

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

1.1. Daya dan Energi Listrik pada Rangkaian 1 Fasa

Dalam rangkaian listrik, daya dan energi merupakan suatu besaran yang penting. Daya listrik pada suatu elemen adalah hasil kali dari tegangan dan arus yang mengalir pada elemen tersebut. Daya sesaat adalah perubahan tenaga yang diserap oleh suatu unsur rangkaian yang berubah sebagai fungsi waktu (Budiono, 1995:183). Ukuran daya yang sangat penting terutama untuk arus dan tegangan berulang, adalah daya rata-rata. Daya rata-rata ini sama dengan kecepatan rata-rata tenaga yang diserap oleh suatu unsur tidak bergantung pada waktu. Daya tersebut antara lain adalah yang dimonitor oleh perusahaan listrik dalam menentukan daya listrik bulanan yang dicapai.

Daya rata-rata lebih penting artinya daripada daya sesaat. Daya sesaat terdiri dari dua komponen, komponen $VI \cos \phi$ dan komponen sinusoida menurut waktu $VI \sin(2\omega t + \phi)$ yang frekuensinya $2x$ frekuensi tegangan atau arusnya. Jika diambil nilai rata-ratanya, maka hanyalah suku konstan yang memberikan andil. Oleh karena itu, daya rata-rata P yang diberikan pada rangkaian tersebut adalah: (Budiono, 1995:187)

$$P = V \times I \times \cos \phi \quad (2-1)$$

Tenaga keseluruhan sama dengan jumlah tenaga yang dilepaskan dalam setiap selang dt selama satu periode T daya itu diberikan. Tenaga dalam suatu differensial selang waktu dt adalah $p dt$, karena daya di definisikan sebagai aliran tenaga per satuan waktu. Tenaga keseluruhan yang diberikan adalah jumlah semua luasan $p dt$ yang besarnya adalah: (Budiono, 1995:185)

$$W = \int_0^T P dt \text{ joule} \quad (2-2)$$

Umumnya simbol W sebagai tenaga keseluruhan juga didefinisikan sebagai energi listrik dengan simbol E yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$E = V \times I \times \cos \phi \times t \quad (2-3)$$

Dengan $\cos \phi$ adalah faktor daya beban dan t merupakan lamanya waktu energi listrik pada beban tersebut digunakan.

1.2. kWh Meter Digital

kWh meter digital merupakan suatu alat pengukuran yang memiliki fungsi utama sama seperti kWh meter analog, yakni mengukur jumlah pemakaian energi atau jumlah pemakaian daya dalam satuan waktu. Jika pada kWh meter analog bekerja berdasarkan induksi, kWh meter digital bekerja berdasarkan program yang dirancang pada mikroprosesor yang terdapat di dalam piranti kWh meter digital tersebut. Tegangan dan arus yang diterima oleh kWh meter digital/prabayar ini akan dibaca terpisah. Tegangan dan arus yang terbaca akan diteruskan ke dalam mikrokontroler. Didalam mikrokontroler telah diatur suatu program untuk mengolah tegangan dan arus yang masuk menjadi suatu besaran. Besaran yang dimaksud adalah daya aktif dan energi. Sehingga dengan kWh meter digital ini dapat dibaca jumlah pemakaian energi.

Pada prinsipnya, sebuah kWh meter digital akan mengkonversi sinyal analog tegangan dan arus yang terukur menjadi sinyal digital atau diskrit dengan mengambil nilai-nilai sampel (menyampling) dari sinyal analog tegangan dan arus secara periodik setiap periode sampling T_s . (Muchlis, I&Santoso, A. *Watt-hour Meter Digital*:2)

$$v(t) = v_m \sin(\omega t) \text{ dan } i(t) = i_m \sin(\omega t + \phi) \quad (2-4)$$

