



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN ANTARA
FASA-FASA MENGGUNAKAN TRANSFORMATOR DENGAN
FASA-NETRAL TERHADAP HASIL PENGUKURAN**

SKRIPSI

**Bico Maxtrada
04 04 03 02 1Y**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
DESEMBER 2008**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN ANTARA
FASA-FASA MENGGUNAKAN TRANSFORMATOR DENGAN
FASA-NETRAL TERHADAP HASIL PENGUKURAN**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar

Sarjana Teknik

**Bico Maxtrada
04 04 03 02 1Y**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
DESEMBER 2008**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINILITAS

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

Nama : Bico Maxtrada

NPM : 04 04 03 02 1Y

Tanda tangan :

Tanggal : 12 Desember 2008

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Bico Maxtrada
NPM : 04 04 03 02 1Y
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Antara Fasa-
Fasa Menggunakan Transformator dengan Fasa-
Netral Terhadap Hasil Pengukuran

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 : Dr. Ir. Rudy Setiabudy ()

Penguji : Dr. Ir. Iwa Garniwa ()

Penguji : Budi Sudiarto ST. MT. ()

Ditetapkan di : Kampus UI 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:

Dr. Ir. Rudy Setiabudy

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 : Bico Maxtrada
NPM : 04 04 03 02 1Y
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:

Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Antara Fasa-Fasa Menggunakan Transformator dengan Fasa-Netral Terhadap Hasil Pengukuran

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 : Desember 2008
Yang menyatakan

(Bico Maxtrada)

ABSTRAK

Nama : Bico Maxtrada
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Antara Fasa-Fasa
Menggunakan Transformator dengan Fasa-Netral Terhadap
Hasil Pengukuran

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 tidak variatif atau 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.

Dengan demikian, 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, ketidakseimbangan beban

ABSTRACT

Nama : Bico Maxtrada
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Antara Fasa-Fasa
Menggunakan Transformator dengan Fasa-Netral Terhadap
Hasil Pengukuran

Nowadays, Indonesia is using three phase wire system to deliver electrical power to their consumer. Supply of a electrical power by two wire or three phase wire and one neutral wire. In trading power electricity, we need device that can count how many supply of energy being transferred called kwhmeter. Kwhmeter divided into one phase kwhmeter and three phase kwhmeter. In three phase wire system, the number of electrical power being supplied is equal to the summary of electrical power each phase. So, measurement result by using one phase kwhmeter compare to three phase kwhmeter supposed to be the same. But, in real there's a different measurement result by using one phase compare to three phase kwhmeter.

In Electrical Power System, generator performance and transmission line are not so varied or their condition tend to stable on their operation. Whereas load component is the most varied on their value (impedance and their power factor). The fluctuation happened dissimilar on each phase. So that, not just the value of load impedance changing but it cause unbalanced load.

So that, caused by load are varied, then load factor (unbalanced load) is the dominant factor to influence the difference measurement result between one phase kwhmeter and three phase kwhmeter.

Key words: kwh-meter, unbalanced load

DAFTAR ISI

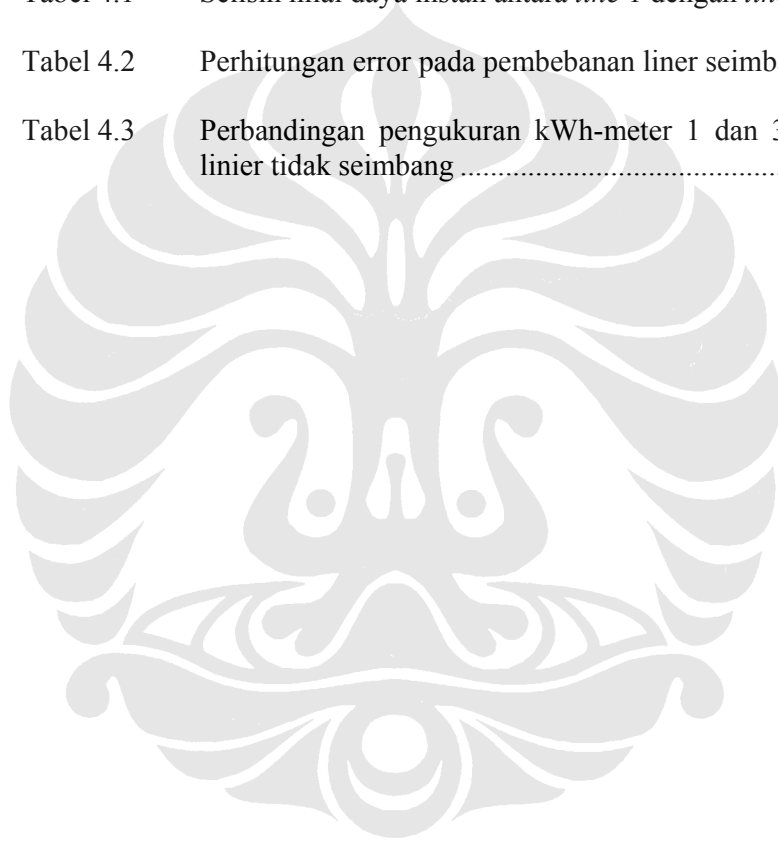
| | |
|--|-----------|
| HALAMAN JUDUL | i |
| HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS | ii |
| HALAMAN PENGESAHAN | iii |
| UCAPAN TERIMA KASIH | iv |
| HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR | v |
| ABSTRAK | vi |
| ABSTACT | vii |
| DAFTAR ISI | viii |
| DAFTAR GAMBAR | ix |
| DAFTAR TABEL | x |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Tujuan Penulisan | 2 |
| 1.3 Batasan Masalah | 2 |
| 1.4 Sistematika Penulisan | 3 |
| 2 SISTEM DAYA LISTRIK TIGA FASA | 4 |
| 2.1 Rangkaian Listrik Tiga Fasa | 4 |
| 2.2 Daya Rangkaian Listrik Tiga Fasa | 7 |
| 2.3 Komponen Simetris | 10 |
| 2.4 Transformator | 14 |
| 2.4.1 Arus Penguat | 17 |
| 2.4.2 Rugi-rugi | 18 |
| 2.5 Pengaruh Harmonik | 19 |
| 2.5.1 Distorsi Harmonik | 19 |
| 2.5.2 Pengaruh Harmonik Pada pembacaan Kwh | 20 |
| 2.6 Pengukuran Besaran Listrik | 21 |
| 3 PENGUJIAN DAN HASIL PENGUKURAN | 26 |
| 3.1 Pengujian | 26 |
| 3.2 HasilPengujian | 30 |
| 4 ANALISI HASIL PENGUKURAN | 34 |
| 4.1 Pembebanan Linier Seimbang | 38 |
| 4.2 Pembebanan Linier Tidak Seimbang | 41 |
| 4.3 Pembebanan Harmonik Seimbang | 42 |
| 4.3 Pembebanan Harmonik Tidak Seimbang | 53 |
| V KESIMPULAN | 55 |
| DAFTAR PUSTAKA | 56 |

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|-------------|--|----|
| Gambar 2.1 | Skema sistem tenaga listrik | 4 |
| Gambar 2.2 | Kurva hubungan tegangan pada sistem listrik 3 fasa..... | 5 |
| Gambar 2.3 | Diagram fasor tegangan..... | 5 |
| Gambar 2.4 | Rangkaian hubung bintang-bintang (Y-Y)..... | 6 |
| Gambar 2.5 | Diagram fasor menurut sifat beban | 8 |
| Gambar 2.6 | Komponen simetris tegangan dari sistem yang tidak seimbang | 10 |
| Gambar 2.7 | Tegangan sistem sebagai penjumlahan dari komponen simetris..... | 12 |
| Gambar 2.8 | Lilitan Pada Transformator..... | 15 |
| Gambar 2.9 | Pembentukan Gelombang Harmonik Terdistorsi | 18 |
| Gambar 2.10 | Ilustrasi ketika ada sumber harmonik..... | 20 |
| Gambar 2.11 | Diagram fasor untuk beban R, L dan C | 22 |
| Gambar 2.12 | Rangkaian kWh-meter 3 fasa | 23 |
| Gambar 2.13 | Rangkaian kWh-meter tiga fasa | 23 |
| Gambar 3.1 | Rangkaian pengujian | 25 |
| Gambar 3.2 | KWh-meter satu fasa merk Schlumberger | 26 |
| Gambar 3.3 | KWh-meter satu fasa merk Actaris | 27 |
| Gambar 3.4 | KWh-meter tiga fasa..... | 28 |
| Gambar 4.1 | Karakteristik gelombang arus pada beban non linier | 43 |
| Gambar 4.2 | Konstruksi KWh meter analog tipe induksi | 43 |
| Gambar 4.3 | Ilustrasi besaran-besaran pada KWh meter | 44 |

DAFTAR TABEL

| | | |
|-----------|--|----|
| Tabel 3.1 | Data Pengujian untuk Beban Linier Seimbang | 31 |
| Tabel 3.2 | Data Pengujian untuk Beban Linier Tidak Seimbang | 32 |
| Tabel 3.3 | Data Pengujian untuk Beban Non Linier Seimbang..... | 33 |
| Tabel 3.4 | Data Pengujian untuk Beban Non Linier tidak Seimbang..... | 34 |
| Tabel 4.1 | Selisih nilai daya instan antara <i>line</i> 1 dengan <i>line</i> 2..... | 41 |
| Tabel 4.2 | Perhitungan error pada pembebanan liner seimbang..... | 37 |
| Tabel 4.3 | Perbandingan pengukuran kWh-meter 1 dan 3 fasa untuk beban linier tidak seimbang | 39 |



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Energi listrik merupakan bentuk energi yang sangat umum digunakan bagi masyarakat secara luas. Penggunaan energi listrik dewasa ini, tidak sekedar terbatas pada daerah atau konsumen kelas atas, namun energi listrik juga dikonsumsi oleh masyarakat menengah dan bawah. Kegiatan perdesaan sekalipun 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 disalurkan dengan mempergunakan 3 kawat fasa dan 1 kawat netral, sehingga dengan demikian seharusnya penjumlahan dari nilai daya yang disalurkan pada masing-masing fasa sama dengan nilai 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.

Fenomena ini dapat menghasilkan perbedaan hasil analisis yang dilakukan untuk sebuah sistem tenaga listrik tiga fasa dan tinjauan pada masing-masing fasanya yang disebabkan oleh *error* (kesalahan/perbedaan hasil pengukuran) yang terjadi. *Error* ini dapat menyebabkan kesalahan perhitungan dalam perencanaan instalasi sistem tenaga listrik pada penentuan kapasitas dayanya.

Dari ketiga komponen utama, komponen pembangkit dan saluran transmisi tidak terlalu bersifat variatif, dalam arti kinerja yang di-*set* tidak banyak berubah pada operasionalnya. Komponen yang paling bersifat variatif adalah komponen beban (distribusi). Beban yang disuplai pada 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 ketidak-seimbangan 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 dari PLN yang dihubungkan dengan beban pada salah satu fasanya (fasa-netral dengan beban) dan kedua fasa sisa dihubungkan dengan trafo *step-down* lalu baru terhubung dengan beban(fasa-fasa ke trafo lalu tersambung dengan beban). 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 pen-jumlahan energi pada masing-masing fasanya yang berpengaruh berupa kerugian dalam jual beli listrik.

1.3 PEMBATAAN 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 beban yang diberikan pada masing-masing fasa maksimal 1000 W.

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.

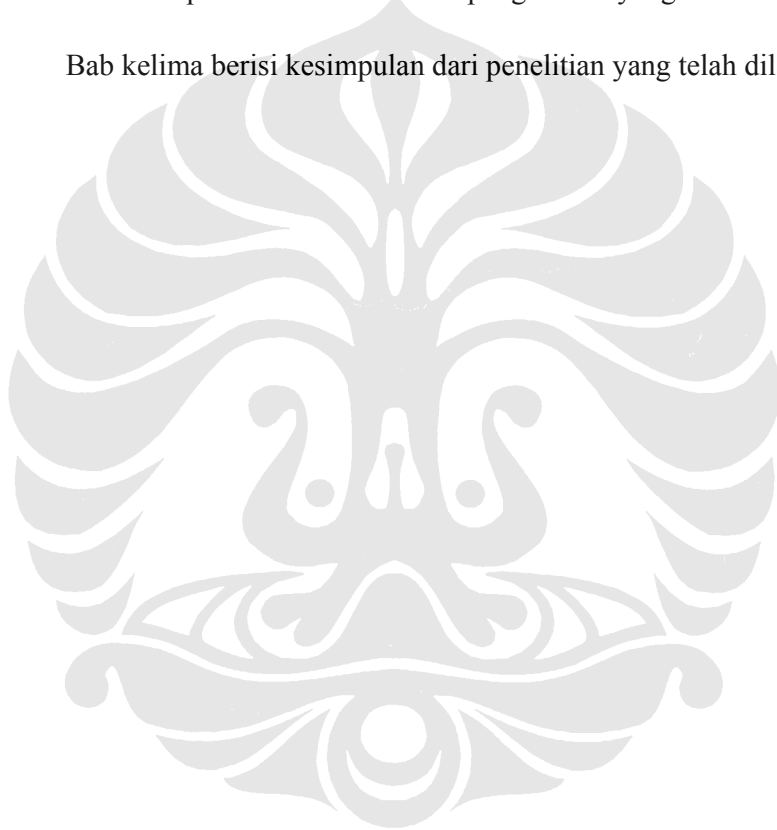
Bab pertama berisi latar belakang, tujuan penulisan, pembatasan masalah dan sistematika penulisan.

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.

