dan kesabarannya dalam pengerjaan skripsi ini. Juga kepada bapak Dr. Ir. Ridwan Gunawan, MT dan bapak Budi Sudiarto, ST. MT atas bantuannya membimbing. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada orang tua. Selain itu penulis berterima kasih kepada teman-teman yang telah membantu penulis dalam pengerjaan skripsi ini khususnya asisten TTPL serta pak Darman yang membantu proses pengujian di laboratorium TTPL serta pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Depok, Juni 2008

Penulis

Franky
NPM. 04 03 03 047Y

Franky
040303047Y
Fakultas Teknik Universitas Indonesia

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Rudy Setiabudy

The Impact of Three Phase Unbalanced Load to the Result of Measurements

Abstract

Nationally, Indonesia use three phase electrical system that transmitted by two wires or three phase wire and a netral wire. In electrical transaction, we need energy measurement device called kWh-meter for one phase or three phase electrical circuit. Power in three phase electrical system are similar with sum of each phase power, so the measurement data using one phase or three phase kWh-meter are should be similar. But in fact, the measurement datas is not always similar.

In power systems, generator and transmission line operated in static setting. So, the most affecting component in power systems is load (dynamic set in impedance and power factor). This value of load change not only in a phase. But also in every phase, so it also change the unbalance load.

In this script, will be showed that unbalanced load will cause measurement datas by using three phase kWh-meter move higher that one phase kWh-meter. These changes depended by unbalanced load level given.

Due to variative load, power factor (unbalanced load) will be the main cause that affect difference of measurement datas by using one phase kWh-meter or three phase kWh-meter.

Keyword: kWh-meter, unbalanced load

Franky 040303047Y Fakultas Teknik Universitas Indonesia	Dosen Pembimbing Dr. Ir. Rudy Setiabudy
---	--

Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Tiga Fasa Terhadap Hasil Pengukuran

Abstrak

Indonesia menggunakan sistem tenaga listrik tiga fasa secara keseluruhan yang disalurkan ke konsumen baik dengan 2 kawat maupun 3 kawat fasa dan 1 kawat netral. Dalam jual-beli listrik yang dilakukan, diperlukan alat ukur energi listrik yaitu kWh-meter yang tersedia untuk satu fasa maupun tiga fasa. Pada sistem arus tiga fasa, daya yang disalurkan sama dengan jumlah daya pada masing-masing fasanya, sehingga hasil pengukuran dengan menggunakan kWh-meter satu fasa dan kWh-meter tiga fasa seharusnya sama. Tetapi pada kenyataannya, hasil pengukuran yang didapat tidak selalu sama.

Dalam sistem tenaga listrik, kinerja pembangkit dan saluran transmisi keadaannya cenderung tetap dalam operasinya. Sedangkan komponen beban merupakan komponen yang paling bersifat variatif atau nilainya berubah-ubah (impedansi dan faktor daya-nya). Perubahan yang terjadi ini juga berbeda-beda pada setiap fasanya, sehingga bukan hanya besar nilai beban yang berubah, tetapi juga menimbulkan ketidakseimbangan.

Skripsi ini menunjukkan bahwa pembebanan tidak seimbang akan membuat hasil pengukuran dengan kWh-meter tiga fasa bergerak lebih besar dari hasil pengukuran dengan kWh-meter satu fasa. Perubahan ini tergantung dari nilai ketidakseimbangan beban yang diberikan.

Karena beban bersifat variatif, maka faktor beban (dalam hal ini ketidakseimbangan beban) menjadi faktor dominan yang mempengaruhi perbedaan hasil pengukuran dengan menggunakan kWh-meter satu fasa dan kWh-meter tiga fasa.

Kata kunci: kWh-meter, beban tidak seimbang

DAFTAR ISI

Judul.....	i
Pernyataan Keaslian Skripsi.....	ii
Persetujuan.....	iii
Ucapan Terima Kasih.....	iv
Abstract.....	v
Abstrak.....	vi
Daftar Isi.....	vii
Daftar Gambar.....	viii
Daftar Tabel.....	ix
Bab I Pendahuluan.....	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Tujuan Pembahasan.....	1
1.3 Pembatasan Masalah.....	2
1.4 Sistematika Penulisan.....	2
Bab II Sistem Daya Listrik Arus Bolak-Balik Tiga Fasa.....	3
2.1 Rangkaian Listrik Tiga Fasa.....	3
2.2 Daya Pada Rangkaian Listrik Tiga Fasa.....	6
2.3 Komponen Simetris.....	9
2.4 Harmonik.....	12
2.5 Pengukuran Besaran Listrik.....	15
Bab III Pengujian dan Hasil Pengukuran.....	20
3.1 Pengujian.....	20
3.2 Hasil Pengujian.....	27
Bab IV Analisis Hasil Pengukuran.....	33
Bab V Kesimpulan.....	49
Daftar Acuan.....	50
Daftar Pustaka.....	51
Lampiran.....	52

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Skema sistem tenaga listrik.....	3
Gambar 2.2	Belitan stator tiga fasa.....	4
Gambar 2.3	Arus bolak-balik tiga fasa.....	4
Gambar 2.4	Diagram fasor tegangan.....	5
Gambar 2.5	Rangkaian hubung bintang-bintang (Y-Y).....	5
Gambar 2.6	Beban hubung bintang seimbang.....	6
Gambar 2.7	Diagram fasor dalam grafik $V \sim I$	8
Gambar 2.8	Komponen simetris tegangan dari sistem yang tidak seimbang.....	9
Gambar 2.9	Tegangan sistem sebagai penjumlahan dari komponen simetris.....	10
Gambar 2.10	Gelombang terdistorsi akibat harmonik kelipatan ganjil.....	13
Gambar 2.11	Diagram fasor untuk beban R, L dan C.....	17
Gambar 2.12	Rangkaian kWh-meter satu fasa.....	18
Gambar 2.13	Rangkaian kWh-meter tiga fasa.....	18
Gambar 2.14	KWh-meter.....	19
Gambar 3.1	Rangkaian pengujian.....	20
Gambar 3.2	Rangkaian pengujian tampak samping.....	21
Gambar 3.3	Rangkaian pengujian tampak atas.....	21
Gambar 3.4	Beban variabel yang digunakan.....	22
Gambar 3.5	KWh-meter satu fasa untuk fasa 1.....	23
Gambar 3.6	KWh-meter satu fasa untuk fasa 2.....	24
Gambar 3.7	KWh-meter satu fasa untuk fasa 3.....	25
Gambar 3.8	KWh-meter tiga fasa.....	26
Gambar 4.1	Grafik perbandingan pengukuran kWh-meter 1 dan 3 fasa untuk beban resistif 1.....	34
Gambar 4.2	Grafik perbandingan pengukuran kWh-meter 1 dan 3 fasa untuk beban resistif 2.....	35
Gambar 4.3	Grafik perbandingan pengukuran kWh-meter 1 dan 3 fasa untuk beban induktif.....	37
Gambar 4.4	Grafik perbandingan pengukuran kWh-meter 1 dan 3 fasa untuk beban campuran.....	38

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Data Pengujian untuk Beban Resistif.....	28
Tabel 3.2	Data Pengujian untuk Beban Resistif (lanjutan).....	29
Tabel 3.3	Data Pengujian untuk Beban Induktif.....	30
Tabel 3.4	Data Pengujian untuk Beban Kapasitif.....	31
Tabel 3.5	Data Pengujian untuk Beban Campuran.....	32
Tabel 4.1	Perbandingan hasil pengukuran kWh-meter 1 dan 3 fasa untuk beban resistif 1.....	34
Tabel 4.2	Perbandingan hasil pengukuran kWh-meter 1 dan 3 fasa untuk beban resistif 2.....	35
Tabel 4.3	Perbandingan hasil pengukuran kWh-meter 1 dan 3 fasa untuk beban induktif.....	36
Tabel 4.4	Perbandingan hasil pengukuran kWh-meter 1 dan 3 fasa untuk beban campuran.....	38
Tabel 4.5	Perbandingan hasil pengukuran beban resistif 1 dengan persen kesalahan.....	43
Tabel 4.6	Perbandingan hasil pengukuran beban resistif 2 dengan persen kesalahan.....	43
Tabel 4.7	Perbandingan hasil pengukuran beban induktif dengan persen kesalahan.....	44
Tabel 4.8	Perbandingan hasil pengukuran beban campuran dengan persen kesalahan.....	44

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Energi listrik merupakan bentuk energi yang sangat umum digunakan bagi masyarakat secara luas. Penggunaan energi listrik tidak sekedar terbatas pada daerah atau konsumen kelas atas, namun energi listrik juga dikonsumsi oleh masyarakat menengah dan bawah. Bahkan kegiatan perdesaan juga ditunjang oleh ketersediaan pasokan listrik.

Sistem tenaga listrik yang digunakan di Indonesia secara keseluruhan adalah sistem tegangan tiga fasa dengan arus bolak-balik. Daya listrik tiga fasa ini dibangkitkan oleh generator tiga fasa yang disalurkan melalui saluran transmisi tiga fasa. Daya yang dibangkitkan pada sistem tiga fasa dapat disalurkan dengan mempergunakan 3 kawat fasa dan 1 kawat netral, sehingga dengan demikian seharusnya jumlah daya yang disalurkan pada masing-masing fasa sama dengan daya tiga fasa yang disalurkan. Pada kenyataannya, untuk penggunaan daya dalam kurun waktu tertentu, energi listrik yang dicatat pada masing-masing fasa tidak selalu tepat sama dengan energi listrik yang dicatat pada sistem tiga fasa secara keseluruhan.

Beban yang dicatu oleh suatu sistem tenaga listrik cenderung berubah-ubah nilainya (impedansi dan faktor daya-nya). Perubahan yang terjadi ini juga berbeda-beda pada setiap fasanya, sehingga bukan hanya besar nilai beban yang berubah, tetapi juga menimbulkan ketidakseimbangan.

Faktor yang lebih dominan untuk mengakibatkan perbedaan pengukuran energi pada sistem tiga fasa dan penjumlahan masing-masing fasanya adalah ketidakseimbangan beban. Maka dalam skripsi ini, dilakukan percobaan untuk menunjukkan pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap kedua macam pengukuran tersebut.

1.2 TUJUAN PENULISAN

Skripsi ini dibuat untuk memperlihatkan hasil percobaan yang dilakukan pada suatu sistem daya listrik tiga fasa yang dihubungkan dengan beban pada masing-masing fasanya. Beban yang diberikan divariasikan menurut persentase ketidakseimbangan pada masing-masing fasanya.. Kemudian ingin ditunjukkan terjadi

ketidaksamaan hasil pengukuran pada alat ukur energi listrik tiga fasa dan penjumlahan energi pada masing-masing fasanya yang berpengaruh berupa kerugian dalam jual beli listrik.

1.3 PEMBATASAN MASALAH

Data yang digunakan pada skripsi ini adalah data yang didapat dari percobaan pembebanan yang dilakukan terhadap jaringan tiga fasa yang dilakukan di laboratorium. Jaringan listrik tiga fasa yang ada merupakan jaringan tiga fasa PLN dengan impedansi beban yang diberikan pada masing-masing fasa maksimal 1045 ohm.

1.4 SISTEMATIKA PENULISAN

Skripsi ini terdiri dari bagian pendahuluan, teori daya listrik tiga fasa, pengukuran dan data percobaan, pengolahan data dan analisis hasil pengukuran serta kesimpulan.

Bab pertama berisi latar belakang, tujuan penulisan, pembatasan masalah dan sistematika penulisan.

Bab kedua berisi teori sistem daya listrik tiga fasa, daya pada sistem tiga fasa, komponen simetris dan pengukuran besaran listrik.

Bab ketiga berisi hasil pengukuran serta data-data pengukuran yang didapat dari pengujian.

Bab keempat berisi analisis hasil pengukuran yang dilakukan.

Bab kelima berisi kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan.

BAB II

SISTEM DAYA LISTRIK

ARUS BOLAK-BALIK TIGA FASA

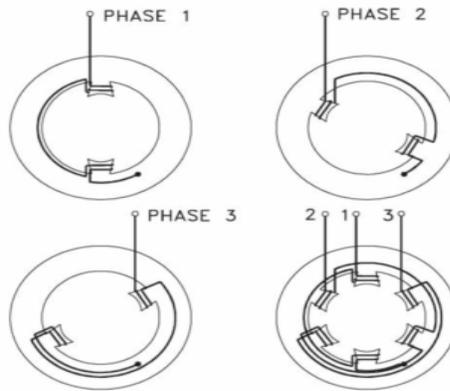
Jaringan listrik yang disalurkan oleh PLN ke rumah-rumah atau pabrik-pabrik sebagai konsumen, merupakan bagian dari sistem tenaga listrik secara keseluruhan. Secara umum, sistem tenaga listrik terdiri dari komponen pembangkit (generator), komponen saluran transmisi dan komponen beban. Daya listrik dibangkitkan oleh generator yang digerakkan oleh penggerak utama (dapat berasal dari energi uap, diesel, air, panas bumi, angin, dan sebagainya). Untuk mengurangi kerugian daya pada saluran transmisi, tegangan listrik tersebut dinaikkan sampai ke tegangan tinggi atau tegangan ekstra tinggi dengan transformator *step-up*, baru kemudian dihubungkan dengan saluran transmisi. Agar daya listrik dapat dimanfaatkan oleh konsumen maka tegangan listrik ini diturunkan sampai 220/380 Volt atau sesuai kebutuhan. Sistem daya listrik yang digunakan adalah sistem daya listrik arus bolak-balik tiga fasa. Berikut skema suatu sistem tenaga listrik mulai dari pembangkit hingga beban.