$$v(k) = v(k \times T_s) \text{ dan } i(k) = I(k \times T_s) \quad (2-5)$$

dimana: $k = 0, 1, 2, \dots$ (bilangan bulat) dan

T_s = periode sampling

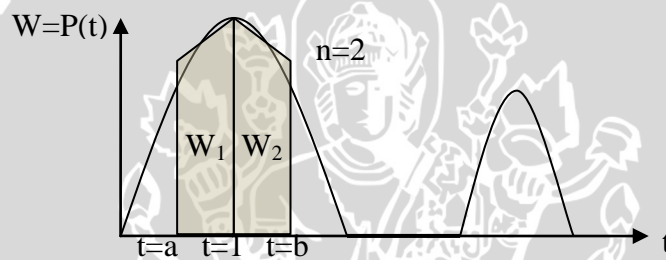
Kelebihan utama dari kWh meter digital yang membuatnya semakin banyak digunakan adalah kemampuannya untuk menghitung daya yang benar-benar terpakai, baik komponen fundamental maupun komponen harmonisa. kWh meter induksi menghitung banyaknya putaran cakram yang kecepatannya sebanding dengan daya. Untuk sinyal periodik dengan periode tertentu, lamanya waktu yang ditempuh cakram untuk melakukan satu putaran penuh akan selalu tetap. Namun, kejadiannya akan berbeda jika sinyal arus dan tegangan terdiri dari sinyal-sinyal dengan frekuensi berbeda-beda. Hasil pengukuran kWh meter induksi akan menghasilkan kesalahan besar. Oleh karena itulah dikembangkan kWh meter digital yang menggunakan peralatan elektronika dan program computer, alih-alih peralatan elektromekanis, untuk menghasilkan pengukuran yang lebih akurat.

kWh meter digital memperhitungkan komponen harmonisa dalam perhitungan daya aktifnya dengan menggunakan dua metode, yaitu metode analisis spektrum frekuensi dan metode langsung. Hampir seluruh kWh meter digital menggunakan kedua metode ini dalam perhitungan daya aktifnya.

Setelah daya aktif didapatkan, tahapan akhir kWh meter adalah perhitungan energi aktif. Energi aktif didapatkan dengan mengintegalkan daya aktif yang terpakai selama selang waktu pemakaian. Biasanya pengintegralan ini dilakukan secara diskrit/digital.

Pengertian integral adalah luas daerah yang dibatasi oleh garis $t=a$, garis $t=b$, kurva $W=P(t)$ dan sumbu t . Kurva pada interval $t=a$ sampai dengan $t=b$ diganti dengan sebuah garis lurus sehingga terbentuk sebuah trapesium yang mempunyai

$$\text{luas: } W_{tr} = \frac{b-a}{2} \{P(a) + P(b)\}$$



Gambar 2. 1 Grafik Perhitungan Energi
Sumber: Mahfudz, S. Metode Numerik. 2009:10

Interval $t=a$ sampai dengan $t=b$ dibagi menjadi dua sub interval sama lebarnya. Sehingga $h(\text{waktu sampling})=(b-a)/n$

$$W_1 = \frac{h}{2} \{P(1) + P(a)\}, W_2 = \frac{h}{2} \{P(1) + P(b)\}$$

$$W_{tr} = W_1 + W_2 = \frac{h}{2} \{P(a) + 2P(1) + P(b)\}$$

Apabila segmentasi sebanyak $n(\text{multiple segmen})$: $h = (t_n - t_0)/n$

Luas trapesium ke i : $W_i = \frac{h}{2} \{P(t_{i-1}) + P(t_i)\}$

Sehingga dalam mencari nilai energi didapatkan dengan menggunakan aturan trapesium sebagai berikut:

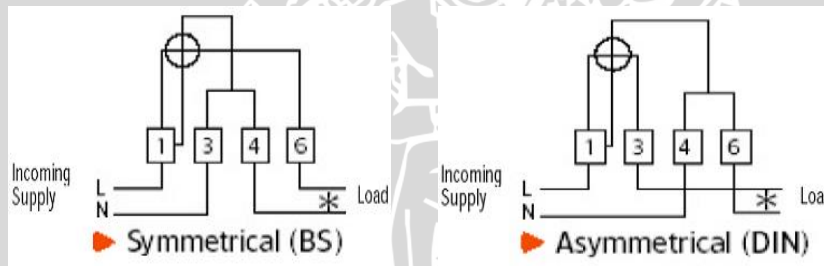
$$W_{tr} = \sum_{k=1}^n W_k = W_1 + W_2 + \dots + W_i + \dots + W_n \quad (2-6)$$

$$= \frac{h}{2} \{ \{P(t_0) + P(t_1)\} + \{P(t_1) + P(t_2)\} + \dots + \{P(t_{i-1}) + P(t_i)\} + \dots + \{P(t_{n-1}) + P(t_n)\} \}$$

$$\begin{aligned}
 W_{tr} &= \frac{h}{2} \left\{ P(t_0) + 2 \sum_{j=1}^{n-1} P(t_j) + P(t_n) \right\} \\
 &= \frac{t_n - t_0}{2} \left\{ P(t_0) + 2 \sum_{j=1}^{n-1} P(t_j) + P(t_n) \right\}
 \end{aligned}
 \tag{2-7}$$

Besarnya frekuensi sampling dalam perhitungan energi tidak harus sama dengan besarnya frekuensi sampling dalam pendigitalan sinyal tegangan dan arus.