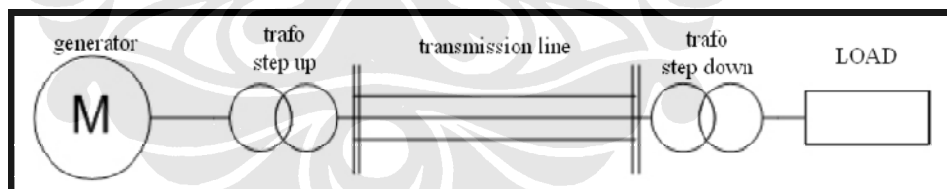
Bab keempat berisi analisis hasil pengukuran yang dilakukan.

Bab kelima berisi kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan.



BAB II
SISTEM DAYA LISTRIK
TIGA FASA

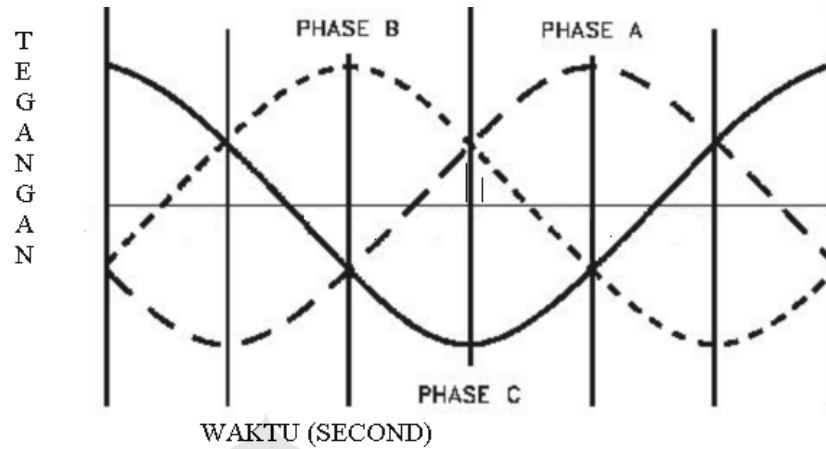
Jaringan listrik yang disalurkan oleh PLN ke konsumen, merupakan bagian dari sistem tenaga listrik secara keseluruhan. Secara umum, sistem tenaga listrik terdiri dari komponen pembangkit (generator), komponen saluran transmisi dan komponen beban. Daya listrik dibangkitkan oleh generator yang digerakkan oleh *prime mover* (dapat berasal dari energi uap, diesel, air, panas bumi, angin, dan sebagainya). Untuk mengurangi kerugian daya pada saluran transmisi, tegangan listrik tersebut dinaikkan sampai tegangan tinggi atau tegangan ekstra tinggi dengan transformator *step-up*, baru kemudian dihubungkan dengan saluran transmisi. Pada sisi penerima, tegangan listrik ini diturunkan sampai 220 atau 380 Volt 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

Keluaran (output) 3 fasa listrik bolak-balik (AC) dari generator memiliki perbedaan fasa sebesar 120° untuk tiap-tiap fasanya. Gambar di bawah menunjukkan hubungan tegangan masing-masing fasa.

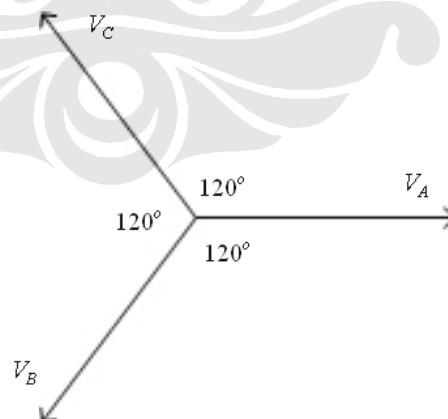


Gambar 2.2 Kurva hubungan tegangan pada sistem listrik 3 fasa

Perbedaan fasa pada tiap-tiap fasanya dapat dinyatakan sebagai berikut :

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

dan memiliki diagram fasor sebagai berikut :



Gambar 2.3 Diagram fasor tegangan

Arus yang mengalir pada setiap beban dinyatakan sebagai :

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

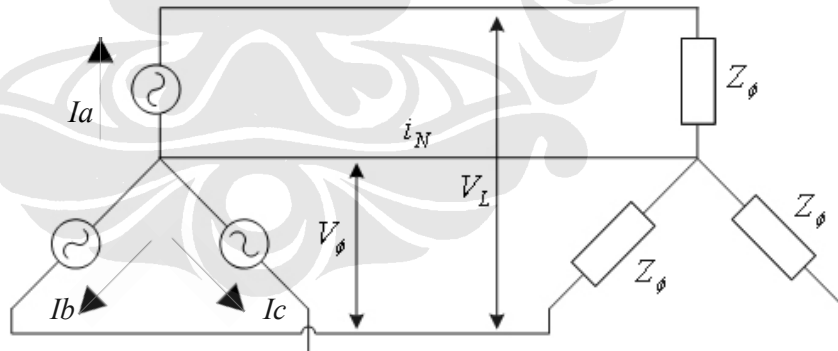
yang pada ketiga fasanya dapat dituliskan :

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

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

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

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



Gambar 2.4 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 :

$$I_N = I_A + I_B + I_C = 0 \quad (2.4)$$

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

Daya yang disalurkan pada rangkaian tiga fasa sama dengan jumlah daya pada ketiga fasanya. 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 :

$$P_{total}(t) = p_a(t) + p_b(t) + p_c(t) = 3VI \cos \theta \quad (2.5)$$

Persamaan daya ini dapat ditulis [1] :

$$S = 3V_\phi I_\phi = 3I_\phi^2 Z \quad (2.6)$$

$$P = 3V_\phi I_\phi \cos \theta = 3I_\phi^2 Z \cos \theta \quad (2.7)$$

$$Q = 3V_\phi I_\phi \sin \theta = 3I_\phi^2 Z \sin \theta \quad (2.8)$$

Dalam hubungan :

$$\begin{aligned} S &= P + jQ \\ P &= S \cos \theta \\ Q &= S \sin \theta \end{aligned} \quad (2.9)$$

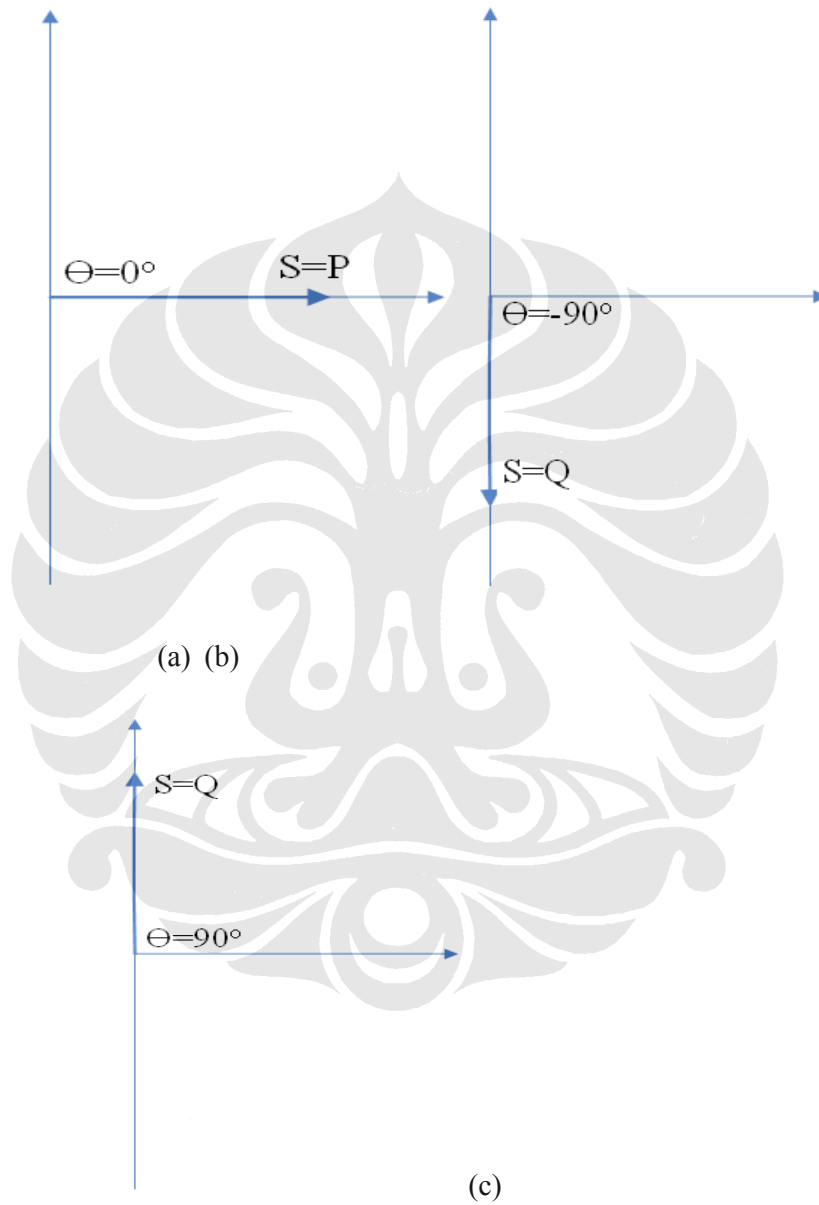
Dengan :

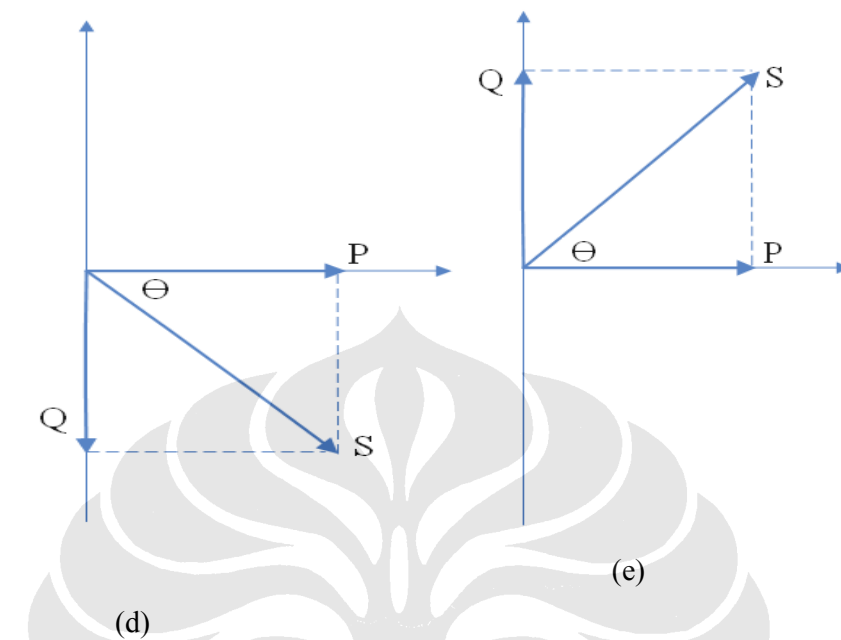
S = Daya total (satuan VA)

P = Daya nyata (satuan Watt)

Q = Daya reaktif (satuan VAR)

Menurut diagram fasor yang tergantung beban totalnya :





Gambar 2.5 Diagram fasor dalam grafik V~I untuk

- a. Beban resistif murni
- b. Beban induktif murni
- c. Beban kapasitif murni
- d. Beban induktif tidak murni
- e. Beban kapasitif tidak murni

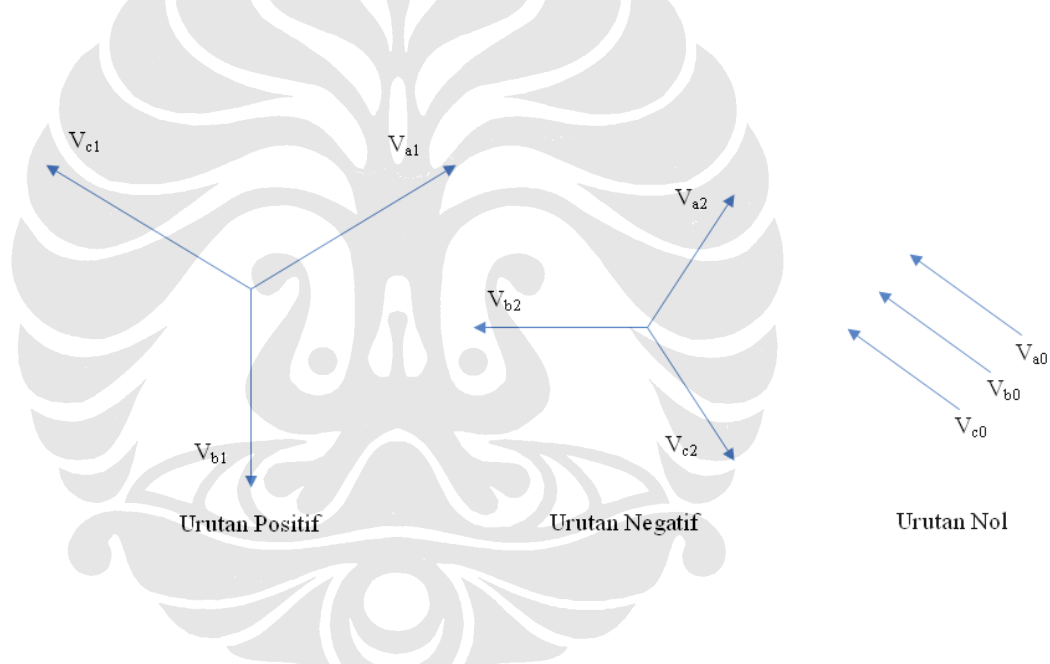
2.3 Komponen Simetris [2]

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.