Gambar 2.1 Skema sistem tenaga listrik

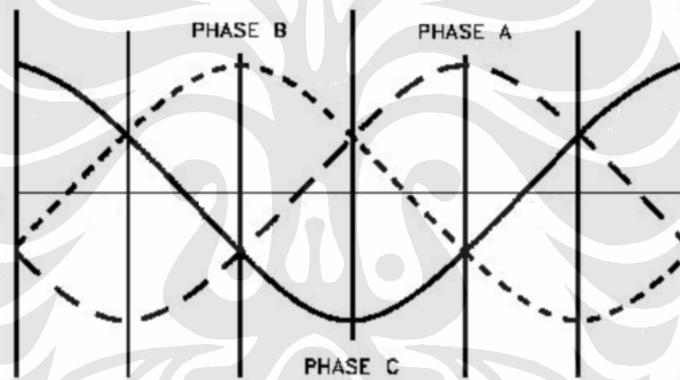
2.1 Rangkaian Listrik Tiga Fasa

Daya listrik tiga fasa dihasilkan oleh generator pembangkit tiga fasa yang merupakan tiga buah generator pembangkit satu fasa yang dikonstruksikan secara simetris sedemikian rupa menurut gambar 2.2 di bawah ini.



Gambar 2.2 Belitan stator tiga fasa

Konstruksi yang simetris demikian menghasilkan tiga buah keluaran tegangan listrik bolak-balik yang memiliki perbedaan fasa sebesar 120° untuk tiap-tiap fasanya.

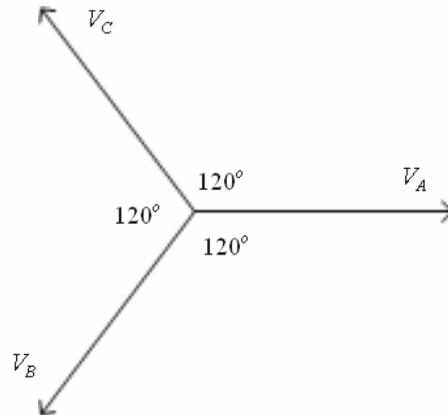


Gambar 2.3 Arus bolak-balik tiga fasa

Gambar di atas menunjukkan hubungan tegangan masing-masing fasa, dengan:

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

dan memiliki diagram fasor sebagai berikut :



Gambar 2.4 Diagram fasor tegangan

Arus yang mengalir pada setiap beban dinyatakan sebagai :

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

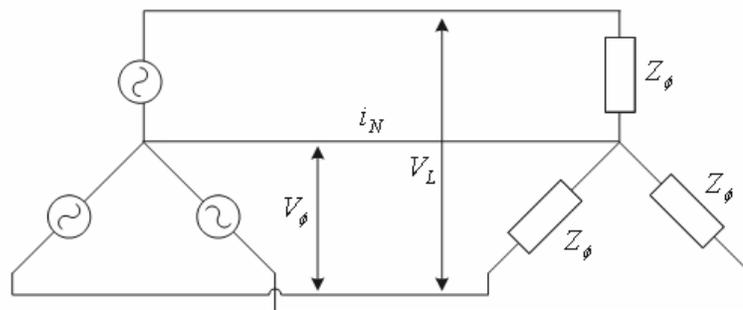
yang pada ketiga fasanya dapat dituliskan :

$$I_A = \frac{V \angle 0^\circ}{Z \angle \theta} = I_m \angle -\theta$$

$$I_B = \frac{V \angle -120^\circ}{Z \angle \theta} = I_m \angle (-120^\circ - \theta) \quad (2.3)$$

$$I_C = \frac{V \angle -240^\circ}{Z \angle \theta} = I_m \angle (-240^\circ - \theta)$$

Rangkaian hubung memiliki sebuah titik hubung ketiga fasanya yang disebut titik netral seperti pada gambar 2.5 berikut :



Gambar 2.5 Rangkaian hubung bintang-bintang (Y-Y)

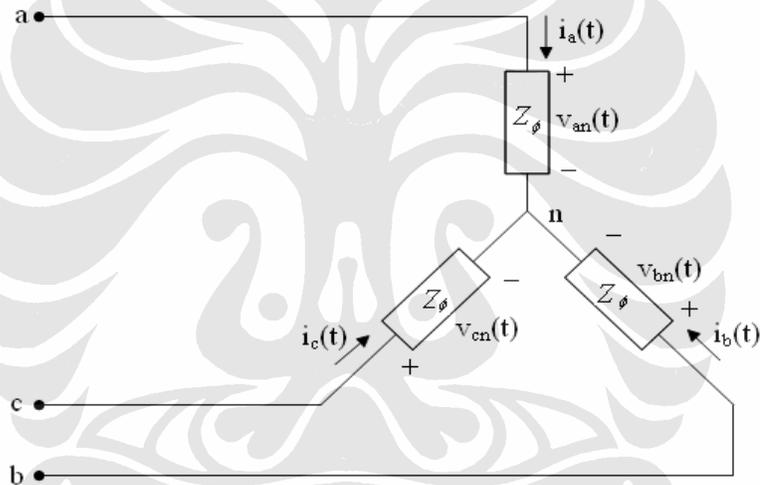
Arus netral (I_N) merupakan penjumlahan arus ketiga fasanya karena jalur netral tersebut dilalui oleh ketiga fasa yang ada, menurut persamaan berikut :

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

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.

2.2 Daya pada Rangkaian Listrik Tiga Fasa

Suatu rangkaian listrik tiga fasa :



Gambar 2.6 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° (simetris), 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 :

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

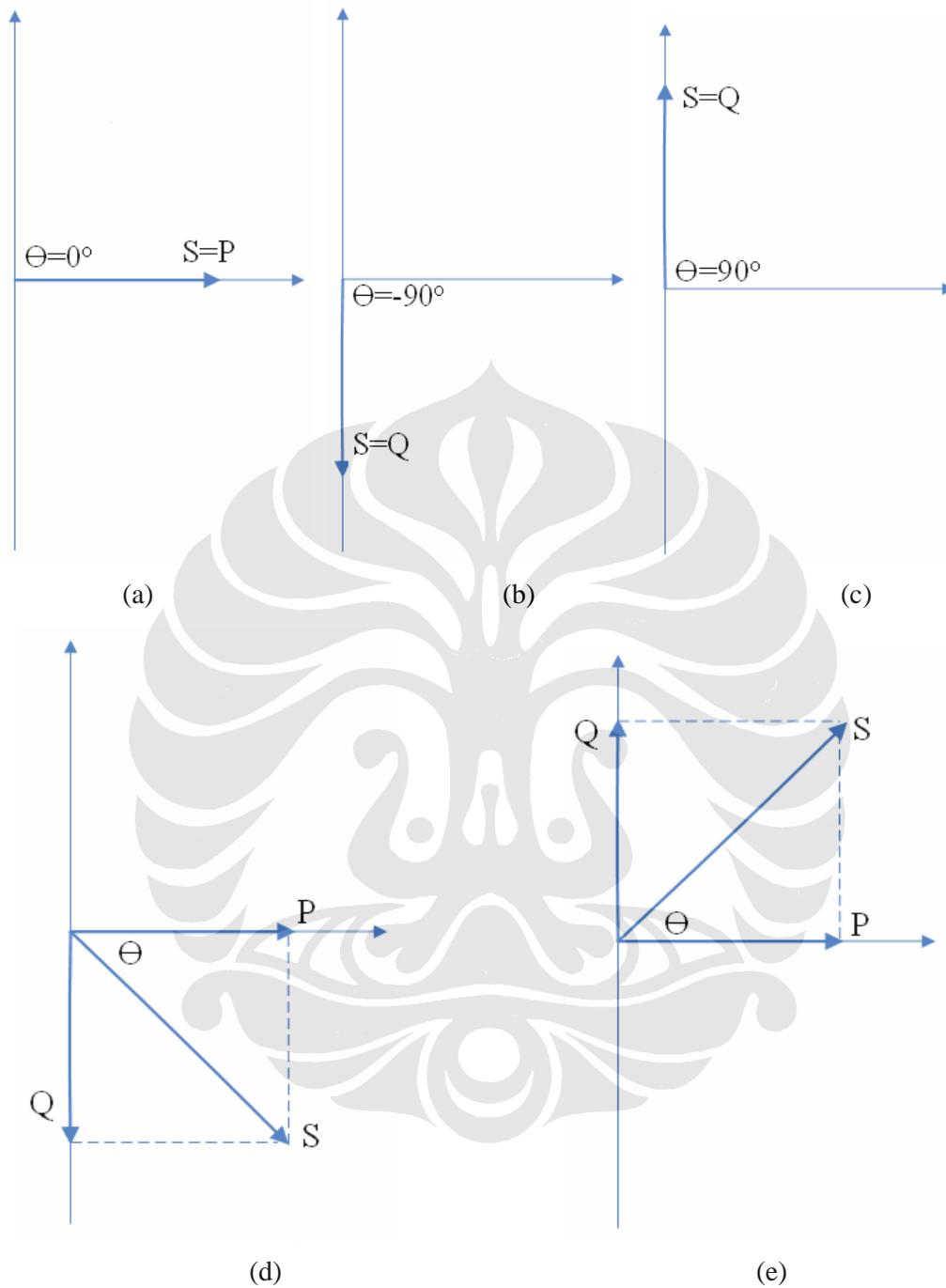
Dengan :

S = Daya total (satuan VA)

P = Daya nyata (satuan Watt)

Q = Daya reaktif (satuan VAR)

Menurut diagram fasor yang tergantung beban totalnya :



Gambar 2.7 Diagram fasor dalam grafik V-I untuk

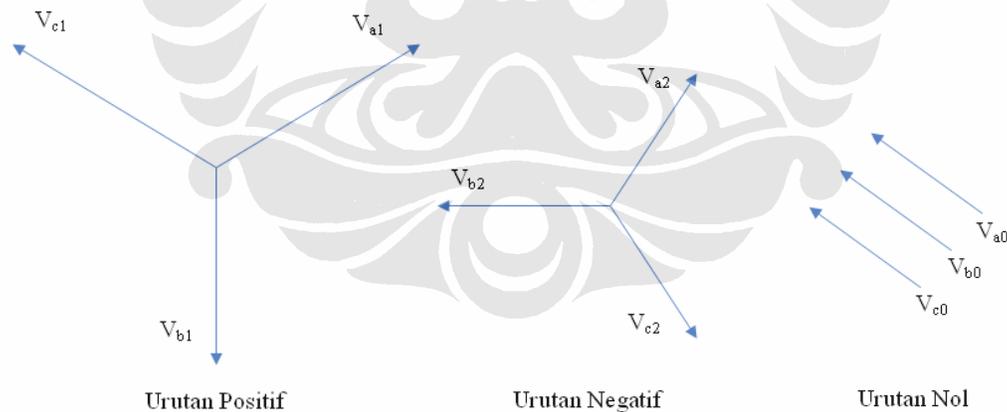
- Beban resistif murni
- Beban induktif murni
- Beban kapasitif murni
- Beban induktif tidak murni
- Beban kapasitif tidak murni

2.3 Komponen Simetris [2]

Suatu sistem tiga fasa pada kenyataannya, 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° , 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.

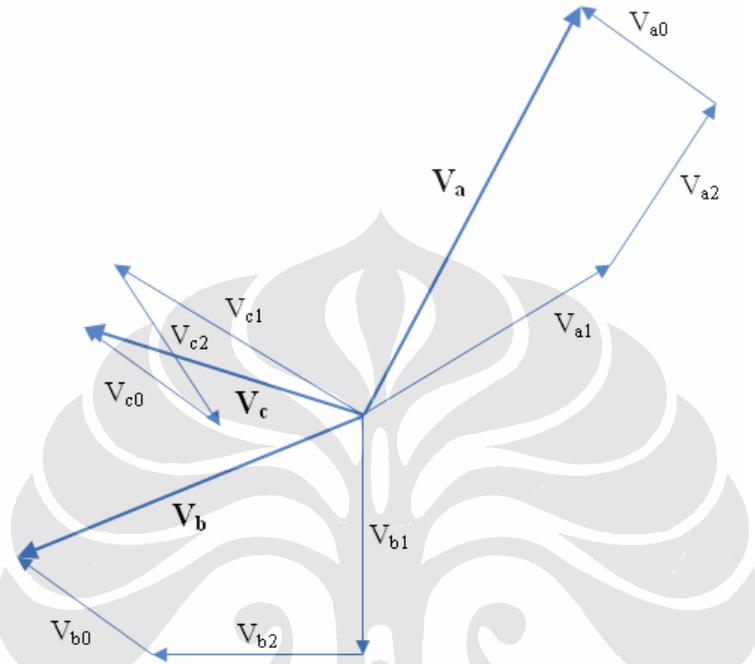
Notasi yang digunakan untuk komponen urutan tersebut biasanya diberikan subskrip 1, 2 dan 0 pada komponen arus dan tegangannya. Jadi, komponen urutan positif dari tegangan V_a , V_b dan V_c adalah V_{a1} , V_{b1} dan V_{c1} ; komponen urutan negatifnya V_{a2} , V_{b2} dan V_{c2} ; serta komponen urutan nolnya V_{a0} , V_{b0} dan V_{c0} . Komponen simetris tegangannya dapat dilihat pada gambar 2.8 berikut.