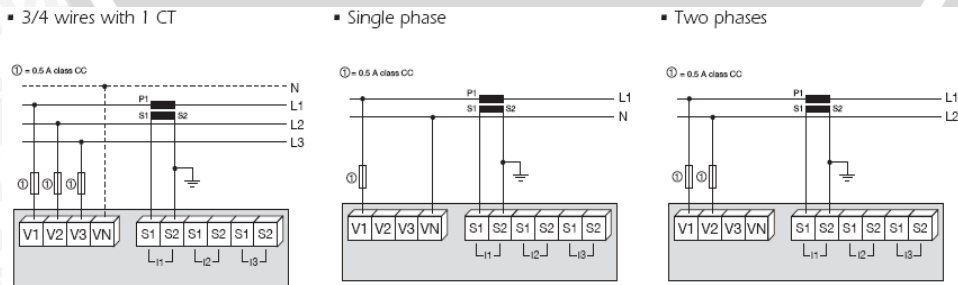
Pada kWh meter digital 1 fasa hanya menggunakan 2 kawat, dimana 1 kawat untuk fasa dan 1 untuk netral. Dalam aplikasinya kWh meter digital ini sering digunakan untuk pelanggan tegangan rendah. Pengkawatan untuk kWh meter digital ada 2 tipe, yaitu tipe *Symmetrical (BS)* dan *Asymmetrical (DIN)*. Pada dasarnya, kedua tipe tersebut adalah sama baik yang digunakan pada kWh meter mekanis maupun kWh meter digital (prabayar), namun ada beberapa keuntungan dan kerugian yang berbeda antara satu dengan yang lainnya.



Gambar 2. 2 Pengkawatan *Symmetrical (BS)* dan *Asymmetrical (DIN)*

Sumber: Arief Amiruddin. 2009

Sedangkan macam-macam pengkawatan dengan menggunakan satu *Current Transformer (CT)* pada rangkaian pengukuran alat ukur digital Socomec Diris A40 terlihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Pengkawatan pada alat ukur digital Socomec Diris A40

Sumber: User Manual Socomec Diris A40. 2009

1.2.1. Frekuensi Sampling

Untuk meningkatkan tingkat akurasi dan memudahkan pengguna, banyak peralatan yang beroperasi dalam keadaan digital. Sinyal-sinyal dan fenomena-fenomena alam yang bersifat continue dikonversikan ke dalam bentuk digital untuk diproses oleh peralatan digital tadi dengan menggunakan proses sampling. Proses sampling mengambil sampel-sampel dari sinyal continue setiap selang waktu tertentu (periodik). Besarnya selang waktu tersebut dinamakan periode/waktu sampling. Frekuensi sampling adalah nilai yang menyatakan tingkat kepadatan proses sampling yang dengan demikian menyatakan banyaknya banyaknya sampel yang diambil. Sampling rate dapat digunakan untuk menyatakan periode sampling (T_s) atau frekuensi sampling ($F_s=1/T$). semakin tinggi frekuensi sampling maka semakin banyak sampel yang diambil dan semakin kecil perbedaan antara sinyal kontinu dan sinyal digital yang merepresentasikan.