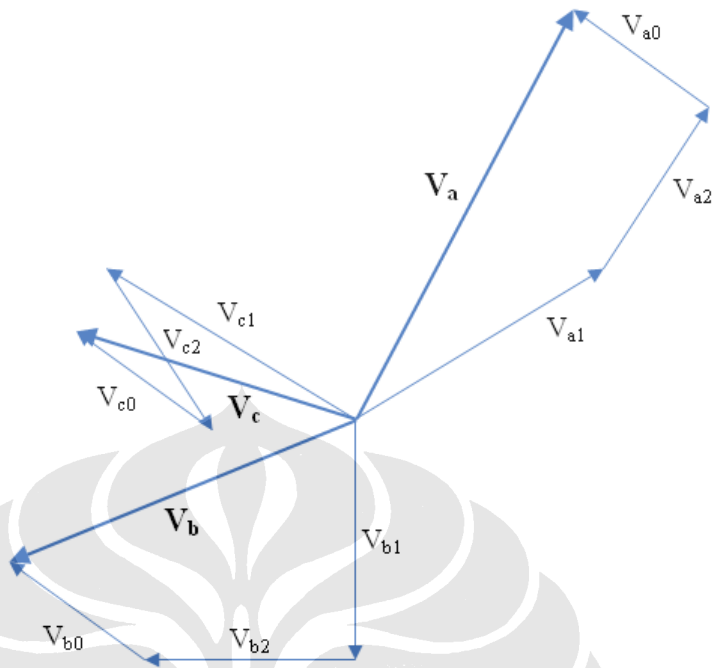
Notasi yang digunakan untuk komponen urutan tersebut biasanya diberikan subskrip 1, 2 dan 0 pada komponen arus dan tegangannya. Jadi, komponen urutan positif dari tegangan V_a , V_b dan V_c adalah V_{a1} , V_{b1} dan V_{c1} ; komponen urutan negatifnya V_{a2} , V_{b2} dan V_{c2} ; serta komponen urutan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



Gambar 2.6 Komponen simetris tegangan dari sistem yang tidak seimbang

Persamaan tegangan sistemnya dapat dituliskan dalam penjumlahan dari masing-masing komponen simetrisnya, yaitu :

$$\begin{aligned}
 V_a &= V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \\
 V_b &= V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \\
 V_c &= V_{c1} + V_{c2} + V_{c0}
 \end{aligned}
 \tag{2.10}$$



Gambar 2.7 Tegangan sistem sebagai penjumlahan dari komponen simetris

Seperti pada gambar 2.9 di atas, terdapat hubungan antara komponen-komponen simetrisnya, yaitu :

$$\begin{aligned}
 V_{b1} &= a^2 V_{a1} & V_{c1} &= a V_{a1} \\
 V_{b2} &= a V_{a2} & V_{c2} &= a^2 V_{a2} \\
 V_{b0} &= V_{a0} & V_{c0} &= V_{a0}
 \end{aligned}
 \tag{2.11}$$

dengan : $a = 1 \angle 120^\circ = -0,5 + j0,866$
 $a^2 = 1 \angle 240^\circ = -0,5 - j0,866$

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

$$\begin{aligned}
 V_a &= V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \\
 V_b &= a^2 V_{a1} + a V_{a2} + V_{a0} \\
 V_c &= a V_{a1} + a^2 V_{a2} + V_{a0}
 \end{aligned}
 \tag{2.12}$$

yang dapat dinyatakan dalam bentuk matriks :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix}
 \tag{2.13}$$

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

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}
 \tag{2.14}$$

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

$$\begin{aligned}
 V_{a0} &= \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \\
 V_{a1} &= \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) \\
 V_{a2} &= \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c)
 \end{aligned}
 \tag{2.15}$$

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 :

$$\begin{aligned}
 I_a &= I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \\
 I_b &= a^2 I_{a1} + a I_{a2} + I_{a0} \\
 I_c &= a I_{a1} + a^2 I_{a2} + I_{a0} \\
 I_{a0} &= \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \\
 I_{a1} &= \frac{1}{3}(I_a + a I_b + a^2 I_c) \\
 I_{a2} &= \frac{1}{3}(I_a + a^2 I_b + a I_c)
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

Arus netral yang mengalir adalah jumlah arus yang mengalir pada tiap fasanya. Jadi, berdasarkan persamaan (2.16), maka persamaan arus netralnya dapat dituliskan menjadi :

$$I_n = I_a + I_b + I_c = 3I_{a0} \tag{2.17}$$

2.4 Transformator

Secara umum, transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain, melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi-elektromagnet. Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaan transformator dalam sistem tenaga memungkinkan dipilihnya tegangan yang sesuai dengan kebutuhan dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluan misalnya, kebutuhan akan tegangan tinggi dalam pengiriman daya listrik jarak jauh.

Dalam bidang elektronika, transformator digunakan antara lain sebagai gandengan impedansi antara sumber dan beban; untuk memisahkan satu rangkain

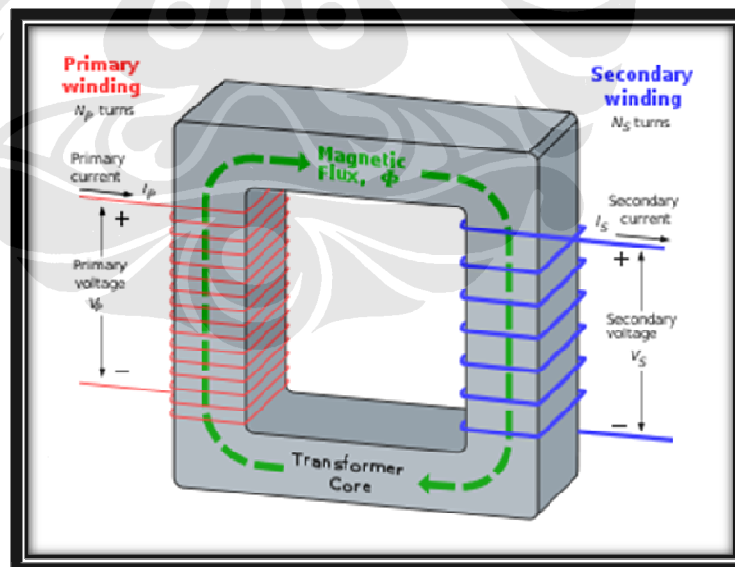
dari rangkaian yang lain; dan untuk menghambat arus searah sambil tetap melakukan atau mengalirkan arus bolak-balik antara rangkaian. Berdasarkan frekuensi, transformator dapat dikelompokkan sebagai berikut :

- (1) frekuensi daya, 50 – 60 c/s;
- (2) frekuensi pendengaran, 50 c/s – 20 kc/s;
- (3) frekuensi radio, diatas 30 kc/s.

Dalam bidang tenaga listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi :

- (1) transformator daya;
- (2) transformator distribusi;
- (3) transformator pengukuran, yang terdiri dari atas transformator arus dan transformator tegangan.

Kerja transformator yang berdasarkan induksi-elektromagnetik, menghendaki adanya gandingan magnet antara rangkaian primer dan sekunder. Gandingan magnet ini berupa *inti besi* tempat melakukan fluks bersama.



Gambar2.8 Lilitan pada transformator

Bila kumparan primer suatu transformator dihubungkan dengan sumber tegangan V_1 yang sinusoid, akan mengalir arus primer I_0 yang juga sinusoid. Arus primer I_0 menimbulkan fluks (ϕ) yang sefasa dan juga berbentuk sinusoidal.

$$\mathbf{f = f_{maks} \sin \omega t}$$

Fluks yang sinusoidal ini akan menghasilkan tegangan induksi e_1 (Hukum Faraday).

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt}$$

$$e_1 = -N_1 \frac{d(\phi_{maks} \sin \omega t)}{dt} = -N_1 \omega \phi_{maks} \cos \omega t$$

Harga efektifnya

$$E_1 = \frac{N_1 2\pi f \phi_{maks}}{\sqrt{2}} = 4,44 N_1 f \phi_{maks}$$

Pada rangkaian sekunder, fluks (ϕ) bersama tadi menimbulkan

$$e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

$$e_2 = -N_2 \omega \phi_m \cos \omega t$$

$$E_2 = 4,44 N_2 f \phi_{maks}$$

Dimana :

- ❖ E adalah nilai tegangan sinusoidal rms (volt)
- ❖ f adalah frekuensi (hertz)
- ❖ N adalah jumlah lilitan
- ❖ B adalah besar nilai medan magnetik (tesla)

sehingga

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

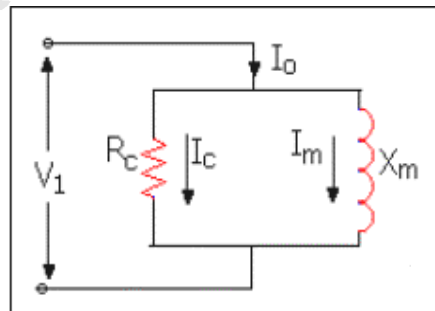
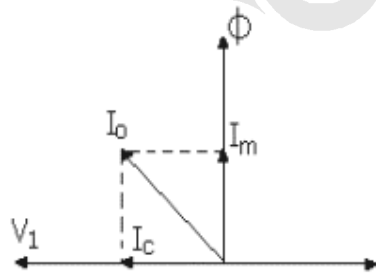
Dengan mengabaikan rugi tahanan dan adanya fluks bocor,

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

2.4.1 Arus Penguat

Arus primer I_0 yang mengalir disebut arus penguat. Dalam kenyataannya arus primer I_0 bukanlah merupakan arus induktif murni, hingga ia terdiri atas dua komponen :

- (1) Komponen arus pemagnetan I_M , yang menghasilkan fluks (ϕ).
- (2) Komponen arus rugi tembaga I_C , menyatakan daya yang hilang akibat adanya rugi histeris dan 'arus eddy'. I_C sefasa dengan V_1 , dnegan demikian hasil perkaliannya ($I_C \times V_1$) merupakan daya (watt) yang hilang.



2.4.2 Rugi-rugi

Transformator ideal tidak mempunyai kerugian (efisiensi = 100%). Tetapi dalam kenyataannya hal tersebut sangatlah tidak mungkin terjadi. Berikut adalah beberapa hal yang dapat menyebabkan rugi-rugi pada transformator:

- ❖ Rugi-Rugi yang diakibatkan oleh nilai tahanan resistif yang disebabkan karena pemanasan dari sifat konduktif bahan. Rugi – rugi ini biasa dihitung dengan ($I^2 R$ loss).
- ❖ Arus Eddy. Arus Eddy yang dalam kelistrikan sering juga disebut dengan Arus Foucault (Foucault current) karena yang menemukan fenomena ini dalam elektromagnet adalah orang Perancis bernama Foucault. Fenomena arus eddy dapat timbul apabila sebuah konduktor digerakkan memotong medan magnet, yang berarti ada perubahan medan melingkar konduktor yang terjadi karena posisi konduktor berubah relative terhadap arah medan magnet yang tetap. Sebaliknya, fenomena arus eddy ini juga bisa terjadi jika medan magnet itu sendiri besarnya berubah² dan memotong konduktor yang tetap. Hal inilah yang terjadi pada sebuah Transformator. Dalam fenomena ini akan muncul medan induksi pada sekitar konduktor yang arahnya tidak sama dengan medan penyebabnya yang akan menghasilkan medan pusaran. Dan jika bahan inti yang dijadikan jalur medan magnet ini bersifat konduktif (dapat melewatkan arus), maka medan pusar ini akan menghasilkan arus pusar pada inti. Jika pada konduktor itu ada sifat resistif maka akan muncul $I^2 R$ dan sejalan dengan lamanya, maka ini akan menjadi $I^2 R t$ menyebabkan panas.
- ❖ Rugi-rugi Hysteresis. Rugi-rugi hysteresis adalah rugi-rugi oleh karena panas berlebih yang disebabkan oleh karena sifat bahan.

2.5 Pengaruh Harmonik

2.5.1 Distorsi harmonik

Distorsi gelombang adalah perubahan bentuk sebuah sinyal yang tidak disengaja dan umumnya tidak disadari dengan referensi sinyal fundamental 50/60 hz. Distorsi gelombang yang utama antara lain harmonik, interharmonik dan komponen DC.

Komponen Harmonik atau biasa disebut harmonik adalah gelombang yang mempunyai frekuensi kelipatan bilangan asli terhadap frekuensi dasar. Persamaan frekuensi harmonik adalah :

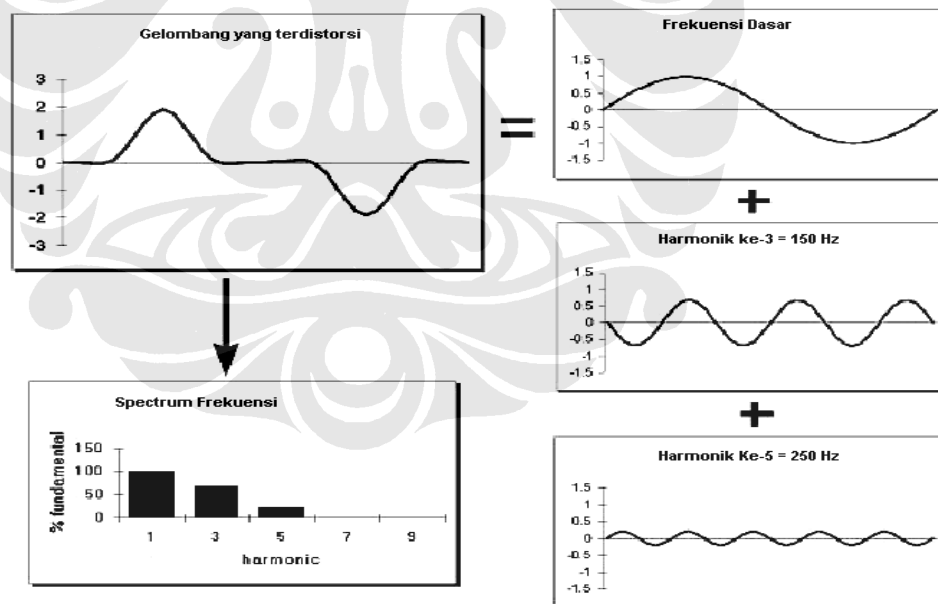
$$h = n \times F \text{ Hz} \dots\dots\dots(2.18)$$

dengan :

h : frekuensi harmonik orde ke-n

F : frekuensi fundamental sistem (50 Hz atau 60 Hz)

n : orde harmonik



Gambar 2.9 Pembentukan gelombang terdistorsi harmonik

Spektrum gelombang harmonik dapat dijelaskan dengan analisa Fourier. Spektrum harmonik adalah distribusi semua amplitudo komponen harmonik

sebagai fungsi dari orde harmoniknya dan diilustrasikan menggunakan histogram. Gambar di bawah merupakan contoh spektrum harmonik. Dari gambar tersebut dapat dikatakan bahwa spektrum merupakan perbandingan arus atau tegangan frekuensi harmonik terhadap arus atau tegangan frekuensi dasar.