Gambar 2.8 Komponen simetris tegangan dari sistem yang tidak seimbang

Persamaan tegangan sistemnya dapat dituliskan dalam 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 2.9 Tegangan sistem sebagai penjumlahan dari komponen simetris

Seperti pada gambar 2.9 di atas, terdapat 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) di atas, 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 :

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

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

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

Dari persamaan di atas, hubungan antara komponen-komponen simetrisnya dan tegangan sistemnya dapat dituliskan sebagai berikut :

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

Komponen urutan nol tidak terdapat dalam sistem tenaga listrik apabila jumlah tegangan sistem tersebut sama dengan nol atau sistemnya seimbang. Dengan kata lain, 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 :

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

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

$$I_n = I_a + I_b + I_c = 3I_{a0} \quad (2.23)$$

2.4 Harmonik [2]

Harmonik pada sistem tenaga listrik adalah distorsi gelombang arus dan tegangan yang dapat membuat kabel, trafo dan motor listrik menjadi panas. Bila panas yang berlebih pada transformator terlalu besar, transformator dapat meledak atau terbakar.

Pada dasarnya, harmonik adalah pembentukan gelombang-gelombang dengan frekuensi lebih tinggi yang merupakan perkalian bilangan bulat dengan frekuensi dasarnya yang dapat ditulis dalam persamaan sebagai berikut :

$$f_h = h \cdot f_d \quad (2.24)$$

dengan :

- f_h = frekuensi harmonik (Hertz)
- h = orde harmonik (1, 2, 3, ...)
- f_d = frekuensi dasar (Hertz)

Adanya gelombang dengan frekuensi lebih tinggi ini mengakibatkan gelombang dasar berbentuk sinusoidal murni yang ada menjadi terdistorsi setelah kedua gelombang ini dijumlahkan.

Berdasarkan teorema *Fourier*, gelombang yang terdistorsi dapat diuraikan menjadi gelombang dasar dan beberapa gelombang berfrekuensi lebih tinggi dari frekuensi dasar yang dapat dituliskan dalam persamaan sebagai berikut :

$$Y(t) = Y_0 + \sum_{h=1}^{\infty} Y_h \sqrt{2} \sin(h2\pi f_t - \varphi_h) \quad (2.25)$$

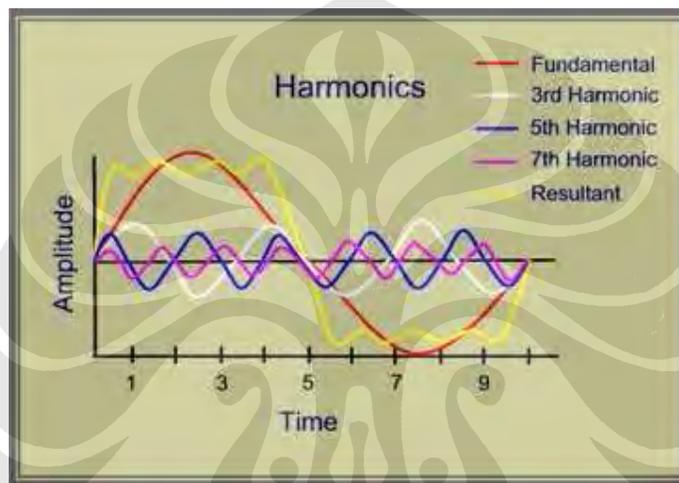
dengan :

- Y_0 = amplitudo komponen arus searah (biasanya nol)
- Y_h = nilai rms arus atau tegangan harmonik ke-h

f = frekuensi dasar (50 Hertz)

φ_h = sudut fasa harmonik ke-h

Saat setengah siklus positif dan negative pada gelombang arus atau tegangan memiliki bentuk yang identik, deret *Fourier*-nya hanya terdiri atas harmonik ganjil, yaitu harmonik dengan frekuensi kelipatan ganjil dari frekuensi dasarnya. Jadi, gelombang terdistorsi dapat digambarkan dari gelombang dasar dengan gelombang-gelombang yang berasal dari harmonik kelipatan ganjil seperti pada gambar 2.1 berikut.



Gambar 2.10 Gelombang terdistorsi akibat harmonik kelipatan ganjil

Pada umumnya, harmonik orde tinggi (sekitar orde-25 hingga orde-50) dapat diabaikan dalam analisa sistem tenaga listrik. Meskipun harmonik tersebut dapat menyebabkan interferensi terhadap peralatan elektronik berdaya rendah, namun tidak akan merusak sistem karena harmoniknya sangat kecil.

Beberapa hal yang perlu diketahui dalam mempelajari harmonik adalah :

1. Urutan fasa harmonik

Masing-masing komponen harmonik mempunyai urutan fasa yang berbeda tergantung dari ordenya. Harmonik pertama, keempat, ketujuh dan seterusnya merupakan urutan positif. Harmonik kedua, kelima, kedelapan dan seterusnya merupakan urutan negatif. Harmonik ketiga, keenam, kesembilan dan seterusnya merupakan urutan nol.

2. Harmonik ganjil kelipatan tiga (*Triplen harmonic*)

Triplen harmonic yang merupakan harmonik ganjil kelipatan tiga (orde 3, 9, 15 dan seterusnya) lebih berdampak dibanding orde harmonik ganjil lainnya, terutama pada sistem yang ditanahkan. *Triplen harmonic* menyebabkan arus yang mengalir melalui kabel netral menjadi lebih besar karena arus pada masing-masing fasanya tidak saling menghilangkan (mencapai tiga kali arus *triplen*-nya).

3. Persentase distorsi harmonik total (%THD)

Distorsi harmonik total merupakan persentase distorsi total suatu gelombang akibat harmonik terhadap gelombang dasarnya. Persamaan distorsi harmonik total adalah sebagai berikut :

$$\%THD = \frac{\sqrt{\sum_{h \neq 1}^{\infty} Y_{h \text{ rms}}^2}}{Y_1} \cdot 100\% \quad (2.26)$$

dengan : Y_h = nilai rms arus atau tegangan harmonik ke-h
 Y_1 = nilai rms arus atau tegangan frekuensi dasar

4. Penyebab harmonik

Beban-belan komersial, industri dan rumah tangga tidak hanya terdiri dari beban linier saja, tetapi juga beban non linier seperti televisi, komputer, *microwave oven*, lampu fluoresen dengan balas elektronik, motor-motor listrik yang dikendalikan oleh konverter dan sebagainya.

Beban linier adalah beban yang menyebabkan bentuk gelombang keluarannya sama dengan bentuk gelombang masukan, dengan arus yang mengalir sebanding terhadap tegangan. Sedangkan untuk beban non linier, arus yang mengalir tidak sebanding dengan perubahan tegangan akibat gelombang masukannya sehingga gelombang keluarannya mengalami distorsi.

2.5 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 besaran listrik ini tidak memerlukan ketrampilan khusus, tetapi diperlukan suatu prosedur kerja yang diikuti dalam pelaksanaan pengukuran. Prosedur ini antara lain :

1. Prosedur keselamatan kerja, dengan mengenakan pakaian yang melindungi selama dilakukan proses pengukuran.
2. Merangkai alat pengukuran dengan benar, misalnya alat ukur arus (Amperemeter) secara seri, alat ukur tegangan (Voltmeter) secara paralel dan alat ukur daya (Wattmeter) secara seri dan paralel.
3. Melakukan kalibrasi alat sebelum digunakan serta menyesuaikan *rating* alat sesuai dengan besarnya besaran listrik yang didapat.
4. Melakukan pembacaan dengan baik, yaitu membaca alat dengan sudut pandangan yang tepat (tegak lurus dengan angka), serta membaca angka yang tertera setelah kondisi berhenti beresilasi (*steady*).
5. Mengalikan angka yang tertera dengan pengali yang sesuai (bila ada) dan memberi satuan yang sesuai dengan petunjuk penggunaan alat ukur.

Pada skripsi ini, 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,

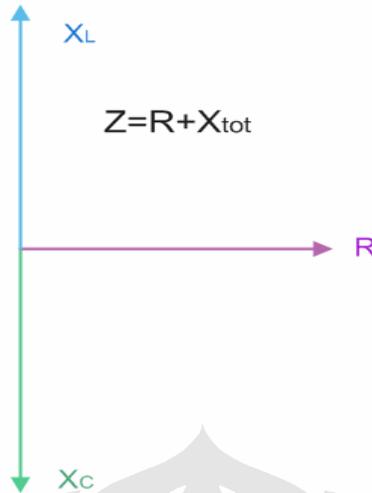
Voltmeter dapat digunakan bergantian tanpa memutus rangkaian saat pemindahan alat ukur.

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 ($\text{pf} / \cos\phi$). 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 Ω (ohm) yang memiliki sudut fasor 0° . 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° . 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° . Reaktansi induktif dan reaktansi kapasitif saling meniadakan dengan nilai selisih merupakan komponen reaktif dari beban total menurut diagram fasor di bawah ini :



Gambar 2.11 Diagram fasor untuk beban R, L dan C [3]

Apabila suatu tegangan dicatu kepada ketiga komponen beban ini, maka akan dihasilkan arus yang mempunyai karakteristik berlainan, yaitu [3]:

1. Arus pada beban hambatan (*resistance*) murni

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

2. 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° terhadap tegangan.

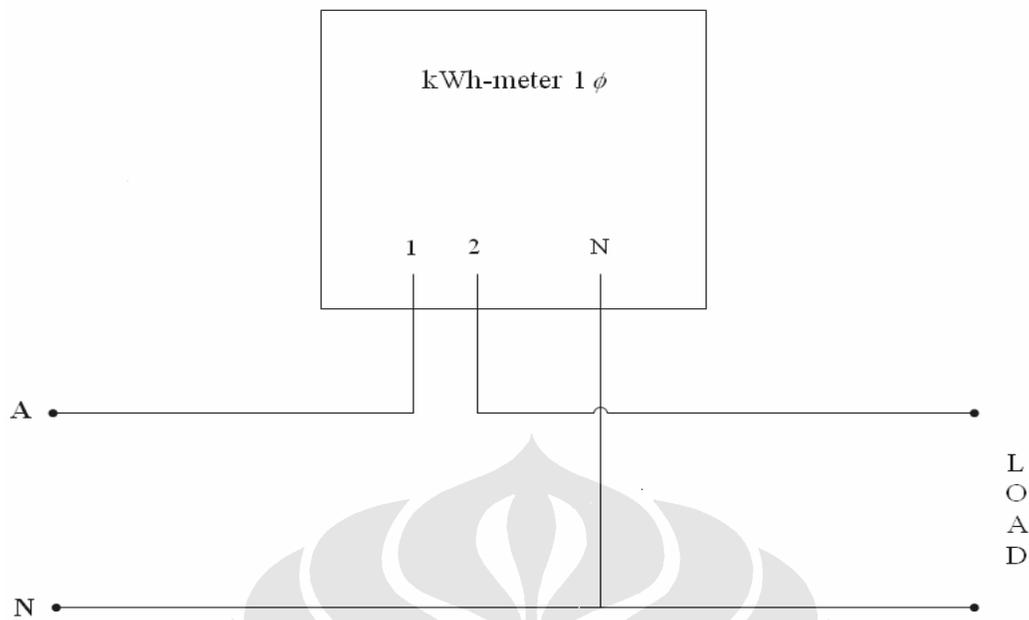
3. Arus pada beban kapasitif murni

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

dimana terlihat sudut arus mendahului (leading) 90° terhadap tegangan.