Frekuensi sampling yang digunakan pada saat penyamplingan daya analog menjadi daya diskrit sangat berpengaruh pada tingkat akurasi watt meter. Bila diperhatikan pada persamaan (2.6), terlihat bahwa tingkat akurasi dari representasi arus dan tegangan dalam bentuk digital sangat dipengaruhi oleh besarnya T_s . Begitu pula pada persamaan (2.6) dan (2.7) telah diketahui bahwa

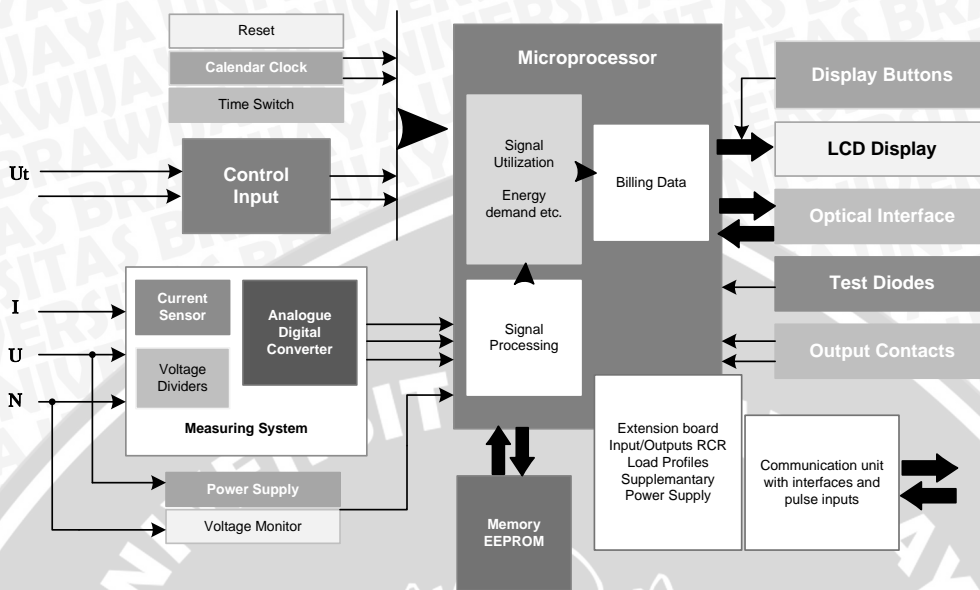
$$\int A dt = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \sum A \Delta t \quad (2.8)$$

Maka, semakin kecil Δt atau periode sampling (T_s) maka daya rata-rata maupun energi total yang didapatkan akan lebih akurat, seperti terlihat pada Gambar 2.1

1.2.2. Prinsip Kerja kWh digital/meter elektronik

Gambar 2.4 dan 2.5 menjelaskan prinsip kerja meter elektronik dimana arus I dari CT dan tegangan U dari PT masuk ke *measuring system* yang berupa *current sensors* dan *voltage dividers*, kemudian arus dan tegangan akan dikonversikan ke sinyal digital lewat *A/D converter*. Sinyal digital diproses sebagai data hasil pengukuran, hasil pemrosesan sinyal ditampilkan melalui *display* maupun disimpan oleh EEPROM untuk dikirim lewat media komunikasi agar data dapat dilihat dari jarak jauh. Tegangan U , dan N memberikan masukan pada *power supply* dan *voltage monitor*. Arus dan tegangan dari CT dan PT setelah melalui proses pembagi tegangan dan pembagi arus pada *current sensors*

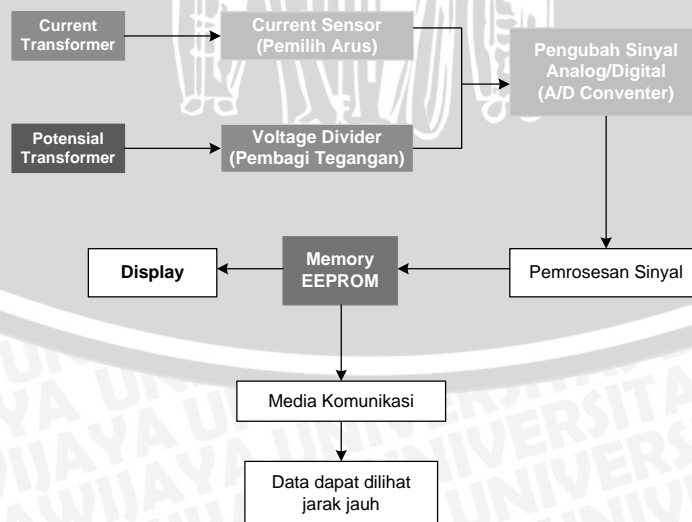
dan *voltages dividers*, yang masih berupa sinyal analog akan diubah menjadi sinyal digital pada *A/D converter*.