Parameter dalam pengukuran harmonik yang paling umum digunakan adalah Total harmonic Distortion (THD), yang dapat dinyatakan sebagai berikut ;

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{h \rightarrow \infty} M_h^2}}{M_1} \dots\dots\dots(2.19)$$

Dengan M dapat berupa arus atau tegangan.

Nilai RMS besaran yang terdistorsi dapat dinyatakan dengan

$$RMS = \sqrt{\sum_{h>1}^{h \rightarrow \infty} M_h^2} = M_1 \sqrt{1 + THD^2} \dots\dots\dots(2.20)$$

2.5.2 Pengaruh harmonik pada pembacaan KWh meter

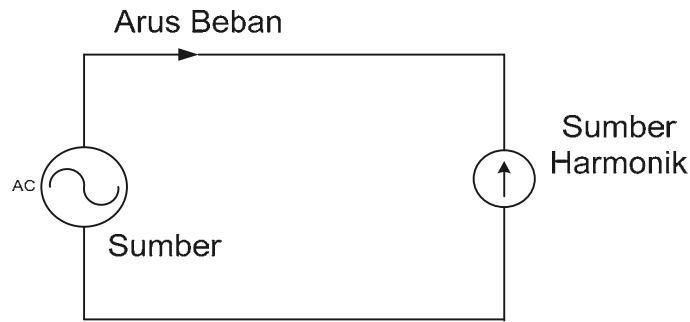
Gelombang harmonik yang muncul berlawanan arah dengan gelombang arus yang disuplai oleh sumber. Sehingga secara vektor arus yang melewati KWh meter akan semakin kecil, mengikuti hukum kirchoff,

$$\vec{I} = \vec{I}_1 + \left(\sum_{n=2} \vec{I}_n \right) \dots\dots\dots(2.21)$$

Dimana, \vec{I} = arus yang dibaca oleh KWh meter (Irms)

\vec{I}_1 = arus dengan frekuensi dasar (arus fundamental)

\vec{I}_n = arus harmonik



Gambar 2.10 Ilustrasi ketika ada sumber harmonik

Jadi, secara teoritis, dengan adanya pengurangan nilai arus tersebut maka pencatatan yang dilakukan oleh KWh meter akan menjadi lebih kecil, padahal nilai energi yang diserap adalah tidak demikian.

2.6 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 parallel dan alat ukur daya (Wattmeter) secara seri (representasi komponen arus pada wattmeter) dan parallel (representasi komponen tegangan pada wattmeter).
3. Melakukan pembacaan dengan baik, yaitu membaca alat dengan sudut pandangan yang tepat (pandangan mata tegak lurus antara jarum penunjuk juga dengan angka), serta membaca angka yang tertera setelah kondisi berhenti beresilasi (*steady*).

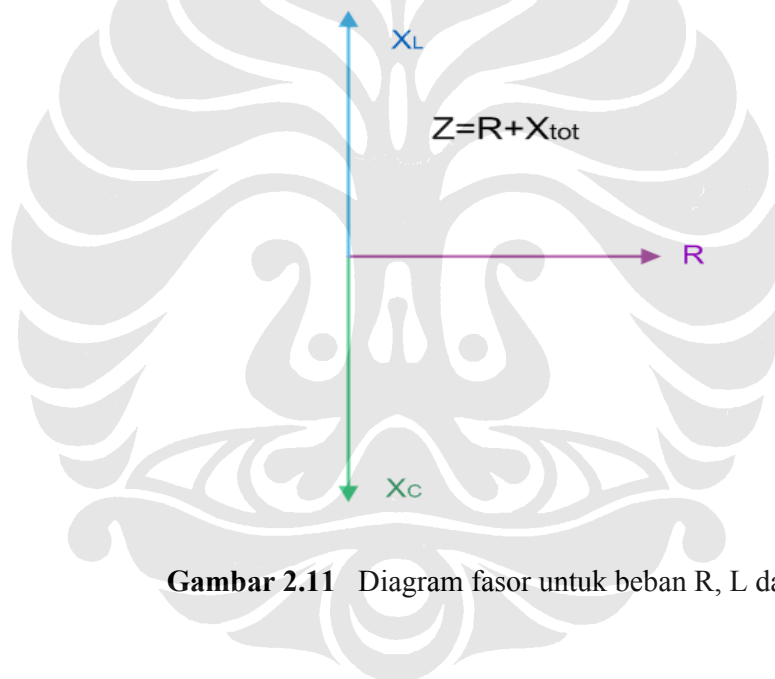
4. Mengalikan angka yang dibaca dengan pengali yang sesuai (bila ada) dan memberi satuan yang sesuai dengan petunjuk penggunaan alat ukur.

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 ini harus dipasang seri sebelum rangkaian listrik dihidupkan.
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.
3. Wattmeter, merupakan alat ukur daya. Rumus perhitungan daya adalah $P = VI$, yaitu merupakan perkalian nilai tegangan yang ada dengan arus. 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.

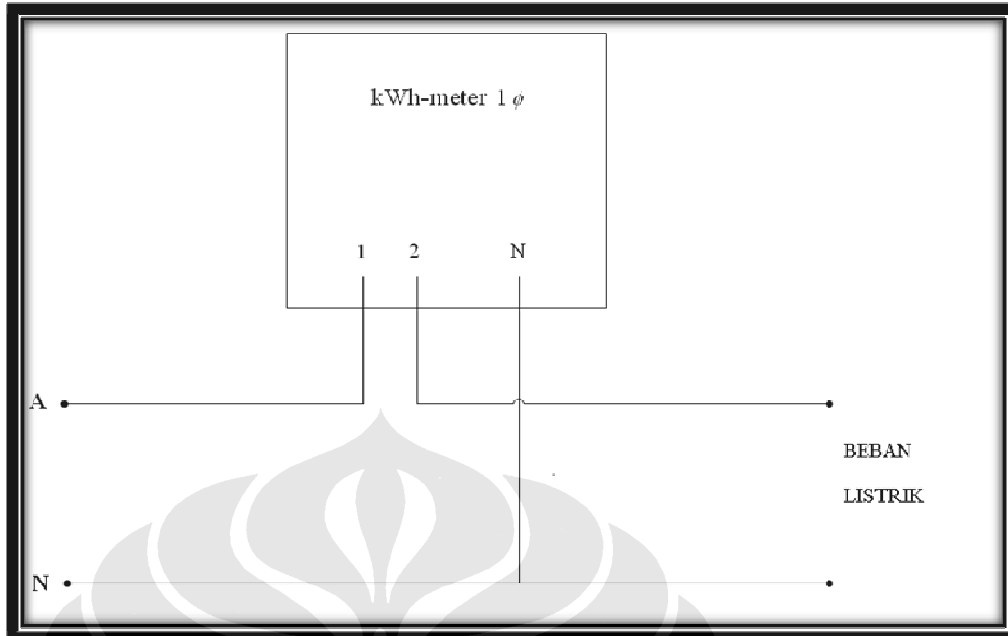
Sesuai persamaan (2.9), daya kompleks terdiri dari komponen daya nyata dan daya reaktif. Daya nyata dan daya reaktif dihasilkan dari beban nyata dan beban reaktif. Beban nyata atau beban linier adalah hambatan/ tahanan/ resistor, yang besar nilai bebannya dinyatakan dalam satuan Ω (ohm). Jenis beban 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 $X_L = j\omega L$ (ohm) dengan j adalah bilangan kompleks yang menyatakan sudut fasor 90° terhadap beban bersifat resistif. Sedangkan kapasitor memiliki satuan Farad dengan besar reaktansi kapasitif adalah $X_C = \frac{1}{j\omega C}$ (ohm). Reaktansi kapasitif memiliki komponen pengali $\frac{1}{j}$ yang menunjukkan sudut fasor -90° terhadap beban bersifat resistif. Reaktansi induktif dan reaktansi kapasitif saling meniadakan dengan nilai selisih merupakan komponen reaktif dari beban total menurut diagram fasor di bawah ini :



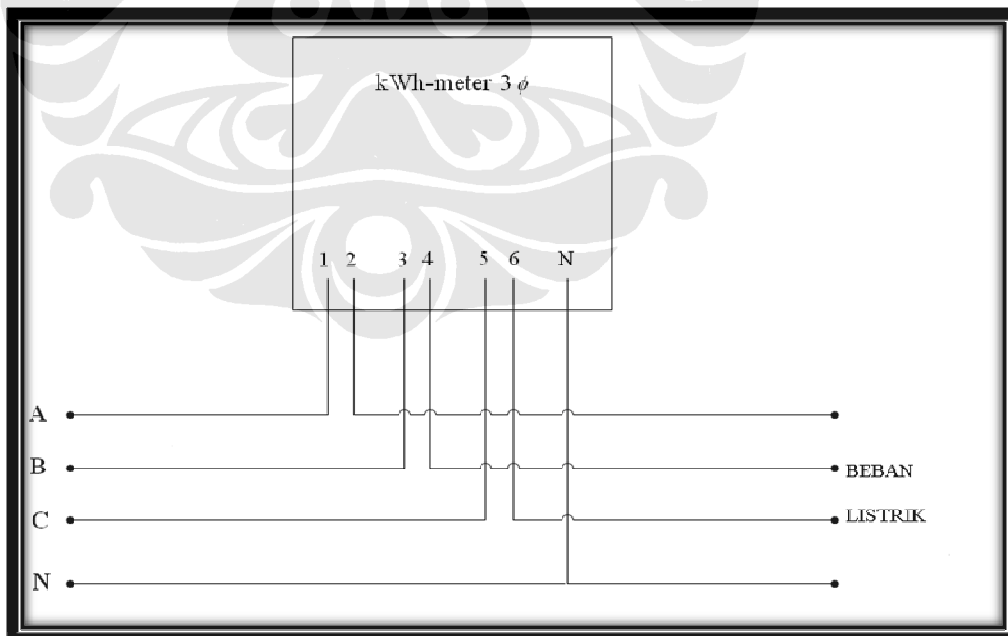
Gambar 2.11 Diagram fasor untuk beban R, L dan C [3]

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 2.12 Rangkaian kWh-meter satu fasa

Dan rangkaian untuk kWh-meter tiga fasa :



Gambar 2.13 Rangkaian kWh-meter tiga fasa

Penghitungan 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 penghitung (*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.

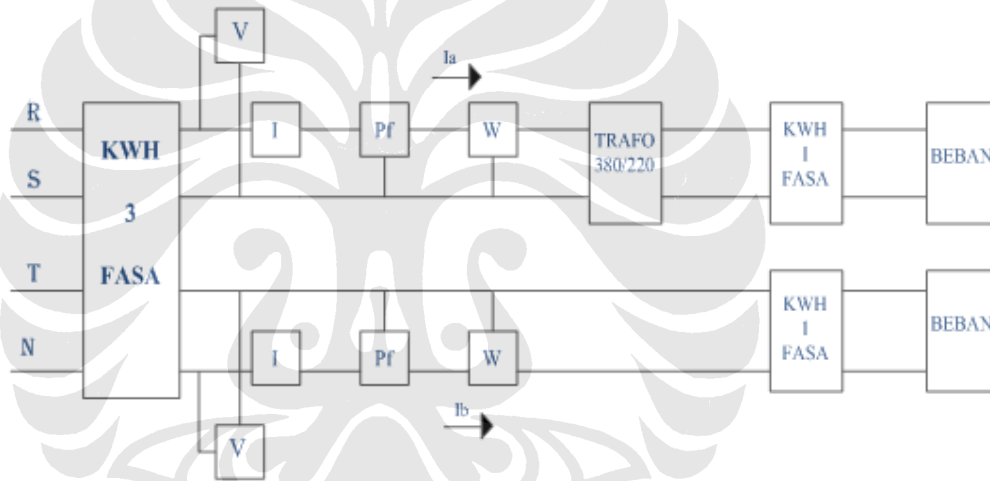
kWh-meter satu fasa digunakan untuk mencatat pemakaian listrik pada konsumen perumahan dengan tegangan 220 Volt, sedangkan kWh-meter tiga fasa digunakan pada konsumen industri yang menggunakan jaringan listrik tiga fasa. kWh-meter tiga fasa mencatat seluruh penggunaan energi listrik pada jaringan tiga fasa yang diukur. Berdasarkan persamaan (2.5), 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 (fasa-netral) tidak mencapai 220 Volt, tetapi berkisar 206-218 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 transformator (fasa-fasa) lalu ke kwhmeter satu fasa dan fasa-netral lalu ke kwhmeter satu fasa untuk mengukur pemakaian energi.