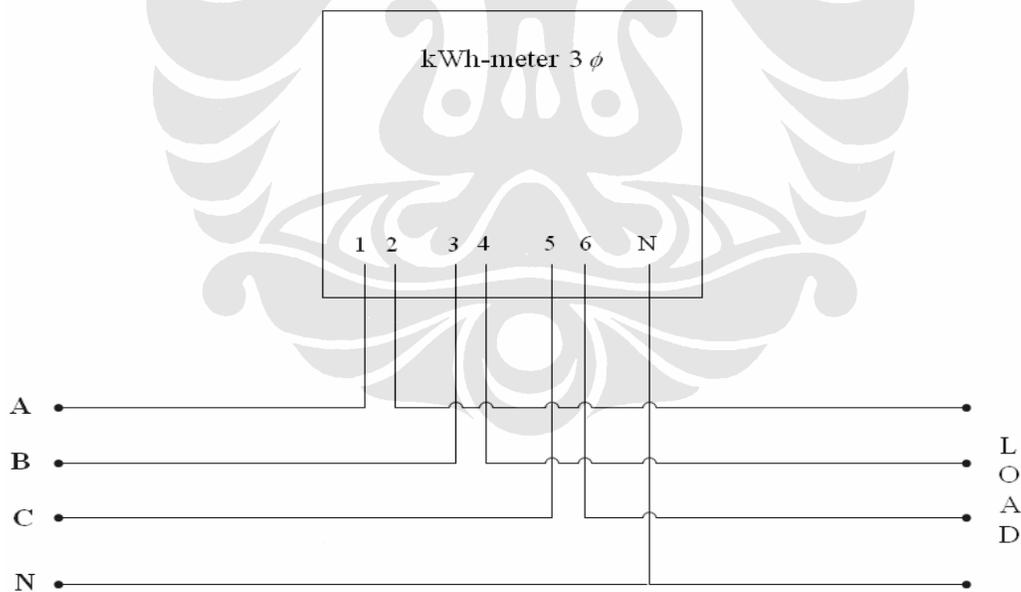
Berbagai kemungkinan diagram fasor untuk beban yang bervariasi dapat dilihat pada gambar 2.7 serta terlihat bahwa nilai daya nyata (P) tidak pernah negatif.

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 berikut :



Gambar 2.12 Rangkaian kWh-meter satu fasa

Dan rangkaian untuk kWh-meter tiga fasa :



Gambar 2.13 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.



Gambar 2.14 kWh-meter

- (a) 1(satu) fasa
- (b) 3(tiga) fasa

Pada gambar 2.10, 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.

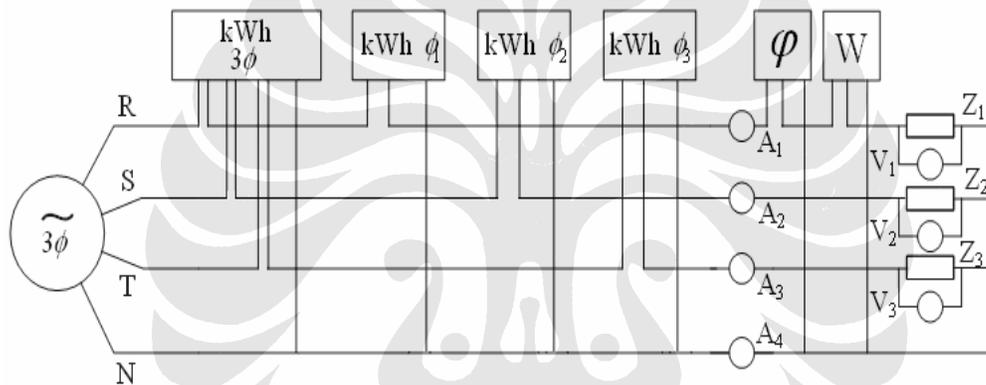
KWh-meter satu fasa digunakan untuk mencatat pemakaian listrik pada konsumen perumahan dengan tegangan 220 Volt, sedangkan kWh-meter tiga fasa digunakan pada konsumen industri yang menggunakan jaringan listrik tiga fasa. kWh-meter tiga fasa mencatat seluruh penggunaan energi listrik pada jaringan tiga 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 Pengujian

Pengujian dilakukan di Laboratorium Tegangan Tinggi dan Pengukuran Listrik (TTPL) Fakultas Teknik Universitas Indonesia dengan rangkaian pengujian sebagai berikut :

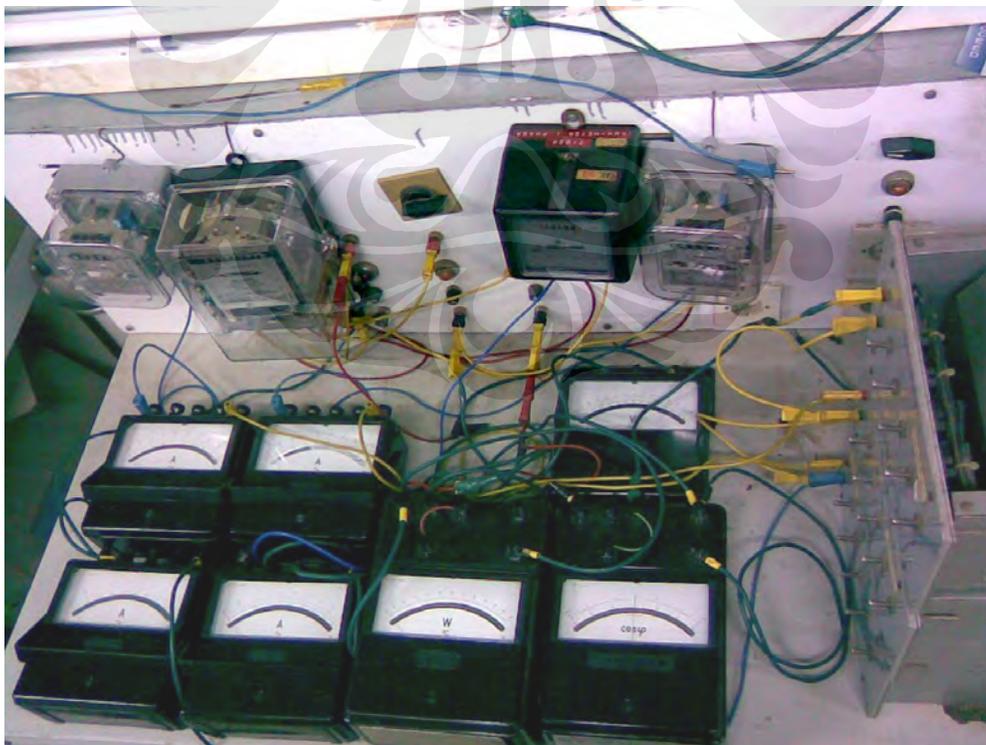


Gambar 3.1 Rangkaian pengujian

Catu daya yang digunakan adalah jaringan listrik AC tiga fasa 4 kawat dari PLN yang dirangkai hubung bintang. Tegangan yang didapat tidak mencapai 220 Volt, tetapi berkisar 206-216 Volt. 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. Berikut gambar rangkaian pengujiannya :



Gambar 3.2 Rangkaian pengujian tampak samping



Gambar 3.3 Rangkaian pengujian tampak atas



Gambar 3.4 Beban variabel yang digunakan

Keempat kWh-meter sebelum digunakan dalam pengujian lebih dahulu disamakan hasil pengukurannya, berikut hasilnya pada masing-masing kWh-meter.

1. kWh-meter satu fasa
 - a. kWh-meter satu fasa untuk fasa 1

Digunakan merk AEG seperti gambar 3.6 di bawah.

kWh-meter ini dibebani dengan beban resistif berupa lampu pijar dengan total daya sebesar 1120 Watt (*name plate*) selama 1(satu) jam. Berikut data pengujiannya :

$$\begin{aligned} \cos \varphi &= 1 \\ P_{\text{terukur pada Wattmeter}} &= 1012 \text{ Watt} \\ I &= 4,81 \text{ Ampere} \\ V &= 210 \text{ Volt} \end{aligned}$$

Dengan hasil pengukuran pada kWh-meter satu fasa 0,99 kWh, didapat *error* sebesar 2,17%



Gambar 3.6 KWh-meter satu fasa untuk fasa 1

b. KWh-meter satu fasa untuk fasa 2

Digunakan buatan Indonesia merk Schlumberger tahun 2002 jenis M2XS4V3 kelas 2 seperti pada gambar 3.7 di bawah.

KWh-meter ini dibebani dengan beban resistif berupa lampu pijar dengan total daya sebesar 1120 Watt (*name plate*) selama 1(satu) jam. Berikut data pengujiannya :

$$\cos \varphi = 1$$

$$P_{\text{terukur pada Wattmeter}} = 1008 \text{ Watt}$$

$$I = 4,80 \text{ Ampere}$$

$$V = 210 \text{ Volt}$$

Dengan hasil pengukuran pada kWh-meter satu fasa 0,98 kWh, didapat *error* sebesar 2,78%.



Gambar 3.7 KWh-meter satu fasa untuk fasa 2

c. KWh-meter satu fasa untuk fasa 3

Digunakan buatan Indonesia merk Actaris oleh PT. Mecoindo tahun 2002 jenis M2XS4V3 kelas 2 seperti pada gambar 3.8 di bawah.

KWh-meter ini dibebani dengan beban resistif berupa lampu pijar dengan total daya sebesar 1120 Watt (*name plate*) selama 1(satu) jam. Berikut data pengujiannya :

$$\cos \varphi = 1$$

$$P_{\text{terukur pada Wattmeter}} = 1004 \text{ Watt}$$

$$I = 4,79 \text{ Ampere}$$

$$V = 208 \text{ Volt}$$

Dengan hasil pengukuran pada kWh-meter satu fasa 1,00 kWh, didapat *error* sebesar 0,39%.



Gambar 3.8 KWh-meter satu fasa untuk fasa 3

2. KWh-meter tiga fasa

KWh-meter tiga fasa yang digunakan buatan Indonesia oleh PT. Limaputra Vilindo tahun 1997 tipe LPV 530520 kelas 2.0 untuk tegangan AC tiga fasa, 4 kawat seperti pada gambar di bawah.

Sama seperti halnya kWh-meter satu fasa, maka pada kWh-meter tiga fasa juga dilakukan hal yang sama dengan membebani beban tiga fasa hubung bintang seimbang dengan masing-masing fasa diberi beban resistif variabel 1.045 Watt / 220 Volt (*name plate*). Pembebanan dilakukan selama 1(satu) jam dengan data berikut:

$$\cos \varphi = 1$$

$$P_{\text{terukur pada Wattmeter}} = 930 \text{ Watt}$$

$$I = 4,45 \text{ Ampere}$$

$$V = 210 \text{ Volt}$$

Jumlah pemakaian energi untuk ketiga fasanya selama satu jam berdasarkan hasil pengukuran Wattmeter adalah $3 \times 930 \text{ Watt} = 2.790 \text{ Watt}$. Tetapi hasil pengukuran

pada kWh-meter tiga fasa menunjukkan pemakaian energi sebesar 2,71 kWh. Maka terdapat *error* sebesar 2,87%.



Gambar 3.5 kWh-meter tiga fasa

Kemudian, arus untuk tiap fasa dan arus netral diukur dengan menggunakan empat buah amperemeter AC. Pada gambar 3.1, fasa 1 dihubungkan dengan $\cos \varphi$ -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 $\cos \varphi$ -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 siang hari pk 14.00. Durasi pengujian tiap data adalah 30 menit dan 1 jam untuk data-data tertentu.

Jeda pengambilan tiap data adalah lebih kurang 3 menit, sehingga keadaan rangkaian untuk setiap data yang diambil berurutan tidak banyak berbeda.

3.2 Hasil pengujian

Data pengujian yang diambil menggunakan rangkaian yang sama, yaitu rangkaian pada gambar 3.1. 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 atau kapasitif).

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 Beban Resistif

No.	Load ₁ (W)	Load ₂ (W)	Load ₃ (W)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	I ₃ (A)	I _N (A)	V _{φ1} (V)	V _{φ2} (V)	V _{φ3} (V)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	P ₃ (W)	cos φ ₁	W ₁ (kWh)	W ₂ (kWh)	W ₃ (kWh)	Σ W _{1φ} (kWh)	W _{3φ} (kWh)
1.	1045	1045	1045	4,49	4,49	4,49	0,17	210	208	211	930	925	930	1	0,473	0,469	0,480	1,422	1,36
2.	1045	1025	1045	4,48	4,36	4,45	0,26	208	207	210	925	905	930	1	0,465	0,446	0,472	1,383	1,35
3.	1045	990	1045	4,47	4,21	4,48	0,31	209	208	210	930	880	930	1	0,473	0,439	0,478	1,390	1,27
4.	1045	990	990	4,48	4,28	4,28	0,26	210	209	211	933	880	880	1	0,464	0,448	0,453	1,365	1,32
5.	1045	935	990	4,46	3,96	4,22	0,51	210	209	210	928	842	880	1	0,462	0,412	0,444	1,318	1,29
6.	1045	935	935	4,46	3,98	3,97	0,56	210	208	209	928	842	842	1	0,460	0,416	0,415	1,291	1,25
7.	1045	825	935	4,46	3,52	3,94	0,93	210	209	209	917	747	842	1	0,458	0,365	0,408	1,231	1,21
8.	1045	605	825	4,44	2,08	3,49	1,67	209	209	208	915	555	747	1	0,464	0,271	0,371	1,106	1,11
9.	1045	220	550	4,42	0,80	2,52	3,08	209	209	208	903	202	502	1	0,452	0,100	0,243	0,795	0,81
10.	1045	-	550	4,44	-	2,32	3,87	209	208	207	912	-	502	1	0,456	-	0,244	0,700	0,74
11.	1045	-	-	4,44	-	-	4,44	209	209	209	919	-	-	1	0,464	-	-	0,464	0,44

Catatan :

Beberapa data untuk beban resistif, diambil kembali dengan durasi pengujian 1(satu) jam. Berikut datanya :