Gambar 2. 4 Skematik Prinsip Kerja meter Elektronik
 Sumber: Putri,P.W. *Portable Metering*. 2013:27

A/D converter terdiri atas bagian *digital filter* dan *calibration*. Harga arus dan tegangan setelah diubah ke harga digital akan melalui *filter digital* dan *calibration* dengan tujuan arus dan tegangan setelah diubah menjadi sinyal digital tetap memiliki nilai yang sama dengan nilai sebelum diubah menjadi sinyal digital.

Ringkasan Prinsip Kerja



Gambar 2. 5 Diagram Ringkasan Prinsip Kerja meter Elektronik
 Sumber: Putri,P.W. *Portable Metering*. 2013:28

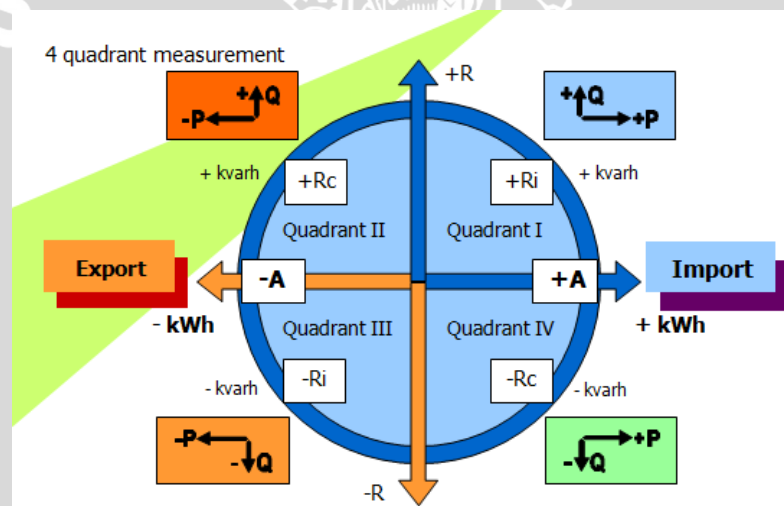
Perusahaan penyuplai energy dapat memilih sampai 8 *measured values* untuk proses lebih lanjut. *Measured values* ini dapat direkam dalam :

- *Energi register* sebagai energi status atau *energi tariff*
- Total *energi register*
- *Demand register* pada *demand tariff*

Perusahaan penyuplai energy memiliki :

- 24 *energi register*
- 8 total *energi register*
- 8 register untuk *P running*
- 24 *demand register*

Meter elektronik ini mempunyai *processing register* tersendiri untuk *power faktor* $\text{Cos } \varphi$. Meteran ini merekam minimum $\text{Cos } \varphi$ dan nilai sesungguhnya pada saat *billing period*.



Gambar 2. 6 Empat Kuadran Pengukuran
Sumber: Putri,P.W. *Portable Metering*. 2013:39

Gambar 2.6 menunjukkan arah-arah energi yang selalu muncul dalam pengukuran. P melambangkan harga dari A (daya aktif) sedangkan Q melambangkan harga dari R (daya reaktif). Meter ini memiliki kemampuan *import* (+A) dan *export* (-A) dari daya aktif sebagai penjumlahan dari tiap fasa. *Import* adalah saat pelanggan menarik daya dari PLN, sedangkan *export* adalah saat pelanggan menjual kelebihan daya yang dimilikinya. Selain itu meter ini dapat

pula menentukan daya reaktif dan daya nyata dengan mengacu pada referensi dari 4 kuadran (+Ri/-Rc/-Ri/+Rc atau +Va/-Va).

- Pada kuadran 1: jika energi aktif (kWh) bernilai positif dan energi reaktif (kVARh) bernilai positif, maka kondisi pemakaian listrik normal.
- Pada kuadran 2 : jika energi aktif (kWh) bernilai negatif dan energi reaktif (kVARh) bernilai positif, maka kondisi beban terbalik / sifat beban induktif.
- Pada kuadran 3 : jika energi aktif (kWh) bernilai negatif dan energi reaktif (kVARh) bernilai negatif, maka kondisi beban terbalik / sifat beban kapasitif.
- Pada kuadran 4 : jika energi aktif (kWh) bernilai positif dan energi reaktif (kVARh) bernilai negatif, maka kondisi beban kapasitif.