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

a. kWh-meter satu fasa merk Schlumberger buatan Indonesia tahun 2002 jenis M2XS4V3 kelas 2 seperti pada gambar di bawah.

KWh-meter ini dibebani dengan beban resistif berupa lampu pijar dengan total daya sebesar 1000 Watt (*name plate*) selama 1(satu) jam. Berikut data pengujiannya :

$$P_f = 1$$

$$V = 212 \text{ Volt}$$

$$I = 4,35 \text{ Ampere}$$

$$P \text{ terukur pada Wattmeter} = 950 \text{ Watt}$$

Dengan hasil pengukuran pada kwh meter satu fasa 0,925 kwh,maka didapat persen kesalahan (error) sebesar 2,6%.



Gambar 3.2 KWh-meter satu fasa merk Schlumberger

b. KWh-meter satu fasa merk Actaris buatan Indonesia oleh PT. Mecoindo tahun 2002 jenis M2XS4V3 kelas 2 seperti pada gambar di bawah.

KWh-meter ini dibebani dengan beban resistif berupa lampu pijar dengan total daya sebesar 1000 Watt (*name plate*) selama 1(satu) jam. Berikut data pengujiannya :

$$Pf = 1$$

$$V = 213 \text{ Volt}$$

$$I = 4,32 \text{ Ampere}$$

$$P \text{ terukur pada Wattmeter} = 945 \text{ Watt}$$

Dengan hasil pengukuran pada kwh meter satu fasa 0,915 kwh,maka didapat persen kesalahan (error) sebesar 3,1%.



Gambar 3.3 KWh-meter satu fasa merk Actaris

c. 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 $2,71 \text{ kWh}$. Maka terdapat *error* sebesar 2,87%.



Gambar 3.4 kWh-meter tiga fasa

Kemudian, arus untuk tiap fasa diukur dengan menggunakan tiga buah amperemeter AC. Pada gambar 3.1, jalur (*line*) 1 (fasa-fasa) dihubungkan dengan $\cos \phi$ -meter dan wattmeter sebagai referensi daya yang terukur dengan faktor daya tertentu. Pada *line* 2 (fasa-netral), juga dilakukan pengukuran daya dan faktor daya dengan menggunakan $\cos \phi$ -meter dan wattmeter. Sedangkan pengukuran tegangan pada tiap fasa, dilakukan juga secara bergiliran untuk setiap *linenya*.

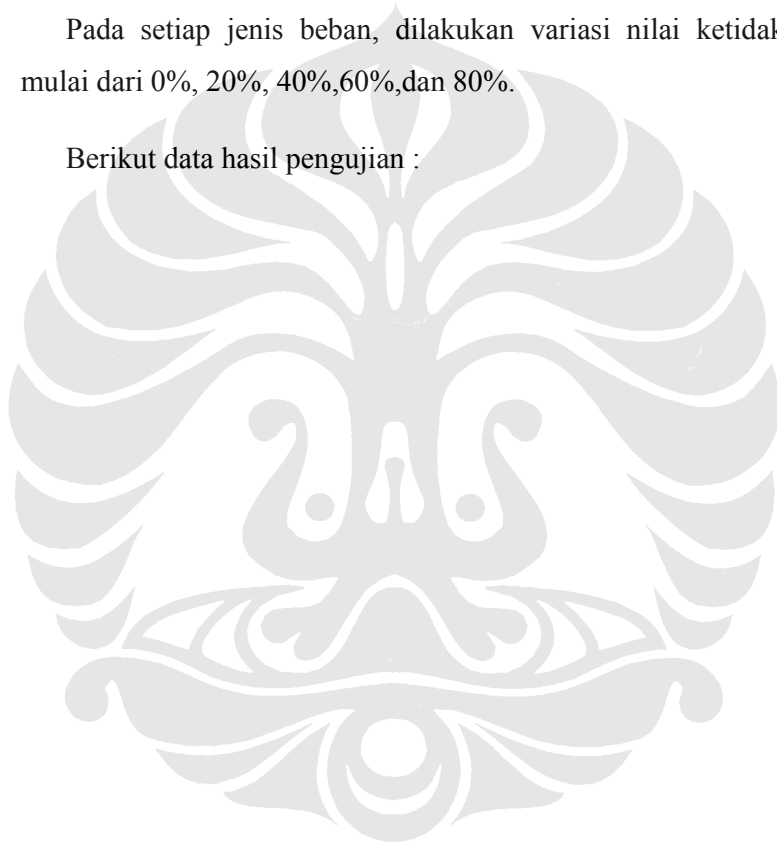
Pengujian dilakukan dari pagi hari lebih kurang pk 14.00 sampai siang hari pk 20.00. Durasi pengujian tiap data adalah 30 menit dan 1 jam untuk data-data tertentu. Jeda pengambilan tiap data adalah lebih kurang 15 menit, sehingga keadaan rangkaian untuk setiap data yang diambil berurutan tidak banyak 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) seimbang dan beban linier tidak seimbang, beban Non Linier seimbang,serta beban Non Linier tidak seimbang.

Pada setiap jenis beban, dilakukan variasi nilai ketidakseimbangan beban mulai dari 0%, 20%, 40%,60%,dan 80%.

Berikut data hasil pengujian :



Tabel 3.1 Data Pengujian untuk Beban Linier Seimbang

| No. | Beban _s (VA) | Beban _s (VA) | I _s (A) | I _s (A) | V _s (V) | V _s (V) | P _s (W) | P _s (W) | KWh _s (kWh) | KWh _s (kWh) | ΣKWh 1φ (kWh) | KWh 3φ (kWh) |
|-----|----------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------|------------------|-----------------|
| 1. | 1000 | 1000 | 2,51 | 4,31 | 371,53 | 212,8 | 927,3 | 916,7 | 0,913 | 0,935 | 1,847 | 1,73 |
| 2. | 800 | 800 | 2,03 | 3,517 | 369 | 210,1 | 751 | 738 | 0,732 | 0,723 | 1,455 | 1,38 |
| 3. | 600 | 600 | 1,49 | 2,542 | 370,5 | 212,4 | 557,1 | 550,1 | 0,549 | 0,545 | 1,094 | 1,05 |
| 4. | 400 | 400 | 1,05 | 1,705 | 370 | 212,7 | 385 | 363,3 | 0,365 | 0,375 | 0,740 | 0,71 |
| 5. | 200 | 200 | 0,573 | 0,865 | 373,3 | 215,93 | 210,2 | 185,7 | 0,186 | 0,188 | 0,374 | 0,36 |

Tabel 3.2 Data Pengujian untuk Beban Linier tak Seimbang

| No. | Beban ₁ (VA) | Beban ₂ (VA) | I ₁ (A) | I ₂ (A) | V ₁ (V) | V ₂ (V) | P ₁ (W) | P ₂ (W) | KWH ₁ (kWh) | KWH ₂ (kWh) | ΣKWH 1φ (kWh) | KWH 3φ (kWh) |
|-----|----------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------|------------------|-----------------|
| 1. | 1000 | 1000 | 2,49 | 4,410 | 373,5 | 210,4 | 929,3 | 921,6 | 0,918 | 0,925 | 1,843 | 1,77 |
| 2. | 1000 | 800 | 2,52 | 3,52 | 372,6 | 209 | 931,7 | 744,2 | 0,921 | 0,734 | 1,655 | 1,56 |
| 3. | 1000 | 600 | 2,48 | 2,536 | 371,9 | 212 | 927 | 531,3 | 0,918 | 0,525 | 1,143 | 1,09 |
| 4. | 1000 | 400 | 2,46 | 1,683 | 372,3 | 212 | 912 | 353,6 | 0,901 | 0,350 | 1,251 | 1,16 |
| 5. | 1000 | 200 | 2,42 | 0,820 | 372,7 | 211 | 903 | 172,2 | 0,893 | 0,171 | 1,064 | 0,98 |
| 6. | 1045 | - | 2,44 | - | 372 | - | 905 | - | 0,899 | - | 0,899 | 0,81 |

Pembebanan Non Linier Seimbang

Tabel 3.3 Data Pengujian untuk Beban Non Linier Seimbang

| No. | Beban _s (VA) | Beban _s (VA) | I _s (A) | I _s (A) | V _s (V) | V _s (V) | P _s (W) | P _s (W) | %THD _v | %THD _i | KWH _s (kWh) | KWH _s (kWh) | $\sum KWH$ 1 ϕ (kWh) | KWH 3 ϕ (kWh) |
|-----|----------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| 1. | 1100 | 1100 | 2,885 | 4,740 | 382,86 | 218,04 | 1090 | 1040 | 12,37 | 15,15 | 0,980 | 0,970 | 1,87 | 1,87 |
| 2. | 900 | 900 | 2,387 | 4,059 | 380,7 | 219 | 904,1 | 880,6 | 11,06 | 15,63 | 0,820 | 0,880 | 1,62 | 1,62 |
| 3. | 400 | 400 | 1,092 | 1,930 | 364,7 | 211,92 | 404,5 | 410 | 43,28 | 41,23 | 0,365 | 0,386 | 0,71 | 0,71 |
| 4. | 200 | 200 | 0,593 | 0,985 | 373,3 | 217,9 | 210,8 | 213,5 | 65,3 | 40,7 | 0,186 | 0,188 | 0,34 | 0,24 |

Catatan : THD (Total Harmonic Distortion) pada komponen tegangan tidak dimasukkan oleh karena persentasenya yang kecil terhadap nilai tegangan fundamentalnya, yaitu berkisar antara 2%-3%.

Pembebanan Non Linier Tidak Seimbang

Tabel 3.4 Data Pengujian untuk Beban Non Linier tak Seimbang

| No. | Beban _a (VA) | Beban _b (VA) | I _a (A) | I _b (A) | V _a (V) | V _b (V) | P _a (W) | P _b (W) | %THD _a | %THD _b | KWH _a (kWh) | KWH _b (kWh) | ΣKWH 1 ϕ (kWh) | ΣKWH 3 ϕ (kWh) |
|-----|----------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1. | 1000 | 1000 | 2,752 | 4,740 | 372,8 | 218,04 | 989,6 | 985 | 11,37 | 8,27 | 0,920 | 0,930 | 1,850 | 1,79 |
| 2. | 1000 | 1000 | 2,752 | 4,810 | 372,8 | 219 | 989,6 | 990,6 | 11,37 | 14,49 | 0,920 | 0,850 | 1,770 | 1,69 |
| 3. | 1000 | 1000 | 2,752 | 4,760 | 372,8 | 211,92 | 989,6 | 979 | 11,37 | 14,7 | 0,920 | 0,936 | 1,856 | 1,75 |
| 4. | 1000 | 1000 | 2,752 | 4,630 | 372,8 | 217,9 | 989,6 | 983 | 11,37 | 13,26 | 0,920 | 0,950 | 1,870 | 1,70 |

BAB IV

ANALISIS HASIL

PENGUKURAN

Skripsi ini bertujuan untuk melihat perbedaan hasil pengukuran yang didapat dengan menjumlahkan hasil pengukuran menggunakan kWh-meter satu fasa pada jalur fasa-fasa dengan penggunaan kWh-meter pada fasa-netral dengan hasil pengukuran yang didapat dari pengukuran energi terpakai menggunakan kWh-meter tiga fasa. Nilai keduanya mempunyai selisih yang dikaitkan dengan ketidakseimbangan beban yang dicatu pada sistem tiga fasa.

Nilai ketidakseimbangan dihitung dengan membandingkan selisih terbesar dari daya beban antara dua jalur. 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.

Secara garis besar, pengambilan data dibagi menjadi :

- 1) Pembebanan linier seimbang
 - Pembebanan Linier Seimbang
 - Pembebanan Linier tidak seimbang
- 2) Pembebanan Harmonik
 - Pembebanan Non Linier seimbang
 - Pembebanan Non Linier tidak seimbang

Berikut adalah data %error (perbedaan) pengukuran pada kwhmeter 3 fasa dengan penjumlahan kwhmeter 1 fasa akibat pemasangan trafo :

| No | Beban (VA) | W1 (KW) | W2 (KW) | ΣKWH 1 ϕ (kWh) | KWH 3 ϕ (kWh) | Beda akibat trafo (P1-P2) | %error |
|----|------------|---------|---------|-----------------------------|----------------------|---------------------------|--------|
| 1 | 1000 | 0,9216 | 0,8473 | 1,847 | 1,73 | 0,0743 | 9,9 |
| 2 | 800 | 0,7390 | 0,6795 | 1,455 | 1,38 | 0,0595 | 8,85 |
| 3 | 600 | 0,5630 | 0,5203 | 1,094 | 1,05 | 0,0427 | 7,57 |
| 4 | 400 | 0,3876 | 0,3540 | 0,740 | 0,71 | 0,0336 | 8,15 |
| 5 | 200 | 0,2010 | 0,1860 | 0,374 | 0,36 | 0,0150 | 7,94 |
| 6 | 0 | 0,0267 | 0,0004 | 0 | 0 | 0,0263 | 100 |

Catatan : W1 = besar nilai daya terukur antara trafo dengan kwhmeter 3 fasa pada jalur a

W2 = besar nilai daya terukur antara trafo dengan kwh meter 1 fasa pada jalur a

Tabel di atas menunjukkan %error (perbedaan) akibat pemasangan trafo. Data besar nilai kwhmeter 1 fasa dan 3 fasa diambil dari tabel pembebanan linier seimbang. Contoh perhitungan untuk mendapatkan %error adalah sebagai berikut:

Data no 1.

$$\%error = \frac{(1,847 + 0,0743) - 1,73}{(1,847 + 0,073)} \times 100\% = 9,92\%$$