Tabel 3.2 Data Pengujian untuk Beban Resistif (lanjutan)

No.	Load ₁ (W)	Load ₂ (W)	Load ₃ (W)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	I ₃ (A)	I _N (A)	V _{φ1} (V)	V _{φ2} (V)	V _{φ3} (V)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	P ₃ (W)	cos φ ₁	W ₁ (kWh)	W ₂ (kWh)	W ₃ (kWh)	Σ W _{1φ} (kWh)	W _{3φ} (kWh)
1.	1045	1045	1045	4,54	4,49	4,50	0,18	212	210	211	958	955	960	1	0,935	0,928	0,937	2.8	2,76
2.	1045	1025	1045	4,48	4,36	4,42	0,27	210	208	208	935	917	940	1	0,928	0,903	0,932	2.763	2,73
3.	1045	935	935	4,50	3,95	3,98	0,63	211	208	210	942	842	842	1	0,938	0,825	0,833	2.596	2,49
4.	1045	605	825	4,48	2,58	3,51	1,71	210	209	208	938	555	747	1	0,949	0,559	0,767	2.275	2,21
5.	1045	220	550	4,41	0,79	2,32	3,06	208	209	208	915	198	496	1	0,924	0,198	0,500	1.622	1,65
6.	1045	-	550	4,41	-	2,32	3,70	208	209	208	910	-	495	1	0,916	-	0,482	1.398	1,42
7.	1045	-	-	4,42	-	-	4,42	209	211	209	910	-	-	1	0,903	-	-	0.903	0,91

Tabel 3.3 Data Pengujian untuk Beban Induktif

No.	Load ₁ (W)	Load ₂ (W)	Load ₃ (W)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	I ₃ (A)	I _N (A)	V ϕ 1 (V)	V ϕ 2 (V)	V ϕ 3 (V)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	P ₃ (W)	cos ϕ 1	cos ϕ 2	cos ϕ 3	W ₁ (kWh)	W ₂ (kWh)	W ₃ (kWh)	Σ W1 ϕ (kWh)	W 3 ϕ (kWh)
1.	1045	1045	1045	4,77	4,75	4,75	0,50	214	213	214	10	11	11	-0,1	-0,1	-0,1	0,034	0,031	0,035	0,100	0,11
2.	1045	990	1045	4,74	4,46	4,72	0,60	210	210	211	10	10	11	-0,1	-0,1	-0,1	0,032	0,030	0,033	0,095	0,10
3.	1045	990	990	4,75	4,45	4,55	0,60	211	211	212	10	10	10	-0,1	-0,1	-0,1	0,033	0,030	0,032	0,095	0,10
4.	1045	935	990	4,75	4,24	4,52	0,75	211	210	212	11	9	10	-0,1	-0,1	-0,1	0,034	0,027	0,032	0,093	0,09
5.	1045	935	935	4,75	4,21	4,25	0,75	210	208	211	11	9	9	-0,1	-0,1	-0,1	0,035	0,025	0,024	0,084	0,09
6.	1045	825	935	4,80	3,80	4,28	1,10	212	210	213	10	9	9	-0,1	-0,1	-0,1	0,033	0,020	0,024	0,077	0,09
7.	1045	605	825	4,75	2,70	3,72	1,90	212	209	212	13	9	9	-0,1	-0,13	-0,1	0,035	0,018	0,021	0,074	0,09
8.	1045	220	550	4,75	0,80	2,95	3,43	211	208	211	13	1	2	-0,1	-0,35	-0,13	0,035	0,005	0,018	0,058	0,07
9.	1045	-	550	4,72	-	2,92	4,24	209	208	211	11	-	2	-0,1	1	-0,13	0,032	-	0,018	0,050	0,07
10.	1045	-	-	4,62	-	-	4,65	214	211	215	16	-	-	-0,1	1	1	0,033	-	-	0,033	0,04

Catatan :

cos ϕ negatif (-), menunjukkan keadaan arus *lag* terhadap tegangan.

Tabel 3.4 Data Pengujian untuk Beban Kapasitif

No.	Load ₁ (W)	Load ₂ (W)	Load ₃ (W)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	I ₃ (A)	I _N (A)	V ϕ 1 (V)	V ϕ 2 (V)	V ϕ 3 (V)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	P ₃ (W)	cos ϕ 1	cos ϕ 2	cos ϕ 3	W ₁ (kWh)	W ₂ (kWh)	W ₃ (kWh)	Σ W 1 ϕ (kWh)	W 3 ϕ (kWh)
1.	1045	1045	1045	4,62	4,55	4,60	0,85	213	210	212	52	51	51	+0	+0	+0	0,003	0,003	0,003	0,009	-
2.	1045	990	1045	4,66	4,40	4,67	1,05	214	212	214	50	49	51	+0	+0	+0	0,003	0,003	0,003	0,009	-
3.	1045	990	990	4,65	4,35	4,38	1,16	212	210	212	50	49	49	+0	+0	+0	0,002	0,002	0,003	0,007	-
4.	1045	935	990	4,65	4,10	4,40	1,25	212	210	212	50	47	49	+0	+0	+0	0,002	0,002	0,003	0,007	-
5.	1045	935	935	4,68	4,05	4,08	1,36	210	208	210	49	47	48	+0	+0	+0	0,002	0,002	0,002	0,006	-
6.	1045	825	935	4,65	3,60	4,15	1,70	212	210	212	50	40	48	+0	+0,05	+0	0,002	0,002	0,002	0,006	-
7.	1045	605	825	4,65	2,65	3,65	2,10	212	209	212	50	29	40	+0	+0,12	+0,05	0,003	0,002	0,002	0,007	-
8.	1045	220	550	4,65	1,00	2,42	3,37	212	210	211	51	9	25	+0	+0,34	+0,14	0,002	0,001	0,002	0,005	-
9.	1045	-	550	4,66	-	2,42	4,14	212	210	211	52	-	25	+0	1	+0,14	0,003	-	0,002	0,005	-
10.	1045	-	-	4,72	-	-	4,73	214	212	212	52	-	-	+0	1	1	0,003	-	-	0,003	-

Catatan:

Pergerakan putar lempeng kWh-meter tiga fasa sangat lambat sehingga tidak terdeteksi perubahan pada angka penunjuk, sehingga dianggap tidak ada perubahan.

cos ϕ positif (+), menunjukkan keadaan arus *lead* terhadap tegangan.

Tabel 3.5 Data Pengujian untuk Beban Campuran

No.	Load ₁ (W)	Load ₂ (W)	Load ₃ (W)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	I ₃ (A)	I _N (A)	V ϕ 1 (V)	V ϕ 2 (V)	V ϕ 3 (V)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	P ₃ (W)	cos ϕ 1	cos ϕ 2	cos ϕ 3	W ₁ (kWh)	W ₂ (kWh)	W ₃ (kWh)	Σ W 1 ϕ (kWh)	W 3 ϕ (kWh)
1.	1045	1045	1045	4,47	4,42	4,46	0,27	210	208	209	932	930	932	1	1	1	0,465	0,467	0,468	1,400	1,37
2.	1045	935+ j110	1045	4,49	4,00	4,42	0,67	210	208	208	932	852	932	1	1	1	0,470	0,420	0,476	1,366	1,32
3.	1045	825+ J220	1045	4,45	3,68	4,40	1,29	209	207	208	922	758	928	1	-0,99	1	0,464	0,369	0,460	1,293	1,25
4.	1045	715+ j330	825+ j220	4,46	3,42	3,68	1,71	208	207	206	917	649	741	1	-0,97	1	0,459	0,328	0,373	1,334	1,16
5.	1045	605+ j440	825+ j220	4,56	3,39	3,72	2,31	214	210	210	961	564	758	1	-0,92	1	0,469	0,285	0,380	1,160	1,14
6.	1045	605+ j440	605+ j440	4,52	3,41	3,35	2,63	212	210	210	940	566	568	1	-0,82	1	0,470	0,287	0,286	1,134	1,04
7.	1045	825- j220	1045	4,50	3,65	4,45	1,46	211	209	208	942	768	942	1	+0,96	1	0,475	0,379	0,480	1,043	1,30

Catatan :

cos ϕ negatif (-), menunjukkan keadaan arus *lag* terhadap tegangan.

cos ϕ positif (+), menunjukkan keadaan arus *lead* terhadap tegangan.

BAB IV

ANALISIS HASIL

PENGUKURAN

Pada bagian ini akan dilakukan analisa perbedaan hasil pengukuran yang didapat dengan menjumlahkan hasil pengukuran menggunakan kWh-meter satu fasa untuk ketiga fasanya dengan hasil pengukuran yang didapat dari pengukuran energi terpakai menggunakan kWh-meter tiga fasa secara langsung. Nilai keduanya mempunyai selisih yang dikaitkan dengan ketidakseimbangan beban yang dicatu pada sistem tiga fasa. Berikut grafik tersebut berdasarkan data pengujian pada tabel 3.1, tabel 3.2 tabel 3.3 dan tabel 3.5.

Pada data pengujian, ketidakseimbangan ditunjukkan oleh arus netral. Suatu sistem tiga fasa yang dibebani seimbang ideal tidak akan memiliki arus netral, atau arus netralnya sama dengan nol sesuai persamaan (2.4). Semakin besar ketidakseimbangan beban, semakin besar arus netralnya. Sebagai contoh, pada tabel 3.1, nilai arus netral terukur bertambah dengan meningkatnya ketidakseimbang beban yang diberikan. Nilai ketidakseimbangan ini dihitung dengan membandingkan selisih terbesar dari daya beban antara dua buah fasa. Hal ini ditunjukkan dari data ketiga dan data keempat serta data kelima dan data keenam yang memiliki selisih beban terbesar dan terkecil yang sama dengan nilai arus netral yang mendekati. Jadi, ketidakseimbangan ditentukan berdasarkan selisih beban antar fasa yang terbesar. Nilai ketidakseimbangan berkisar dari angka 0% sampai 100%. Ketidakseimbangan sebesar 0% jika seluruh beban sama nilainya, sedangkan ketidakseimbangan 100% jika ada salah satu atau dua fasa yang tidak berbeban dan fasa yang lain memiliki suatu nilai.

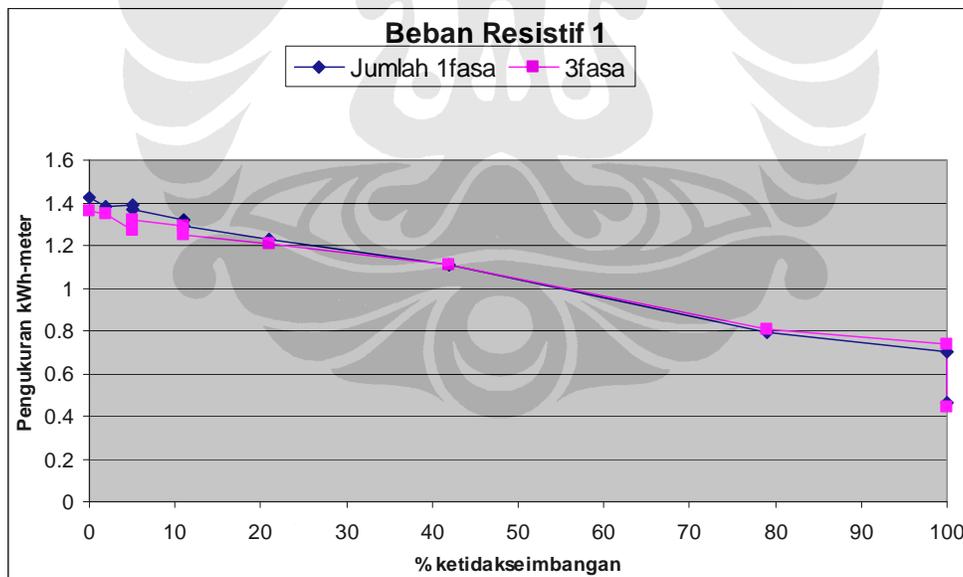
Beban Resistif

Pengujian dengan beban resistif murni dilakukan dua kali, yaitu dengan melakukan variasi sebanyak 11 data selama masing-masing 30 menit; dan melakukan variasi pada 7 buah data tertentu selama 60 menit untuk memberikan hasil pengujian yang lebih baik. Pengujian pada satu tabel dilakukan sekaligus berurutan, sedangkan pengujian pada tabel lain dilakukan pada hari yang lain.