Pengukuran Daya Aktif

Meter ini merekam harga-harga daya aktif (A). Pengguna dapat menentukan harga-harga yang telah diukur seperti tampak pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Pengukuran Daya Aktif

Measured Value	Quadrant	Description
+A	Q I + Q IV	Import Active Power
-A	Q II + Q III	Export Active power
+ A - - A	Q I + Q IV - Q II - Q III	Substraction Import - Export
+ A + - A	Q I + Q IV + Q II + Q III	Addition import + export

Pengukuran Daya Reaktif

Sebagai penambahan dari konsumsi daya aktif (A), meter elektronik ini juga mampu merekam harga-harga daya reaktif (R). Berikut ini merupakan tabel pengukuran dari daya reaktif.

Tabel 2. 2 Pengukuran Daya Reaktif

Measured value	Quadrant	Description
+Ri	Q I	Inductive reactive power with import
+Rc	Q II	Capacity reactive power with export
-Ri	Q III	Inductive reactive power with export
-Rc	Q IV	Capacitive reactive power with import
+R	Q I + Q II	Positive reactive power
-R	Q III + Q IV	Negative reactive power
R with +A	Q I + Q IV	Reactive power with active import
R with -A	Q II + Q III	Reactive power with active export
+ R + - R	Q I + Q IV + Q II + Q III	Addition of total reactive power

Pengukuran Daya Nyata

Meter ini mampu mengkalkulasi daya nyata (VA) dari daya aktif (A) dan daya reaktif (R) sebagai penjumlahan dari tiga fasa (ΣL). Berikut ini merupakan tabel pengkalkulasian daya nyata.

Tabel 2. 3 Kalkulasi Daya Nyata

Measured Value	Quadrant	Description
+VA I	Q I	Apparent power quadrant I
+VA II	Q II	Apparent power quadrant II
+VA III	Q III	Apparent power quadrant III
+VA IV	Q IV	Apparent power quadrant IV
+VA	Q I + Q IV	Import apparent power
-VA	Q II + Q III	Export apparent power

1.2.3. Feature Meter Digital

Kondisi umum meter digital, antara lain :

- Merupakan *solid state* elektronik meter yang dirancang untuk memenuhi standar IEC 687 untuk energi aktif dan standard IEC 1268 untuk energi reaktif yang digunakan sebagai meter yang dikoneksikan pada CT.
- Mempunyai sertifikat test dari lembaga *independence*, dianjurkan dari KEMA
- Teknik pengukuran dan sampling harus digital menggunakan *processor* 20 bit, dan *sampling rate* paling kecil 3,3 MHz.
- Mempunyai kemampuan untuk melakukan *power quality analysis* dan mengukur *harmonics contents* sampai harmonisa ke 23 pada 4 kuadran daya.
- Mempunyai kemampuan untuk mendiagnosis *anti tampering* (anti pencurian listrik) dari koneksi yang salah atau illegal.
- Mempunyai kemampuan menyediakan data *real time* dan menampilkannya pada *power quality*, keadaan beban sama seperti diagnosa *anti tampering*.

Kondisi operasi listrik meter digital, antara lain :

- Elektronik meter harus dapat dioperasikan dan *auto sense power supply input* dari 57,7-415 volt, 3 atau 4 wire, 50 atau 60 Hz \pm 5 Hz.
- Meter harus dapat mendeteksi tegangan jala-jala dan menampilkan tegangan fasa yang ada dan *flicker* jika tegangan jala-jala yang terdeteksi berbeda dari nilai yang telah diprogram.

- c) Meter harus dapat beroperasi pada *power supply input*.
- d) Kekuatan *insulation* paling kecil 4 kV dalam satu menit.
- e) Resistansi tegangan impulse paling kecil 9 kV pada 1,2/50 μ s.
- f) Temperatur *ambient* pada saat operasi adalah -20 sampai 55 derajat celcius.