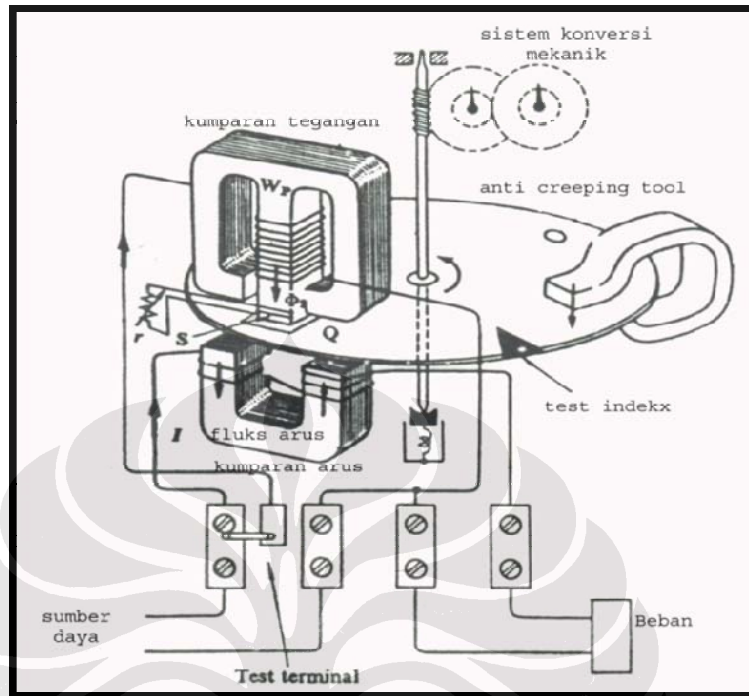
Atau dapat juga dikatakan =

$$\frac{(\sum KWH_{1fasa} + Daya_{ditarik_oleh_trafo}) - Nilai_terukur_pada_kwh_3_fasa}{(\sum KWH_{1fasa} + Daya_{ditarik_oleh_trafo})} \times 100\%$$

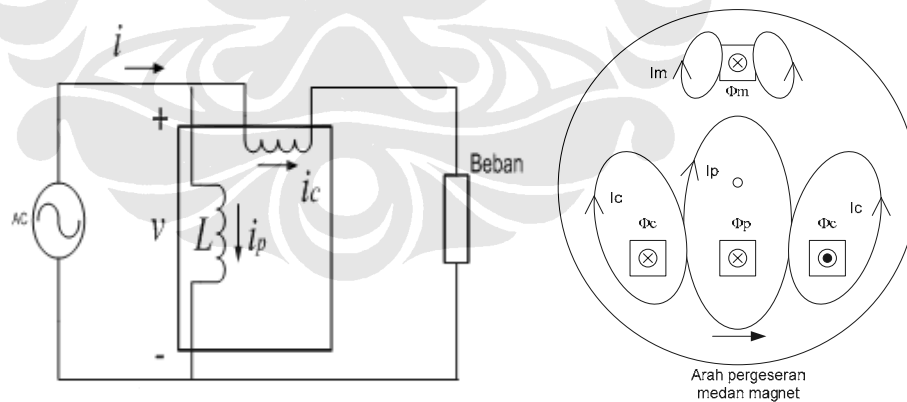


Dari grafik di atas dapat kita lihat bahwa error akibat pemasangan trafo pada kisaran nilai beban total (jumlah total beban ke 2 jalur) 400 VA hingga 2000 VA kurang lebih dapat dikatakan sama, yakni berkisar antara 7,57% - 9,9%. Namun nilai error yang ekstrem sebesar 100% dapat kita lihat pada data ke-1 yakni dengan pembebanan sebesar 0 KVA. Hal ini karena trafo dianggap sebagai error, sehingga ketika kondisi tidak berbeban, hanya terdapat nilai beban akibat trafo sehingga %error sebesar 100%.

Berikut adalah prinsip kerja kwh meter analog:



Gambar 4.2 Konstruksi KWh meter analog tipe induksi



Gambar 4.3 Ilustrasi besaran-besaran pada KWh meter

Tegangan beban, $v = V \cdot \sin \omega t$

Arus beban, $i = I \cdot \sin (\omega t - \varphi)$

Dimana φ adalah sudut fasa antara v dan i , V dan I adalah nilai maksimum dari tegangan dan arus.

Kumparan tegangan L adalah reaktansi murni ($X_L \gg R$), sehingga arus dari kumparan tegangan adalah

$$i_p = \frac{V}{X_L} \cdot \sin(\omega t - 90^\circ)$$

Dan arus dari kumparan arus diasumsikan tetap

$$i_c = I \cdot \sin(\omega t - \varphi)$$

Kedua arus ini menghasilkan fluks magnetis sebagai berikut :

$$\phi_p = B_p \cdot A_p = K_p \cdot i_p = K_p \cdot V \cdot \sin(\omega t - 90)$$

$$\phi_c = B_c \cdot A_c = K_c \cdot i_c = K_c \cdot I \sin(\omega t - \varphi)$$

Dimana K adalah konstanta fluks dari KWh meter, $K = \frac{\mu \cdot n \cdot A}{l}$, kecuali untuk fluks tegangan yang dipengaruhi oleh reaktansi kepingan X_L , dan indeks P dan C menandakan sumber dari fluks, yaitu P untuk tegangan dan C untuk arus.

Sehingga dapat dikatakan

$$V \approx \Phi_p \text{ dan } I \approx \Phi_c, \text{ dengan fasa } \phi_p \text{ ketinggalan } (90 - \varphi) \text{ dari } \phi_c$$

Fluks magnetis bolak-balik ini menghasilkan tegangan induksi pada piringan yang bergantung dari lilitan kumparan N arus dan tegangan, yaitu :

$$\varepsilon_p = -N_p \cdot \left(\frac{d\phi_p}{dt} \right) = -N_p \cdot K_p \cdot V \cdot \omega \cdot \cos(\omega t - 90) = -K_p' \cdot \omega V \cdot \sin \omega t$$

$$\varepsilon_c = -N_c \cdot \left(\frac{d\phi_c}{dt} \right) = -N_c \cdot K_c \cdot I \cdot \omega \cdot \cos(\omega t - \varphi) = K_c' \cdot \omega I \cdot \sin(\omega t - \varphi - 90)$$

Dapat dikatakan, $\varepsilon_p \approx \omega V$ dan $\varepsilon_c \approx \omega I$

Pada akhirnya, tegangan induksi ini menghasilkan arus-arus putar pada piringan, sesuai dengan persamaan berikut :

$$i_{eP} = -K_p' \cdot \frac{\omega V}{Z} \cdot \sin(\omega t - \beta) = -K_p'' \cdot \omega V \cdot \sin(\omega t - \beta)$$

$$i_{eC} = K_c' \cdot \frac{\omega I}{Z} \cdot \sin((\omega t - \varphi - 90) - \beta) = -K_c'' \cdot \omega I \cdot \sin((\omega t - \varphi - 90) - \beta)$$

Dimana Z adalah impedansi piringan (yang merupakan konstanta KWh meter) dan β adalah sudut impedansi piringan

Diagram vektor dari penjelasan diatas adalah sebagai berikut

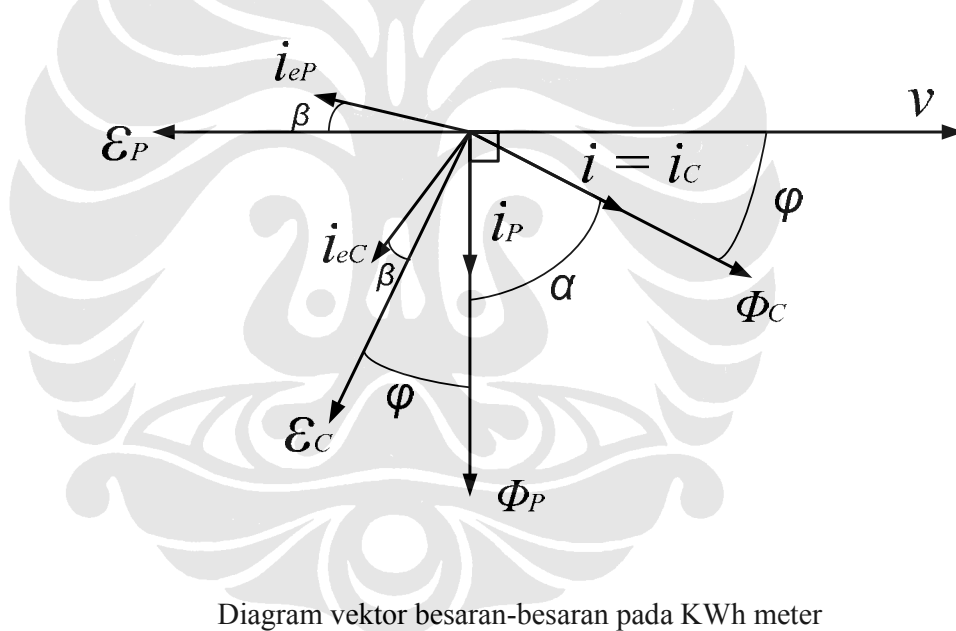


Diagram vektor besaran-besaran pada KWh meter

Tampak bahwa $\varphi = 90 - \alpha$

Sesuai dengan hukum Lorentz, maka interaksi antara arus-arus putar dengan fluks-fluks magnetis akan menghasilkan suatu torsi mekanis berikut,

$$\tau = F \cdot d = (n \cdot B \cdot i \cdot l \cdot \cos \delta) \cdot d = \left(n \cdot \frac{\phi}{A} \cdot i \cdot l \cdot \cos \delta \right) \cdot d = \frac{n \cdot l \cdot d \cdot \cos \delta}{A} \cdot \phi \cdot i$$

Karena n , l , d , $\cos \delta$ adalah konstanta yang tergantung dari KWh meter, maka, $T \approx \phi.i$

Untuk torsi akibat interaksi antara arus putar dari arus beban (i_{eC}) dengan fluks magnetis dari tegangan beban (ϕ_p) disebut τ_1 , dan torsi akibat interaksi antara arus putar dari tegangan beban (i_{eP}) dengan fluksi magnetis dari arus beban (ϕ_C) disebut τ_2 .

$$\tau_1 \approx i_{eC} \cdot \phi_p \approx \{ \omega \cdot I \cdot \sin((\omega t - \varphi - 90) - \beta) \} \cdot \{ V \cdot \sin(\omega t - 90) \}$$

$$\tau_2 \approx i_{eP} \cdot \phi_C \approx \{ -\omega \cdot V \cdot \sin(\omega t - \beta) \} \cdot \{ I \cdot \sin(\omega t - \varphi) \}$$

Dengan bantuan persamaan matematis sinusoidal, maka dihasilkan :

$$\tau_1 \approx \frac{1}{2} \omega \cdot V \cdot I \{ \cos(\varphi + \beta) + \cos(2\omega t - \varphi - \beta) \}$$

$$\tau_2 \approx -\frac{1}{2} \omega \cdot V \cdot I \{ \cos(-\varphi + \beta) - \cos(2\omega t - \varphi - \beta) \}$$

Jadi kepingan logam akan mendapatkan suatu gaya, yang berbanding lurus terhadap $i_{eC} \phi_p$, dan akan mempunyai tendensi berputar pada sumbunya. Akan tetapi seperti telah sering dijelaskan sampai saat ini, bila frekuensi kerjanya adalah diatas beberapa hertz (Hz), maka pengaruh dari unsur kedua dalam kurung diatas, dapat diabaikan, dan kepingan dapat dianggap berputar sebanding dengan unsur pertama saja.

Demikian pula maka kepingan logam akan berputar dibawah pengaruh dari i_{eP} dan ϕ_C didalam arah yang berlawanan dengan keadaan sebelumnya. Jadi pada akhirnya kepingan logam akan menerima suatu momen yang berbanding lurus terhadap perbedaan dari pada kedua momen yang berlawanan ini, dan dengan momen perbedaan inilah maka kepingan akan berputar pada sumbunya.