1. Beban resistif 1

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

No.	% ketidakseimbangan	$\sum kWh_{1\phi}$	$kWh_{3\phi}$
1.	0	1.422	1.360
2.	2	1.383	1.350
3.	5	1.390	1.270
4.	5	1.365	1.320
5.	11	1.318	1.290
6.	11	1.291	1.250
7.	21	1.231	1.210
8.	42	1.106	1.110
9.	79	0.795	0.810
10.	100	0.700	0.740
11.	100	0.464	0.440



Gambar 4.1 Grafik perbandingan pengukuran kWh-meter 1 dan 3 fasa untuk beban resistif 1

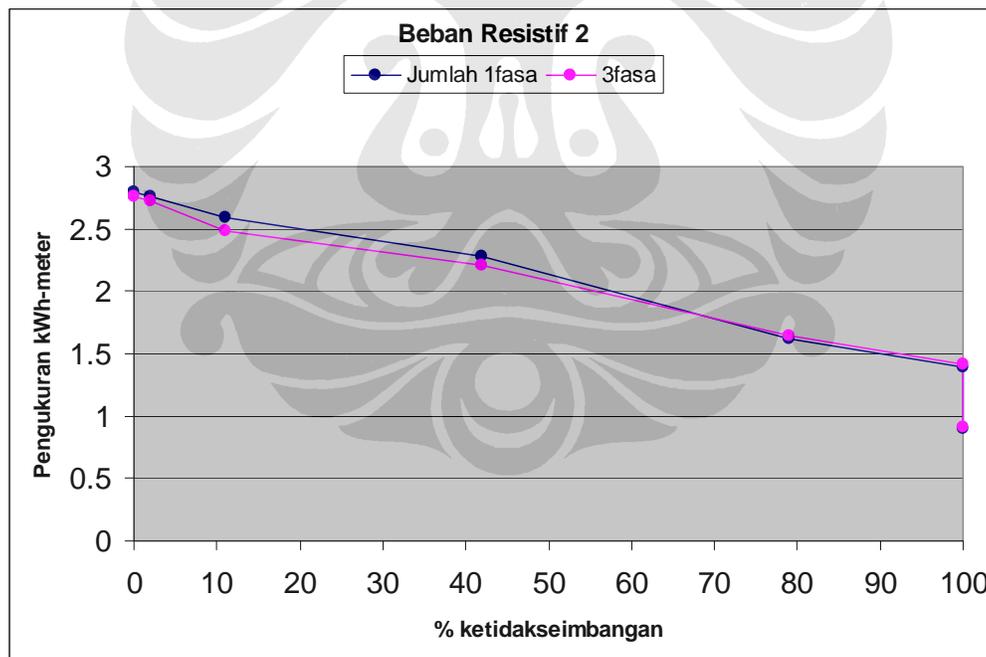
Grafik hasil pengukuran di atas menunjukkan bahwa pada tingkat ketidakseimbangan rendah, hasil pengukuran dengan menggunakan kWh-meter tiga fasa lebih rendah dibanding hasil pengukuran langsung menggunakan kWh-meter tiga fasa. Kesamaan hasil pengukuran dengan

menggunakan kWh-meter satu fasa dan kWh-meter tiga fasa terjadi pada kisaran persentase ketidakseimbangan 40% (antara data ketujuh dan data kedelapan). Data kesebelas tampak menyimpang dari keadaan umumnya.

2. Beban Resistif 2

Tabel 4.2 Perbandingan hasil pengukuran kWh-meter 1 dan 3 fasa untuk beban resistif 2

No.	% ketidakseimbangan	$\sum kWh_{1\phi}$	$kWh_{3\phi}$
1.	0	2.800	2.760
2.	2	2.763	2.730
3.	11	2.596	2.490
4.	42	2.275	2.210
5.	79	1.622	1.650
6.	100	1.398	1.420
7.	100	0.903	0.910



Gambar 4.2 Grafik perbandingan pengukuran kWh-meter 1 dan 3 fasa untuk beban resistif 2

Grafik hasil pengukuran di atas juga menunjukkan bahwa pada tingkat ketidakseimbangan rendah, hasil pengukuran dengan menggunakan kWh-meter satu fasa lebih rendah dibanding hasil pengukuran langsung

menggunakan kWh-meter tiga fasa. Kesamaan hasil pengukuran dengan menggunakan kWh-meter satu fasa dan kWh-meter tiga fasa terjadi pada kisaran persentase ketidakseimbangan 70% (antara data kelima dan data keenam).

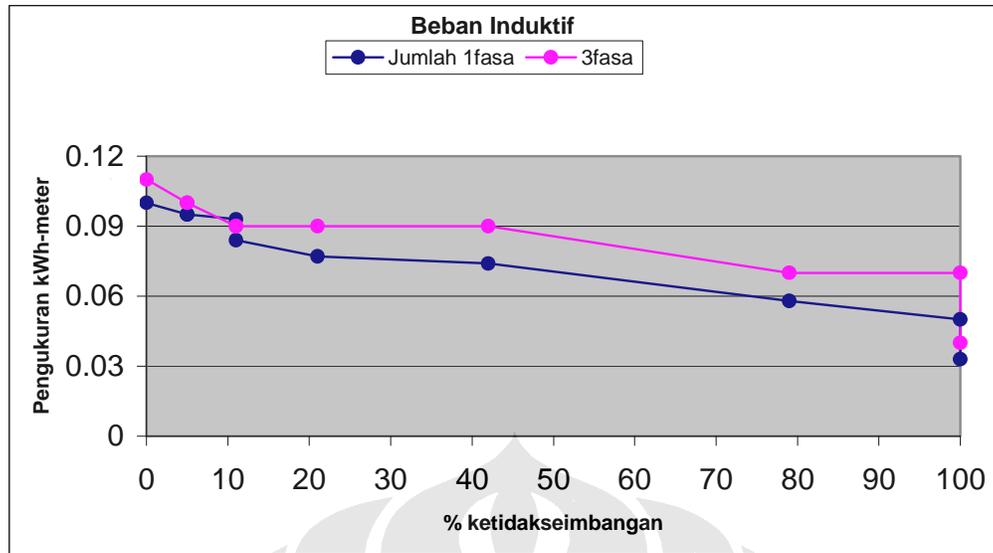
Selain berpengaruh terhadap perbedaan hasil pengukuran dengan menggunakan kWh-meter satu fasa dan kWh-meter tiga fasa, ketidakseimbangan beban juga berpengaruh terhadap pemanasan transformator karena meningkatnya arus netral. Selain itu, besarnya arus netral akan memberikan masalah isolasi, terutama pada kawat netral.

Beban Induktif

Pengujian dilakukan dengan variasi beban induktif murni sebanyak 10 buah data dengan durasi pengujian tiap data 30 menit.

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

No.	% ketidakseimbangan	$\sum kWh1\phi$	$kWh3\phi$
1.	0	0.100	0.110
2.	5	0.095	0.100
3.	5	0.095	0.100
4.	11	0.093	0.090
5.	11	0.084	0.090
6.	21	0.077	0.090
7.	42	0.074	0.090
8.	79	0.058	0.070
9.	100	0.050	0.070
10.	100	0.033	0.040



Gambar 4.3 Grafik perbandingan pengukuran kWh-meter 1 dan 3 fasa 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.

Beban Kapasitif

Pada proses pengujian, 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. Dengan demikian, maka data pengukuran untuk beban kapasitif diberikan hanya sebagai lampiran, tetapi tidak dianalisis.

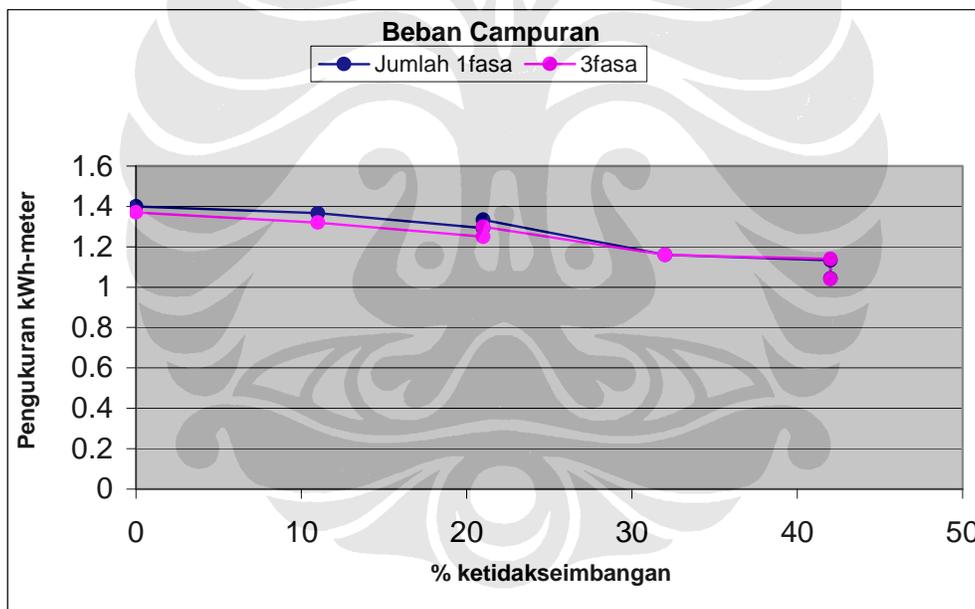
Beban Campuran

Pengujian dilakukan dengan memberikan beban tiga fasa dengan nilai 1045 VA. Data pertama merupakan beban resistif. Kemudian dilakukan variasi dengan mengganti sebagian nilai daya nyata menjadi daya reaktif dengan mengurangi beban resistif dan mengganti nilai beban tersebut dengan beban reaktif (kapasitor / induktor) yang nilai dayanya sama dengan nilai daya beban resistif yang dikurangi. Persentase

ketidakseimbangan pada bagian ini dihitung berdasarkan porsi daya reaktifnya dibanding dengan 1045 VA.

Tabel 4.4 Perbandingan hasil pengukuran kWh-meter 1 dan 3 fasa untuk beban campuran

No.	% ketidakseimbangan	$\sum kWh1\phi$	$kWh3\phi$
1.	0	1.400	1.370
2.	11	1.366	1.320
3.	21	1.293	1.250
4.	21	1.334	1.300
5.	32	1.160	1.160
6.	42	1.134	1.140
7.	42	1.043	1.040



Gambar 4.4 Grafik perbandingan pengukuran kWh-meter 1 dan 3 fasa untuk beban campuran

Grafik hasil pengukuran dengan beban campuran menunjukkan bahwa pada tingkat ketidakseimbangan rendah, hasil pengukuran dengan menggunakan kWh-meter satu fasa lebih rendah dibanding hasil pengukuran langsung menggunakan kWh-meter tiga fasa. Kesamaan hasil pengukuran dengan menggunakan kWh-meter satu fasa dan kWh-meter tiga fasa terjadi pada nilai persentase ketidakseimbangan 32% (data keempat).

Pada pengujian dengan beban resistif dan beban campuran (juga menggunakan beban resistif), terlihat karakteristik bahwa hasil pengukuran dengan menggunakan kWh-meter tiga fasa cenderung lebih rendah daripada hasil pengukuran dengan menggunakan kWh-meter satu fasa pada pembebanan simetris; dan bergerak seiring meningkatnya ketidakseimbangan menuju keadaan sebaliknya, yaitu hasil pengukuran dengan menggunakan kWh-meter tiga fasa lebih besar dari hasil pengukuran kWh-meter satu fasa.

Pada pergerakan grafik hasil pengukuran dengan menggunakan kWh-meter tiga fasa dan kWh-meter satu fasa ini, terjadi titik potong keduanya dimana hasil pengukuran dengan menggunakan kWh-meter satu fasa dan kWh-meter tiga fasa sama nilainya. Pada pengujian dengan beban resistif selama 30 menit (Tabel 4.1), titik potong tersebut terjadi pada nilai ketidakseimbangan $\approx 40\%$. Pada pengujian dengan beban resistif selama 60 menit (Tabel 4.2), titik potong tersebut terjadi pada nilai ketidakseimbangan $\approx 70\%$. Pada pengujian dengan beban campuran selama 30 menit (Tabel 4.3), titik potong tersebut terjadi pada nilai ketidakseimbangan $\approx 32\%$. Rata-rata secara keseluruhan yang didapat dengan memberikan bobot 2x pada pengujian beban resistif pada tabel 4.2 karena durasi pengujian 2x durasi pengujian yang lain, didapat :

$$\begin{aligned}\bar{x} &= \frac{40\% + (2 \times 70\%) + 32\%}{1 + 2 + 1} \\ &= \frac{40\% + 140\% + 32\%}{4} \\ &= \frac{212\%}{4} \\ &= 53\%\end{aligned}$$

rata-rata keseluruhan titik potong dimana hasil pengukuran dengan menggunakan kWh-meter satu fasa dan kWh-meter tiga fasa sama adalah pada nilai ketidakseimbangan 53%.

Sedangkan nilai rata-rata untuk data pengukuran pada tabel 4.1 dan 4.2 (resistif murni saja) sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
\bar{x} &= \frac{40\% + (2 \times 70\%)}{3} \\
&= \frac{40\% + 140\%}{3} \\
&= \frac{180\%}{3} \\
&= 60\%
\end{aligned}$$

Didapat titik potong tersebut terletak pada nilai ketidakseimbangan 60%.

Berbeda dengan grafik hasil pengukuran dengan menggunakan beban induktif yang menunjukkan keadaan bahwa hasil pengukuran dengan menggunakan kWh-meter satu fasa cenderung lebih rendah dibanding hasil pengukuran dengan menggunakan kWh-meter tiga fasa.