A. LCD Display

- a) Tampilan LCD yang digunakan harus besar dan tahan sampai 15 tahun
- b) Ukuran *layer* dari LCD
- c) Item-item tampilan yang dapat diprogram dan di *scroll*
- d) Terdapat 5 digit untuk identifikasi kode ID dengan ukuran tidak lebih 6 mm
- e) Dapat menampilkan nilai *billing* antara lain : kWh, kVarh, kW, kVA.
- f) Dapat diprogram untuk membaca langsung nilai utama
- g) Berbagai macam tampilan nilai *power factor* antara lain : rata-rata, langsung, *coincident*, terendah, distorsi
- h) Terdapat indikator status untuk *supply* fasa input dan jika berkedip menunjukkan nilai *supply* yang tidak teridentifikasi
- i) Terdapat indikator status untuk loading
- j) Terdapat indikator status menggunakan tanda panah untuk 4 *power quadrants*, *active*, dan *reactive*
- k) Terdapat indikator status untuk mengoperasikan dalam *security mode*
- l) Terdapat indikator status untuk *Test mode*
- m) Terdapat indikator status untuk TOU (*Time of Use*) nilai tarif
- n) Terdapat indikator status untuk nilai yang tersimpan

B. Ports Komunikasi

- a) *Optical Port LED* berfungsi untuk :
 1. Pembacaan secara local atau untuk memprogram dengan menggunakan *optical interface* yang dihubungkan pada *personal computer(PC)* yang mempunyai MS DOS *Kompatible*
 2. Kalibrasi dan Mengecek akurasi meter
- b) Port RS 232 untuk pembacaan lokal sama dengan pembacaan *remote* dan program lewat modem telpon

- c) Kedua *port* diatas harus dapat bekerja dengan *baudrate* sampai 9600 dengan *auto switch*

C. Segel Meter

- a) Untuk mencegah pembukuan yang illegal, diperlukan 2 segel untuk menyegel penutup meter
- b) Disediakan *Flip Up Transparant cover* untuk mencegah *demand reset* dan menyegel peralatan meter

D. Normal Scroll, Alternatif dan Test Mode

- a) Selain *normal scroll*, meter harus dapat menampilkan *alternative mode* dimana tampilan LCD dapat diaktifkan oleh 2 tombol yang terdapat di depan. *Alternative mode* menyediakan informasi lebih detail mengenai keadaan lokasi pada pembaca meter atau teknisi untuk pemeriksaan lebih lanjut
- b) Test mode umumnya terbatas pada personil yang ditunjuk, yang ingin melakukan cek kalibrasi dan layanan khusus lainnya

E. Non-Volatile Memory (EEPROM)

Semua data *billing* harus disimpan di EEPROM selama tidak ada *power supply* untuk menghindari kehilangan data. Kapasitas memory ini tidak kurang dari 16 kilobyte.

F. Supercapacitor

Terdapat *supercapacitor* yang berkualitas tinggi untuk menyuplai memory RAM dan semua data yang lain sampai kurang lebih 3 jam selama tidak ada power AC 3 fasa. Selama keadaan tersebut tidak boleh ada data yang hilang.

G. Battery Carry Over

- a) *Battery* berfungsi untuk menyuplai data yang aktif seperti jam dan fungsi lain selama tidak ada *supply* dari supercapasitor

- b) *Battery* ini merupakan *Lithium battery* yang utama yang dapat mensupport jam *real time* dan *load profile*, sampai dengan 12 bulan
- c) Waktu penyimpanan dapat bertahan sampai dengan 10 tahun (tanpa digunakan) pada -20 sampai +55°C.
- d) Penggantian *battery* harus dapat dilakukan dengan mudah, lewat depan melalui *cover flip over* tetapi tanpa harus merusak 2 segel

H. *Input / Output board*

- a) Dua *Programmable input channel*

Untuk digunakan membaca *load profiling* pada meter kedua dan atau ketiga seperti kWh, kVarh atau digunakan untuk *real time pricing* (biaya special tariff real time)

Tegangan operasi 12 sampai 24 AC atau DC

- b) Empat *Programmable output solid state relay*

Dapat digunakan sebagai keluaran pulsa, interval terakhir kontaktor penutup, kontaktor pengatur beban, perubahan batasan *maksimum demand*, perubahan power faktor dan perubahan batasan tegangan. Tegangan operasi kontak maksimum 240 VAC, 150 mA.