Momen tersebut diberikan dengan persamaan dibawah ini

$$\begin{aligned}\tau_D &\approx \tau_1 - \tau_2 \\ \tau_D &\approx \frac{1}{2} \omega V \cdot I \cdot \{(\cos(\varphi + \beta)) - (-\cos(-\varphi + \beta))\} \\ \tau_D &\approx \frac{1}{2} \omega V \cdot I \{2 \cdot \cos \beta \cdot \cos \varphi\} \\ \tau_D &\approx \omega V \cdot I \cdot \cos \beta \cdot \cos \varphi\end{aligned}$$

Dimana $\cos \beta$ adalah konstanta yang ditentukan oleh impedansi dari piringan metal terhadap arus-arus putar i_{eC} dan i_{eP} , dan pula oleh konstruksi dari pada alat ukur. Dan apabila konstanta-konstanta disatukan, maka

$$\tau_D = K \cdot \omega \cdot V \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Misalkan karena torsi ini, piringan aluminium berputar dengan kecepatan putaran N . Sambil berputar ini, piringan akan memotong garis-garis fluks magnetis dari magnet permanen ϕ_m , hal ini akan menghasilkan arus-arus putar yang baru pada piringan yang sesuai dengan :

$$\varepsilon_m = B \cdot l \cdot N = \frac{\phi_m}{A} \cdot l \cdot N$$

$$i_m = \frac{\varepsilon_m}{Z} = \frac{l}{Z} \cdot N \cdot \phi_m$$

Sehingga $i_m \approx N \cdot \phi_m$

Arus-arus putar ini akan berinteraksi dengan fluks magnetis yang dihasilkan magnet permanen, akibatnya piringan yang berputar mendapat torsi redaman

$$\tau_d \approx N \cdot \phi_m \cdot \phi_m \approx N \cdot \phi_m^2 \xrightarrow{\text{menjadi}} \tau_d = K_m \cdot N \cdot \phi_m^2$$

Apabila torsi-torsi τ_D dan τ_d berada dalam keadaan setimbang, maka

$$\tau_d = K_m \cdot N \cdot \phi_m^2$$

dan

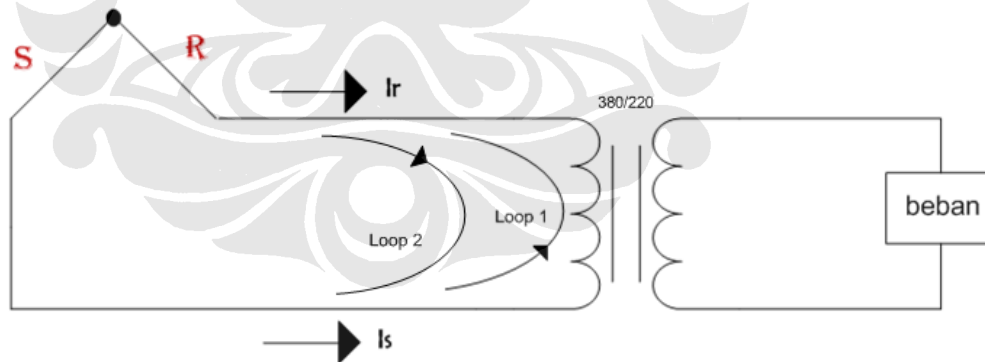
$$\tau_D = K \cdot \omega V I \cdot \cos \varphi$$

Sehingga,

$$N = \frac{K}{K_m \cdot \phi_m^2} \cdot \omega \cdot V \cdot I \cdot \cos \varphi \dots \dots \dots (4.1)$$

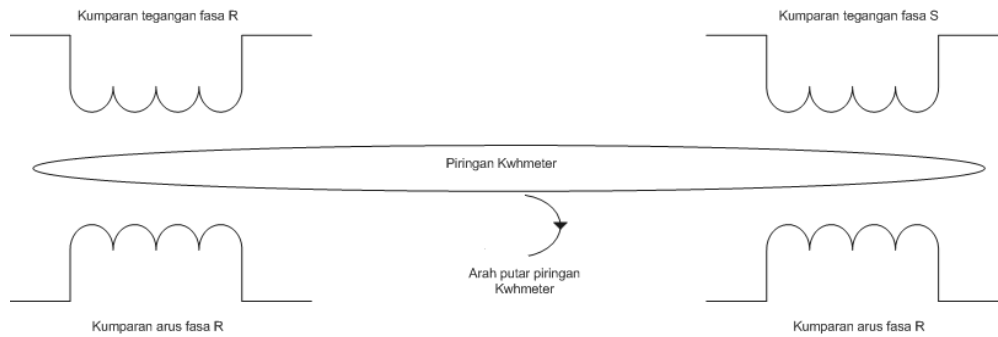
Sesuai dengan persamaan diatas maka torsi mekanik yang dihasilkan alat ukur tipe induksi berbanding lurus terhadap hasil kali tegangan beban dan arus beban serta faktor daya dari sistem.

Namun, persamaan yang didapatkan (persamaan 4.1) adalah nilai persamaan ketika kwhmeter bekerja dan tersambung dalam keadaan normal, yaitu terhubung secara fasa-netral. Sedangkan pada rangkaian percobaan di atas (pada jalur a), keluaran fasa R dan fasa S terhubung dengan masukan trafo sehingga, akan terjadi rangkaian tertutup yang akibatnya suplai arus dari fasa R akan melemahkan arus dari fasa S begitu juga sebaliknya. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar di bawah ini :



Dari gambar dapat kita lihat bahwa loop 1 adalah loop yang diakibatkan fasa S dan loop 2 diakibatkan fasa R. Maka dari gambar dapat dilihat bahwa antara loop 1 yang diakibatkan oleh nilai I_r bersifat melemahkan terhadap loop 2 yang terjadi oleh karena I_s begitupun sebaliknya.

Maka, apabila digambarkan rangkaian ganti kwhmeter menurut konstruksinya secara sederhana adalah sebagai berikut :



Pada kumparan arus fasa R, oleh karena terkena pengaruh akibat fasa S yang memiliki nilai sama besar dengannya maka terjadi hubungan yang saling menghilangkan. Begitu juga sebaliknya yang terjadi pada kumparan arus pada fasa S yang terpengaruh oleh fasa R. Hal tersebut mempengaruhi putaran piringan kwhmeter.

1. Pembebanan Linier

a) Pembebanan Linier Seimbang

Pengujian dengan beban linier yang diatur seimbang dilakukan sebanyak 5 kali variasi data selama masing-masing selama 1 jam. Pengujian dilakukan secara berurutan dengan rentang waktu antara pengambilan data masing-masing selama kurang lebih 5-15 menit. Dari besar nilai tegangan dan arus pada jalur a (fasa-netral) dapat dilihat bahwa pengujian mengukur parameter untuk jalur a pada titik antara keluaran kwh meter 3 fasa dengan masukan transformator. Dengan merujuk dari tabel 3.1, maka didapat :

Tabel 4.1 selisih nilai daya antara instan jalur a dengan jalur b

| No. | Beban _a (VA) | Beban _b (VA) | $\Delta(P_a - P_b)$ (Watt) |
|-----|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| 1. | 1000 | 1000 | 10,6 |
| 2. | 800 | 800 | 13 |
| 3. | 600 | 600 | 7 |
| 4. | 400 | 400 | 21,7 |
| 5. | 200 | 200 | 24,5 |

Tabel 4.1 menunjukkan selisih nilai daya (instan) terukur pada alat ukur. Dari tabel tersebut, dapat dilihat bahwa dengan adanya pemasangan transformator pada pembebanan seimbang pada tiap-tiap jalur menimbulkan perbedaan pengukuran nilai daya instan pada tiap jalurnya-nya. Perbedaan nilai tersebut menyebabkan rugi-rugi yang bertambah besar seiring dengan waktu. Rugi-rugi daya yang bertambah besar seiring lamanya penggunaan transformator antara lain disebabkan tidak adanya sistem pendingin (*cooling system*) yang terintegrasi pada transformator yang digunakan. Rugi-rugi daya tersebut terindikasi melalui naiknya temperatur pada trafo. Penambahan temperatur disebabkan karena pengambilan data dilakukan secara langsung dengan rentang waktu sekitar 5-15 menit sehingga tidak memungkinkan bagi transformator untuk kembali ke posisi awalnya dikarenakan selain tiadanya sistem pendingin yang terintegasi juga oleh karena isolasi pada trafo yang menyulitkan perpindahan kalor. Hal ini dapat dikompensasi dengan penggunaan sistem pendingin (*cooling system*) pada trafo.

Kelainan terlihat pada data ke-3 yang menunjukkan selisih nilai daya instan pada jalur a (fasa-netral) dan jalur b (fasa-fasa) sebesar 7 Watt. Dengan pemakaian transformator selama 3 jam (pemakaian trafo untuk data 1 dan data 2) selisih nilai daya instan pada jalur a dan jalur b seharusnya akan terjadi peningkatan temperatur pada transformator yang diikuti semakin besar pula daya yang terdisipasi. Maka, data ke-3 dianggap kurang baik yang terjadi kemungkinan oleh kesalahan pembacaan.

$$W(\text{watthour}) = P.T$$

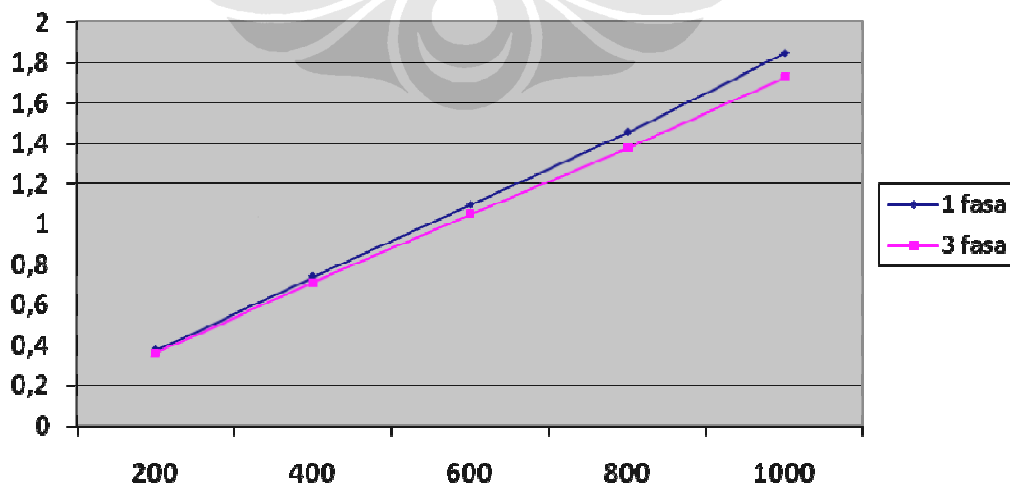
Dengan : P = daya hilang akibat panas (Watt), dan

T = Waktu (jam atau hour)

Persamaan di atas menunjukkan besarnya energi yang hilang yang dapat dihitung melalui perkalian antara besarnya daya hilang dengan lama penggunaan transformator

Tabel 4.2 perhitungan error pada pembebanan liner seimbang

| No. | Load(VA) | $\Sigma W 1\phi$ (kWh) | $W 3\phi$ (kWh) | % Perbedaan |
|-----|----------|---------------------------|--------------------|-------------|
| 1. | 1000 | 1,847 | 1,73 | 6,3% |
| 2. | 800 | 1,455 | 1,38 | 5,1% |
| 3. | 600 | 1,094 | 1,05 | 4,0% |
| 4. | 400 | 0,740 | 0,71 | 4,0% |
| 5. | 200 | 0,374 | 0,36 | 3,7% |



Grafik 4.1 perbandingan pengukuran kWh-meter 1 dan 3 fasa untuk beban linier seimbang

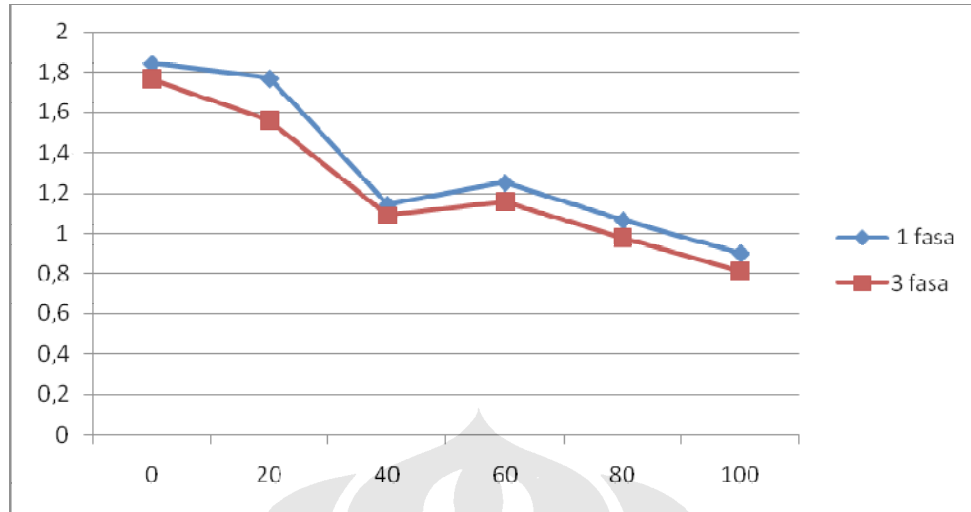
Grafik hasil pengukuran di atas menunjukkan bahwa pada tingkat nilai pembebanan rendah, hasil pengukuran dengan menggunakan kWh-meter tiga fasa lebih rendah dibanding hasil pengukuran langsung menggunakan kWh-meter tiga fasa. Namun, perbedaan nilai keduanya tidak terlalu signifikan. Hal ini dapat dilihat dari garis yang hampir bertimpangan. Sedangkan pada pembebanan tinggi, hasil pengukuran langsung hasil pengukuran dengan menggunakan kWh-meter tiga fasa tetap lebih rendah dibanding hasil pengukuran langsung menggunakan kWh-meter tiga fasa. Namun perbedaan nilai keduanya semakin terlihat jelas berbeda. Hal ini menunjukkan pada nilai pembebanan yang besar dan waktu pengukuran yang lama, maka perbedaan pengukuran antara menggunakan kwh meter 1 fasa dengan kwhmeter 3 fasa akan berbeda dikarenakan pengukuran yang lebih akurat.

b. Pembebanan Linier Tidak Seimbang

Pengujian dengan beban linier yang diatur tidak seimbang dilakukan sebanyak 5 kali variasi data selama masing-masing selama 1 jam. Pengujian dilakukan secara berurutan dengan rentang waktu antara pengambilan data masing-masing selama kurang lebih 5-15 menit. Dari besar nilai tegangan dan arus pada jalur a dapat dilihat bahwa pengujian mengukur parameter untuk jalur a pada titik antara keluaran kWh meter 3 fasa dengan masukan transformator.