Nilai ketidakseimbangan yang memberikan hasil pengukuran sama pada kedua alat terjadi pada 60% untuk beban resistif murni dan nilai tersebut menurun pada 53% untuk gabungan dengan pengujian beban campuran. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan beban reaktif (dalam hal ini beban induktif) akan membuat hasil pengukuran dengan kWh-meter satu fasa lebih rendah daripada hasil pengukuran dengan kWh-meter tiga fasa yang ditunjukkan oleh grafik hasil pengukuran tabel 4.3 dan penurunan nilai ketidakseimbangan yang menyebabkan kesamaan hasil pengukuran (penurunan hasil pengukuran dengan kWh-meter satu fasa lebih cepat turun dan dicapai pada nilai ketidakseimbangan 53%, lebih cepat dibanding hanya beban resistif yang baru dicapai pada nilai ketidakseimbangan 60%).

Untuk pemakaian listrik sehari-hari dengan pf berkisar 0,6 - 0,8 (nilai tengah 0,7 yang berarti ketidakseimbangan 30%), hasil pengukuran dengan menggunakan kWh-meter satu fasa lebih besar daripada hasil pengukuran menggunakan kWh-meter tiga fasa. Pada tabel 4.1, titik ketidakseimbangan 30% terletak diantara data ketujuh dan data kedelapan. Data ketujuh (21%) memiliki selisih nilai sebesar :

$$\frac{1,231 - 1,210}{1,231} = \frac{0,021}{1,231} = 0,0171 = 1,71\%$$

pada data kedelapan (42%) memiliki selisih nilai sebesar :

$$\frac{1,110 - 1,106}{1,106} = \frac{0,04}{1,106} = 0,0362 = 3,62\%$$

sedangkan titik ketidakseimbangan 30% :

$$\begin{aligned} & \frac{30\% - 21\%}{42\% - 21\%} \times (3,62\% - 1,71\%) + 1,71\% \\ &= \frac{9\%}{21\%} \times (1,91\%) + 1,71\% \\ &= 0,82\% + 1,71\% \\ &= 2,53\% \end{aligned}$$

Pada tabel 4.2, titik ketidakseimbangan 30% terletak diantara data ketiga dan data keempat. Data ketiga (11%) memiliki selisih sebesar :

$$\frac{2,596 - 2,490}{2,596} = \frac{0,106}{2,596} = 0,0408 = 4,08\%$$

pada data keempat (42%) memiliki selisih sebesar :

$$\frac{2,275 - 2,210}{2,275} = \frac{0,065}{2,275} = 0,0286 = 2,86\%$$

sedangkan pada titik ketidakseimbangan 30% :

$$\begin{aligned} & \frac{30\% - 11\%}{42\% - 11\%} \times (2,86\% - 4,08\%) + 4,08\% \\ &= \frac{19\%}{31\%} \times (-1,22\%) + 4,08\% \\ &= -0,75\% + 4,08\% \\ &= 3,33\% \end{aligned}$$

Pada tabel 4.4, titik ketidakseimbangan 30% terletak diantara data keempat dan data kelima. Data keempat (21%) memiliki selisih sebesar :

$$\frac{1,293 - 1,250}{1,293} = \frac{0,043}{1,293} = 0,0333 = 3,33\%$$

pada data kelima (32%) memiliki selisih sebesar :

$$\frac{1,160 - 1,160}{1,160} = 0\%$$

sedangkan pada titik ketidakseimbangan 30% :

$$\frac{32\% - 30\%}{32\% - 21\%} \times 3,33\% = \frac{2\%}{11\%} \times 3,33\% = 0,61\%$$

Sehingga rata-rata ketiga tabel dengan memberi bobot 2x untuk data pada tabel 4.2 adalah :

$$\begin{aligned} & \frac{2,53\% + (2 \times 3,33\%) + 0,61\%}{1 + 2 + 1} \\ &= \frac{2,53\% + 6,66\% + 0,61\%}{4} \\ &= \frac{9,80\%}{4} \\ &= 2,45\% \end{aligned}$$



Apabila dilakukan koreksi dengan persen kesalahan (error), maka didapat :

Beban Resistif

Tabel 4.5 Perbandingan hasil pengukuran beban resistif 1 dengan persen kesalahan

No.	Fasa ₁		Fasa ₂		Fasa ₃		$\sum 1\phi$		3 Fasa	
	-(min)	+(max)	-(min)	+(max)	-(min)	+(max)	-(min)	+(max)	-(min)	+(max)
1.	0,463	0,483	0,456	0,482	0,478	0,482	1,397	1,447	1,321	1,399
2.	0,455	0,475	0,434	0,458	0,470	0,474	1,359	1,407	1,311	1,388
3.	0,463	0,483	0,427	0,451	0,476	0,480	1,336	1,414	1,234	1,306
4.	0,454	0,474	0,436	0,460	0,451	0,455	1,341	1,389	1,282	1,358
5.	0,452	0,472	0,401	0,423	0,442	0,446	1,295	1,341	1,253	1,327
6.	0,450	0,470	0,404	0,428	0,413	0,417	1,267	1,315	1,214	1,286
7.	0,448	0,468	0,355	0,375	0,406	0,410	1,209	1,253	1,175	1,245
8.	0,454	0,474	0,263	0,279	0,370	0,372	1,087	1,125	1,078	1,142
9.	0,442	0,462	0,097	0,103	0,242	0,244	0,781	0,809	0,787	0,833
10.	0,446	0,466	-	-	0,243	0,245	0,689	0,711	0,719	0,761
11.	0,454	0,474	-	-	-	-	0,454	0,474	0,427	0,453

Tabel 4.6 Perbandingan hasil pengukuran beban resistif 2 dengan persen kesalahan

No.	Fasa ₁		Fasa ₂		Fasa ₃		$\sum 1\phi$		3 Fasa	
	-(min)	+(max)	-(min)	+(max)	-(min)	+(max)	-(min)	+(max)	-(min)	+(max)
1.	0,915	0,955	0,902	0,954	0,933	0,941	2,750	2,850	2,681	2,839
2.	0,908	0,948	0,878	0,928	0,928	0,936	2,614	2,812	2,652	2,808
3.	0,918	0,958	0,802	0,848	0,829	0,837	2,549	2,643	2,419	2,561
4.	0,928	0,970	0,543	0,575	0,764	0,771	2,235	2,316	2,147	2,273
5.	0,904	0,944	0,192	0,204	0,498	0,502	1,594	1,650	1,603	1,697
6.	0,896	0,936	-	-	0,480	0,484	1,376	1,420	1,379	1,461
7.	0,883	0,923	-	-	-	-	0,883	0,923	0,884	0,936

Beban Induktif

Tabel 4.7 Perbandingan hasil pengukuran beban induktif dengan persen kesalahan

No.	Fasa ₁		Fasa ₂		Fasa ₃		$\sum 1\phi$		3 Fasa	
	-(min)	+(max)	-(min)	+(max)	-(min)	+(max)	-(min)	+(max)	-(min)	+(max)
1.	0,033	0,035	0,030	0,032	0,035	0,035	0,097	0,102	0,107	0,113
2.	0,031	0,033	0,029	0,031	0,033	0,033	0,093	0,097	0,097	0,103
3.	0,032	0,034	0,029	0,031	0,032	0,032	0,093	0,097	0,097	0,103
4.	0,033	0,035	0,026	0,028	0,032	0,032	0,091	0,095	0,087	0,093
5.	0,034	0,036	0,024	0,026	0,024	0,024	0,082	0,086	0,087	0,093
6.	0,032	0,034	0,019	0,021	0,024	0,024	0,075	0,079	0,087	0,093
7.	0,034	0,036	0,017	0,019	0,021	0,021	0,072	0,076	0,087	0,093
8.	0,034	0,036	0,005	0,005	0,018	0,018	0,057	0,059	0,068	0,72
9.	0,031	0,033	-	-	0,018	0,018	0,049	0,051	0,068	0,72
10.	0,032	0,034	-	-	-	-	0,032	0,034	0,039	0,41

Beban Campuran

Tabel 4.8 Perbandingan hasil pengukuran beban campuran dengan persen kesalahan

No.	Fasa ₁		Fasa ₂		Fasa ₃		$\sum 1\phi$		3 Fasa	
	-(min)	+(max)	-(min)	+(max)	-(min)	+(max)	-(min)	+(max)	-(min)	+(max)
1.	0,455	0,475	0,454	0,480	0,466	0,470	1,375	1,425	1,330	1,409
2.	0,460	0,480	0,408	0,432	0,474	0,478	1,342	1,390	1,282	1,358
3.	0,454	0,474	0,359	0,379	0,458	0,462	1,271	1,315	1,214	1,286
4.	0,465	0,485	0,368	0,390	0,478	0,482	1,311	1,357	1,263	1,337
5.	0,449	0,469	0,319	0,337	0,372	0,374	1,140	1,180	1,127	1,193
6.	0,459	0,479	0,277	0,293	0,379	0,381	1,115	1,153	1,107	1,173
7.	0,460	0,480	0,279	0,279	0,285	0,287	1,024	1,046	1,010	1,070

Dengan memasukkan *error* ke dalam perhitungan, di dapat data pengukuran dalam kisaran nilai yang rentangnya dari hasil pengukuran dikurang dengan *error*-nya ($x - \Delta x$) sampai hasil pengukuran ditambah dengan *error*-nya ($x + \Delta x$).

Secara umum, dari data di atas, berlaku bahwa hasil pengukuran dengan menggunakan kWh-meter satu fasa pada pembebanan resistif dan campuran lebih besar dibanding hasil pengukuran dengan menggunakan kWh-meter tiga fasa pada nilai ketidakseimbangan kecil dan pada nilai ketidakseimbangan yang diperbesar, hasil pengukuran dengan menggunakan kWh-meter tiga fasa meningkat. Juga berlaku bahwa pada pembebanan induktif, hasil pengukuran dengan menggunakan kWh-meter satu fasa lebih kecil daripada hasil pengukuran dengan menggunakan kWh-meter tiga fasa.

Analisis ini dilakukan dengan membandingkan rentang nilai hasil pengukuran (dengan menggunakan kWh-meter satu fasa dan dengan menggunakan kWh-meter tiga fasa), dimana dapat terjadi beberapa kemungkinan :

- kedua rentang tidak berpotongan (nilainya terpisah), menunjukkan bahwa salah satu nilai lebih besar dari nilai yang lain
- kedua rentang beririsan sebagian, menunjukkan bahwa kedua nilai mendekati
- salah satu rentang berada di dalam (merupakan himpunan bagian dari) rentang yang lain, menunjukkan kemiripan nilai tetapi tidak identik
- kedua rentang sama, menunjukkan kemiripan nilai yang identik

Berdasarkan parameter di atas, terlihat pada tabel 4.5 bahwa rentang hasil pengukuran dengan kWh-meter satu fasa tidak berpotongan dengan rentang hasil pengukuran dengan kWh-meter tiga fasa pada nilai ketidakseimbangan nol. Dengan nilai ketidakseimbangan yang lebih besar, kedua rentang bergerak mendekati dan mulai beririsan sebagian pada data ke-4 sampai data ke-7. Pada data ke-8 dan ke-9, rentang hasil pengukuran menggunakan kWh-meter tiga fasa berada dalam rentang hasil pengukuran dengan menggunakan kWh-meter satu fasa yang menunjukkan pergerakan kedua rentang mendekati satu dengan lainnya. Namun, pada data ke-10 dan ke-11, kedua rentang kembali tidak beririsan, dimana rentang nilai hasil pengukuran menggunakan kWh-meter tiga fasa lebih kecil daripada rentang hasil pengukuran menggunakan kWh-meter satu fasa pada data ke-11 dan sebaliknya terjadi pada data ke-10. Maka data ke-10 dan data ke-11 dianggap kurang baik / akurat karena hasil pengukuran (terutama pada kWh-meter tiga fasa) kecil sehingga memungkinkan *error* pembacaan yang besar, maka analisis dilakukan pada data tabel 4.6 yang durasi pengujian-nya lebih lama sehingga data yang didapat lebih akurat.

Pada tabel 4.6, rentang nilai hasil pengukuran dengan menggunakan kWh-meter tiga fasa sudah berada dalam rentang nilai hasil pengukuran dengan menggunakan kWh-meter satu fasa pada data ke-1 sampai data ke-4. Pada data ke-5 dan ke-6, kedua rentang hanya beririsan dimana batas atas rentang hasil pengukuran menggunakan kWh-meter tiga fasa lebih besar dari batas atas hasil pengukuran menggunakan kWh-meter satu fasa, sedangkan batas bawah kedua rentang berdekatan. Sampai pada data terakhir, kedua rentang nilainya mirip (terutama batas bawahnya).

Maka dapat disimpulkan bahwa semakin besar nilai ketidakseimbangan sampai lepas salah satu fasanya, hasil pengukuran dengan menggunakan kedua alat bergerak hingga sama dan benar-benar identik pada lepasnya kedua fasa atau hanya satu fasa yang terukur karena daya yang melalui kWh-meter satu fasa dan kWh-meter tiga fasa benar-benar identik.

Untuk tabel 4.7 dan 4.8, pergerakan data serupa dengan data yang belum memasukkan *error*, sehingga tidak memberikan analisis tambahan.

Grafik menunjukkan bahwa hasil pengukuran pada kWh-meter satu fasa seiring meningkatnya ketidakseimbangan, tidak selalu bergerak mengecil dibandingkan hasil pengukuran pada kWh-meter tiga fasa. Tercatat bahwa persentase selisih hasil pengukuran keduanya paling besar terjadi saat nilai ketidakseimbangan 11% sampai 42% (berdasarkan data ketiga dan keempat tabel 4.2). Pada ketidakseimbangan beban 11% terdapat selisih sebesar 4,08% dan pada ketidakseimbangan beban 42% selisihnya sebesar $\pm 2,86\%$.

Pada rangkaian pengujian gambar 3.1 terlihat bahwa kWh-meter tiga fasa ditempatkan pada jalur rangkaian yang lebih dekat dengan sumber arus listrik dibandingkan kWh-meter satu fasa yang diletakkan setelahnya. Posisi demikian membuat adanya jatuh tegangan pada kWh-meter tiga fasa yang mempengaruhi hasil pengukuran pada kWh-meter satu fasa menjadi berkurang. Untuk itu dilakukan percobaan dengan posisi kWh-meter satu fasa lebih dekat dengan sumber tegangan.

Dari percobaan selama satu jam dengan beban resistif seimbang didapatkan hasil pengukuran kWh-meter satu fasa masing-masing sebesar 0,972 kWh ; 0,989 kWh dan 0,978 kWh yang berarti jumlah hasil pengukuran dengan kWh-meter satu fasa sebesar 2,939 kWh. Sedangkan hasil pengukuran dengan kWh-meter tiga fasa sebesar 2,92 kWh.

Selain beban resistif, juga dilakukan percobaan dengan beban induktif seimbang selama 30 menit dan didapatkan hasil pengukuran kWh-meter satu fasa masing-masing sebesar 0,033 kWh ; 0,032 kWh dan 0,034 kWh yang berarti jumlah hasil pengukuran dengan kWh-meter satu fasa sebesar 0,099 kWh. Sedangkan hasil pengukuran dengan kWh-meter tiga fasa sebesar 0,110 kWh.

Dari kedua hasil pengukuran tersebut, terlihat bahwa posisi penempatan kedua kWh-meter berpengaruh terhadap perbandingan hasil pengukuran keduanya. kWh-meter yang ditempatkan lebih jauh dari beban akan memberi hasil pengukuran yang lebih tinggi dari hasil seharusnya. Tetapi dari hasil pengukuran di atas terlihat bahwa pada beban resistif, hasil pengukuran dengan beban resistif untuk kWh-meter satu fasa tetap lebih besar daripada hasil pengukuran kWh-meter tiga fasa. Untuk percobaan dengan beban induktif, hasil pengukuran kWh-meter tiga fasa tetap lebih besar dari hasil pengukuran dengan kWh-meter satu fasa.

Untuk melihat pengaruh harmonik pada kinerja pengukuran kWh-meter, dilakukan pengukuran terhadap THD rangkaian. Pada sumber tiga fasa yang digunakan dengan keadaan tanpa beban, didapat nilai THD sebesar 3,24%. Ketiga dipasang alat ukur kWh-meter satu fasa pada masing-masing fasanya, THD meningkat menjadi 4,51%. Bila yang dipasang adalah kWh-meter tiga fasa, maka THD menjadi 5,20%, sedangkan bila dipasang baik kWh-meter tiga fasa dan kWh-meter satu fasa, THD menjadi 4,67%. Dari data tersebut terlihat bahwa alat ukur kWh-meter itu sendiri berpengaruh terhadap THD. Terlihat juga bahwa peningkatan THD ketika dipasang kWh-meter tiga fasa lebih besar daripada ketika dipasang kWh-

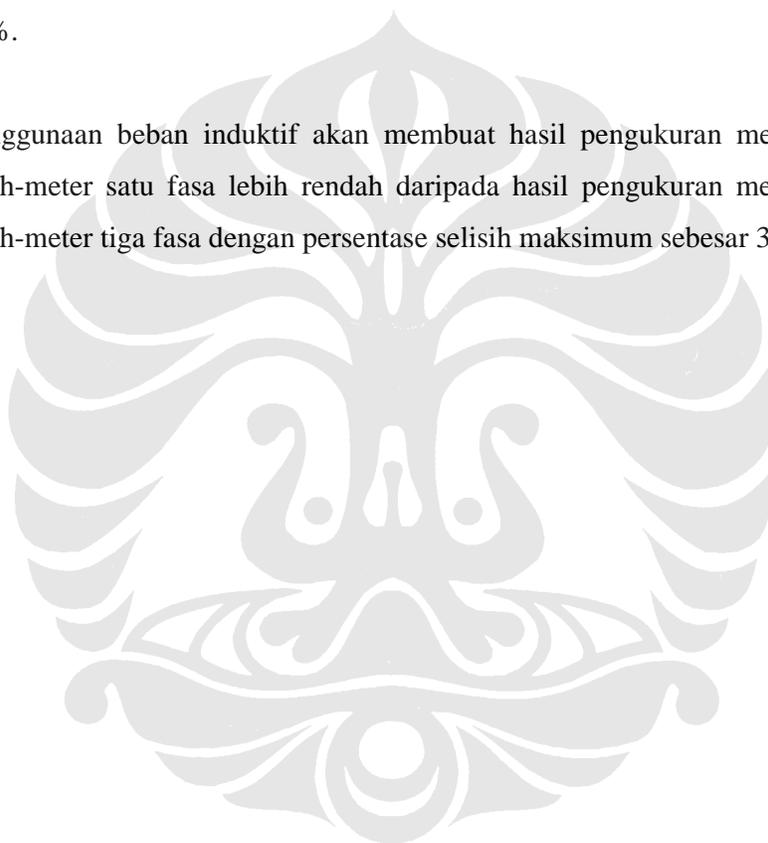
meter satu fasa yang menunjukkan bahwa kWh-meter tiga fasa lebih berpengaruh terhadap THD daripada kWh-meter satu fasa. Harmonik ini dapat menimbulkan tambahan torsi pada kWh-meter jenis elektrodinamis yang menggunakan piringan induksi berputar. Sebagai akibatnya, putaran piringan akan lebih cepat atau terjadi kesalahan ukur kWh-meter karena piringan induksi tersebut dirancang hanya untuk beroperasi pada frekuensi dasar [4]. Maka, pada ketidakseimbangan besar dan beban non linier (induktif) dimana THD menjadi lebih berpengaruh karena ketidakseimbangan tersebut, hasil pengukuran kWh-meter tiga fasa menjadi lebih besar dari hasil pengukuran dengan kWh-meter satu fasa.



BAB V

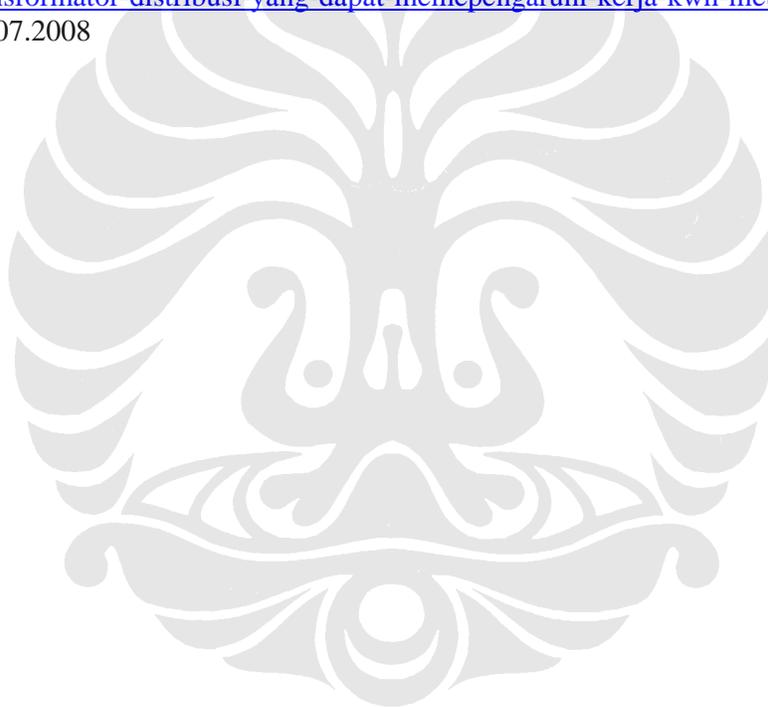
KESIMPULAN

- Terdapat perbedaan hasil pengukuran antara kWh-meter satu fasa dan kWh-meter tiga fasa pada pembebanan yang tak seimbang hingga mencapai 4,08% dimana hasil pengukuran dengan kWh-meter satu fasa lebih besar dari hasil pengukuran dengan kWh-meter tiga fasa pada ketidakseimbangan 11% sampai 42%.
- Penggunaan beban induktif akan membuat hasil pengukuran menggunakan kWh-meter satu fasa lebih rendah daripada hasil pengukuran menggunakan kWh-meter tiga fasa dengan persentase selisih maksimum sebesar 35,1%.



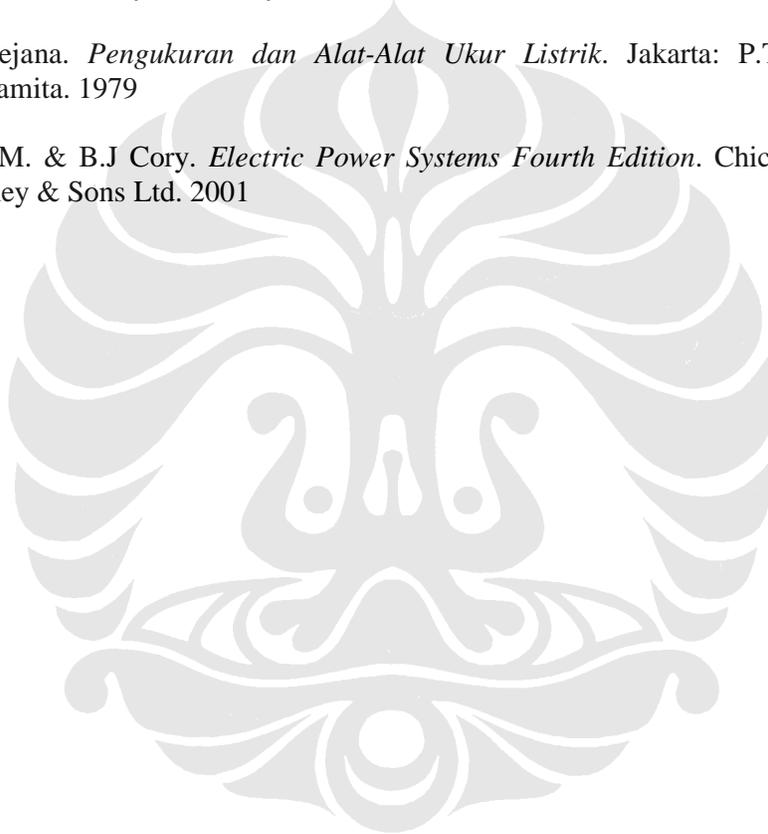
DAFTAR ACUAN

- [1] Chapman, Stephen J.. *Electric Machinery and Power System Fundamentals International edition*. Mc Graw Hill. 2002
- [2] Welldy. Skripsi: “*Pengurangan Arus Harmonik Kabel Netral di Sisi Catu Sistem Distribusi Tiga Fasa 4 Kawat menggunakan Transformasi Zig-Zag*”, Departemen Elektro Universitas Indonesia. 2006
- [3] Setiabudy, Rudy. *Pengukuran Besaran Listrik*. LP-FEUI. 2007
- [4] Forysthe, “*Pengaruh Harmonik pada Transformator Distribusi yang dapat Mempengaruhi Kerja kWh-meter*”,
<http://gomindo.wordpress.com/2008/05/05/pengaruh-harmonik-pada-transformator-distribusi-yang-dapat-mempengaruhi-kerja-kwh-meter/>,
16.07.2008



DAFTAR PUSTAKA

- Hindmarsh, John. *Electrical Machines and Their Applications 4th Edition*. Pergamon Press. 1984
- Johnson, David E.. *Electric Circuit Analysis*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc. 1997
- Nilsson, James W.. *Electric Circuit 2nd Edition*. Addison-Wesley Publishing Company. 1986
- Saadat, Hadi. *Power System Analysis*. McGraw-Hill. 1999
- Sapiie, Soejana. *Pengukuran dan Alat-Alat Ukur Listrik*. Jakarta: P.T. Pradnya Paramita. 1979
- Weedy, B.M. & B.J Cory. *Electric Power Systems Fourth Edition*. Chicester: John Wiley & Sons Ltd. 2001



LAMPIRAN

Hasil pengukuran distorsi harmonik total (THD) pada rangkaian dengan alat Hioki *Hi-Power Tester and Analyzer* Tipe 3169 :

- Sumber tiga fasa tanpa kWh-meter : THD = 3,24%
- Sumber tiga fasa dengan kWh-meter satu fasa : THD = 4,51%
- Sumber tiga fasa dengan kWh-meter tiga fasa : THD = 5,20%
- Sumber tiga fasa dengan kWh meter satu fasa dan kWh-meter tiga fasa :
THD = 4,67%