Tabel 4.3 perbandingan pengukuran kWh-meter 1 dan 3 fasa untuk beban linier tidak seimbang

| No | % ketidakseimbangan | $\sum kWh1\phi$ | $kWh3\phi$ |
|----|---------------------|-----------------|------------|
| 1. | 0 | 1,843 | 1,77 |
| 2. | 20 | 1,655 | 1,56 |
| 3. | 40 | 1,143 | 1,09 |
| 4. | 60 | 1,251 | 1,16 |
| 5. | 80 | 1,064 | 0,98 |
| 6. | 100 | 0,899 | 0,81 |



Grafik 4.2 perbandingan pengukuran kWh-meter 1 dan 3 fasa untuk beban linier tidak seimbang

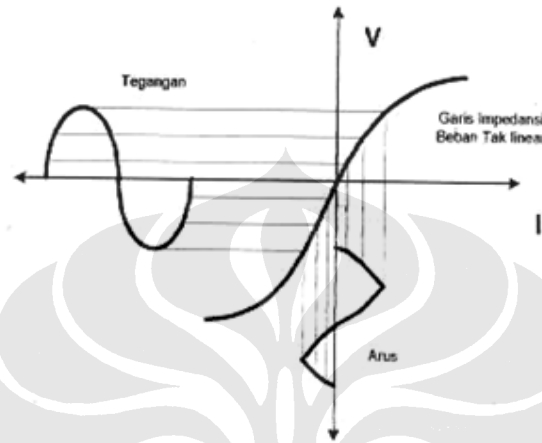
Grafik hasil pengukuran di atas menunjukkan bahwa pada tingkat ketidakseimbangan rendah, hasil pengukuran dengan menggunakan kWh-meter tiga fasa lebih rendah dibanding hasil pengukuran menggunakan penjumlahan kWh-meter satu fasa. Kesamaan hasil pengukuran dengan menggunakan kWh-meter satu fasa dan kWh-meter tiga fasa terjadi pada kisaran persentase ketidakseimbangan 40%.

Selain berpengaruh terhadap perbedaan hasil pengukuran dengan menggunakan kWh-meter satu fasa dan kWh-meter tiga fasa, ketidakseimbangan beban linier juga secara teori juga berpengaruh terhadap pemanasan transformator karena meningkatnya arus netral. Selain itu karena rentang waktu pengambilan data yang cukup sempit antara data satu dengan data yang lainnya membuat transformator belum kembali ke keadaan normalnya.

2. Pembebanan Non Linier

Pada sistem tenaga listrik dikenal dua jenis beban yaitu beban linier dan beban non linier. Pada beban linier, arus yang mengalir berbanding lurus dengan

perubahan tegangan. Sebaliknya, pada beban non-linier, arus tidak berbanding lurus dengan tegangan. Jenis beban ini akan menghasilkan gangguan/distorsi gelombang arus yang tidak sinusoidal. Menurut pembagian jenis beban di atas, beban harmonik dapat dikatakan sebagai beban non linier.



Gambar 4.1 Karakteristik gelombang arus pada beban non linier

Sesuai dengan dasar teori yang telah dipaparkan terlebih dahulu, penggunaan beban non linier pada sistem menimbulkan pengaruh yang cukup besar pada pengukuran energi terpakai dengan menggunakan kwh meter analog metode induksi.

Sistem yang diberi pembebanan harmonik, memiliki beberapa nilai frekuensi yang merupakan perkalian antara nilai frekuensi dasarnya (fundamental) dengan bilangan bulat (1,2,3,4,...). Sehingga Pada dasarnya pengukuran energi terpakai menggunakan kwh meter analog tidaklah dapat dikatakan akurat, oleh karena hal yang telah disebutkan di atas.

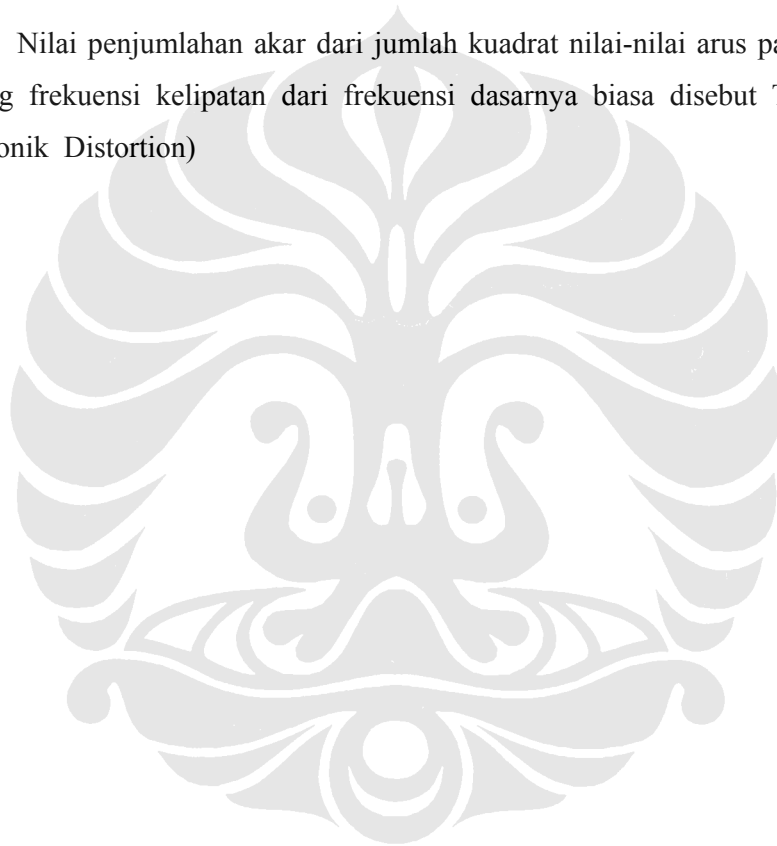
Sistem yang diberi pembebanan harmonik, memberikan arus balik (distorsi) yang merupakan akar dari jumlah kuadrat nilai-nilai arus pada masing-masing frekuensi kelipatan dari frekuensi dasarnya seperti tertulis pada persamaan 2.20 :

$$RMS = \sqrt{\sum_{h>1}^{h \rightarrow \infty} M_h^2} = M_1 \sqrt{1 + THD^2}$$

Dengan adanya arus balik ini, pengukuran energi terpakai dengan metode induksi menjadi tidak akurat akibat adanya arus balik yang berlawanan arah dengan arus fundamental yang cenderung memperkecil nilai arus fundamental tersebut. Sehingga antara energi terpakai dengan energi terukur pada kwh meter tipe induksi berbeda. Sehingga dari persamaan 4.1, didapat :

$$N = \frac{K}{K_m \cdot \phi_m^2} \cdot \omega \cdot V \cdot [(I_{fundamental}) - (I_{harmonik})] \cdot \cos \varphi \dots\dots\dots(4.2)$$

Nilai penjumlahan akar dari jumlah kuadrat nilai-nilai arus pada masing-masing frekuensi kelipatan dari frekuensi dasarnya biasa disebut THD (Total Harmonik Distortion)



a. Pembebanan Non Linier Seimbang

Tabel 4.4 Data Pengujian untuk Beban Non Linier Seimbang

| No. | Beban _s (VA) | Beban _s (VA) | I _s (A) | I _s (A) | V _s (V) | V _s (V) | P _s (W) | P _s (W) | %THD _v | %THD _i | KWH _s (kWh) | KWH _s (kWh) | ΣKWH 1 ϕ (kWh) | KWH 3 ϕ (kWh) |
|-----|----------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| 1. | 1100 | 1100 | 2,885 | 4,740 | 382,86 | 218,04 | 1090 | 1040 | 12,37 | 15,15 | 0,980 | 0,970 | 1,87 | 1,87 |
| 2. | 900 | 900 | 2,387 | 4,059 | 380,7 | 219 | 904,1 | 880,6 | 11,06 | 15,63 | 0,820 | 0,880 | 1,62 | 1,62 |
| 3. | 400 | 400 | 1,092 | 1,930 | 364,7 | 211,92 | 404,5 | 410 | 43,28 | 41,23 | 0,365 | 0,386 | 0,71 | 0,71 |
| 4. | 200 | 200 | 0,593 | 0,985 | 373,3 | 217,9 | 210,8 | 213,5 | 65,3 | 40,7 | 0,186 | 0,188 | 0,34 | 0,24 |

Catatan : THD (Total Harmonic Distortion) pada komponen tegangan tidak dimasukkan oleh karena persentasenya yang kecil terhadap nilai tegangan fundamentalnya, yaitu berkisar antara 2%-3%.

Dari tabel 4.4 di atas dapat dengan jelas kita lihat bahwa %THD (Total Harmonik Distortion) berpengaruh pada pengukuran menggunakan kwh meter analog melalui adanya daya yang tidak terukur (daya rugi) akibat adanya nilai arus balik yang melawan arah arus frekuensi dasar (fundamental). Dengan adanya nilai arus balik tersebut, besar daya yang terukur pada kwh meter adalah hasil kali perkalian antara tegangan terukur yang dikalikan dengan selisih nilai arus fundamental dengan besar nilai arus harmonik. Sehingga dapat dikatakan semakin besar nilai %THD suatu beban maka akan semakin besar pula selisih antara pengukuran besar energi yang disuplai sistem dengan energi yang tercatat pada alat ukur energi (kwh meter analog) dekat beban.

Dari tabel 4.4, dapat terlihat bahwa dengan pemasangan trafo pada jalur a, terlihat %THD yang berbeda antara jalur a dengan jalur b untuk pembebanan yang seimbang. %THD pada jalur yang menggunakan trafo cenderung lebih kecil jika dibandingkan dengan jalur tanpa menggunakan trafo. Pada data 1 dan 2 selisih %THD antara jalur a dengan jalur b berkisar antara 3%-4%. Maka, dapat dikatakan bahwa dengan adanya pemasangan trafo pada jalur a dapat meredam distorsi harmonik akibat pemasangan beban non linier walau untuk besar redaman yang relatif kecil. Selisih nilai %THD cukup besar tampak pada data ke 4 yaitu sebesar 24,6%. Hal ini dikarenakan besar nilai pembebanan yang relatif kecil. Namun, pada data ke 3 nampak sedikit perbedaan, yakni %THD pada jalur b lebih besar dibandingkan dengan jalur a dengan selisih sebesar 2,05%. Hal ini mungkin antara lain disebabkan oleh kondisi pembebanan yang sulit untuk dijaga secara konstan (pembebanan dengan komputer yang bekerja labil).

b. Pembebanan Non Linier Tidak Seimbang

Tabel 4.5 Data Pengujian untuk Beban Non Linier tak Seimbang

| No. | Beban _s (VA) | Beban _s (VA) | I _s (A) | I _s (A) | V _s (V) | V _s (V) | P _s (W) | P _s (W) | %THD _v | %THD _i | KWH _s (kWh) | KWH _s (kWh) | ΣKWH 1 ϕ (kWh) | ΣKWH 3 ϕ (kWh) |
|-----|----------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1. | 1000 | 1000 | 2,752 | 4,740 | 372,8 | 218,04 | 989,6 | 985 | 11,37 | 8,27 | 0,920 | 0,930 | 1,850 | 1,79 |
| 2. | 1000 | 1000 | 2,752 | 4,810 | 372,8 | 219 | 989,6 | 990,6 | 11,37 | 14,49 | 0,920 | 0,850 | 1,770 | 1,69 |
| 3. | 1000 | 1000 | 2,752 | 4,760 | 372,8 | 211,92 | 989,6 | 979 | 11,37 | 14,7 | 0,920 | 0,936 | 1,856 | 1,75 |
| 4. | 1000 | 1000 | 2,752 | 4,630 | 372,8 | 217,9 | 989,6 | 983 | 11,37 | 13,26 | 0,920 | 0,950 | 1,870 | 1,70 |

Dari tabel di atas dapat kita lihat bahwa pada percobaan ketidakseimbangan beban menurut besar %THD. Variasi data yang dilakukan dengan cara membebani jalur a dengan jalur b sebesar 1 KVA, namun dibuat berbeda besarnya nilai %THD.

Pengujian dilakukan dengan mengatur beban non linier yang mempunyai %THD berbeda yang dilakukan secara bervariasi. Pengujian dilakukan secara berurutan dengan rentang waktu antara pengambilan data masing-masing selama kurang lebih 5-15 menit. Dari besar nilai tegangan dan arus pada jalur a dapat dilihat bahwa pengujian mengukur parameter untuk jalur a pada titik antara keluaran kwh meter 3 fasa dengan masukan transformator.

Dari tabel tampak bahwa hasil yang didapat tidak terlalu banyak berbeda antar data. Hal tersebut dikarenakan semua jumlah nilai pada setiap variasi beban sama. Hal tersebut diperkuat dengan kecilnya %THD antar variasi data yang menyebabkan perbedaan data tampak kurang terlihat. Hal ini terjadi karena dipakainya Pendingin ruangan (AC) sebagai beban oleh karena rating yang dimiliki cukup besar untuk mendapatkan variasi data sebesar 1 KVA. Perbedaan yang sedikit mencolok tampak pada data percobaan ke 2 dan ke 3 di mana pada data tersebut terdapat nilai %THD yang cukup besar pada variasi pembebanan non linier tidak seimbang ini yaitu sebesar 14,40% dan 14,7 pada jalur b (fasa-netral).

BAB V

KESIMPULAN

Dari pembahasan bab-bab sebelumnya maka dapat diambil beberapa kesimpulan diantaranya:

1. Pengukuran pada jalur fasa-netral dengan fasa-fasa menggunakan transformator akan terdapat perbedaan yang disebabkan antara lain oleh karena rugi-rugi akibat transformator.
2. Besar penjumlahan nilai yang terukur pada kwhmeter 1 fasa akan lebih besar jika dibandingkan dengan pengukuran dengan menggunakan kwhmeter 3 fasa secara langsung yang disebabkan oleh karena adanya arus balik.
3. Pada pembebanan dengan beban non linier, pemasangan transformator rating 1KVA dengan beban kurang lebih 1 KVA dapat meredam distorsi harmonik sebesar 3%-4%.
4. Distorsi harmonik yang dihasilkan oleh beban nonlinier akan menyebabkan perbedaan antara pengukuran daya yang terukur, pada kwh analog cenderung lebih kecil dibandingkan yang terserap oleh sistem.

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

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