I. *Load Profile/Data Recorder*

- a) Terdapat 15 kanal yang dapat digunakan untuk *load profile* dan data recording
- b) Total memory yang dibutuhkan tidak lebih dari 125 kilobyte
- c) Item-item untuk *load profile* dapat dipilih dan diprogram :
 1. *Billing data recorder* :
 - Import (+ve) kWh
 - Export (-ve) kWh
 - Lead or Lagg kVarh
 - Lead or Lagg KVAh
 - KVAh (rms)
 2. Event data recorder-power quality analisis

- Phasa Voltage
 - Phasa Current
 - Neutral Current (In)
 - Over voltage duration and hits, per phasa
 - Under voltage duration and hits, per phasa
3. Lain-lain
- Input keluaran 1 dan 2
- d) Panjang interval dapat diatur 1, 5, 15, 30, atau 60 menit.
- e) Fungsi recorder ini harus dapat menerima kurang lebih 16.000 pulse per interval

J. *Self Read Program*

Harus dapat memprogram sedikitnya 6 *Self Read* seperti 6 periode *billing*. Sehingga pembaca meter tidak perlu membaca ke tiap-tiap site untuk pembacaan bulanan. Untuk tiap-tiap *Self Read*, meter harus mengubah *demand* setelah pembacaan dan *log in* dengan tanggal *stamp*.

K. *Diagnostics*

Berikut ini adalah *diagnostic* agar dapat tampil dan diprogram pada LCD:

a) *Diagnostics*

Nilai tegangan phasa, arus phasa, *line frequency*, *power faktor* harus dapat ditampilkan di LCD, berfungsi seperti voltmeter, amperemeter, dan frekuensimeter serta power faktor meter.

b) *Anti Tampering Diagnostics* – Koneksi yang salah atau illegal

Mendeteksi : Sekunder CT yang terhubung singkat, koneksi *polarity* yang salah, tegangan phasa dan atau arus.

c) *Power Quality Diagnostics*

Mendeteksi : Arah energy yang salah, beban phasa yang tidak seimbang, distorsi sudut phasa.

d) Mendiagnosa *counters* yang ditetapkan untuk *Anti tampering diagnostics* dan *Power Quality Diagnostics*. Tiap-tiap *counter* dapat mencapai 255 kali sebelum pengulangan.

L. *Real Time On Line Power Quality Analysis*

Macam-macam tipe dari *power quality analysis* harus dapat diprogram untuk tampilan dan keluaran adalah sebagai berikut:

- a) Meter dapat menyediakan informasi detail secara terus-menerus untuk *power quality analysis* dengan menghasilkan diagram vector 4 *power quadrant* yang menunjukkan aktivitas dari tiap-tiap fasa, arus dan tegangan dan juga sudut fasa.
- b) Meter juga dapat menyediakan nilai-nilai secara terus-menerus:
 - Load in Watt
 - Load in VA td (Vectorial tanpa *harmonic content*)
 - Load in VA rms (dengan *harmonic content*)
 - *Distortion power* in VA
 - *Reactive Power* in VAR td (Vectorial tanpa *harmonic content*)
 - *Power faktor*
 - *Distortion power faktor*
 - Ditambah item diagnostics untuk *diagnostics display* untuk amps, volt, dan frequency.
- c) Meter mampu mendeteksi *over* dan *under voltage* sesuai setting awal dan lama dalam detik dari tiap-tiap *event*.
- d) Semua informasi diatas harus dapat di *update* tiap detik

M. *Power Faktor Measurements*

Macam-macam tipe dari *power faktor* harus dapat diprogram untuk tampilan dan keluaran adalah sebagai berikut:

- a) PF *Coincident* dengan max kW *demand*
- b) PF *Coincident* dengan max kVar reactive or KVA *demand*
- c) PF rata-rata disebabkan *reset billing* terakhir
- d) PF terendah disebabkan *reset billing* terakhir
- e) PF yang dihasilkan dengan cepat
- f) *Distortion power faktor*
- g) PF dapat dijadikan grafik dengan menggunakan perangkat lunak

N. Perangkat Lunak Pembaca dan Pemrograman

Berikut ini adalah perangkat lunak dan pemrograman yang tersedia agar dapat tampil dan diprogram yaitu:

- a) Software dapat digunakan pada computer yang compatible dengan MS-DOS operating system versi 5 keatas
- b) Software mempunyai proteksi password dan *user friendly*
- c) Software remote reading compatible dengan windows 3.1 dan windows 95
- d) Juga dapat membangun atau membuat perangkat lunak yang simple untuk keadaan yang spesifik yaitu pembacaan dan pemrograman dengan proteksi password
- e) Remote reading dapat dilakukan lewat modem telpon
- f) *Baudrate* untuk komunikasi modem dapat diprogram sampai dengan 9600 *baudrate*

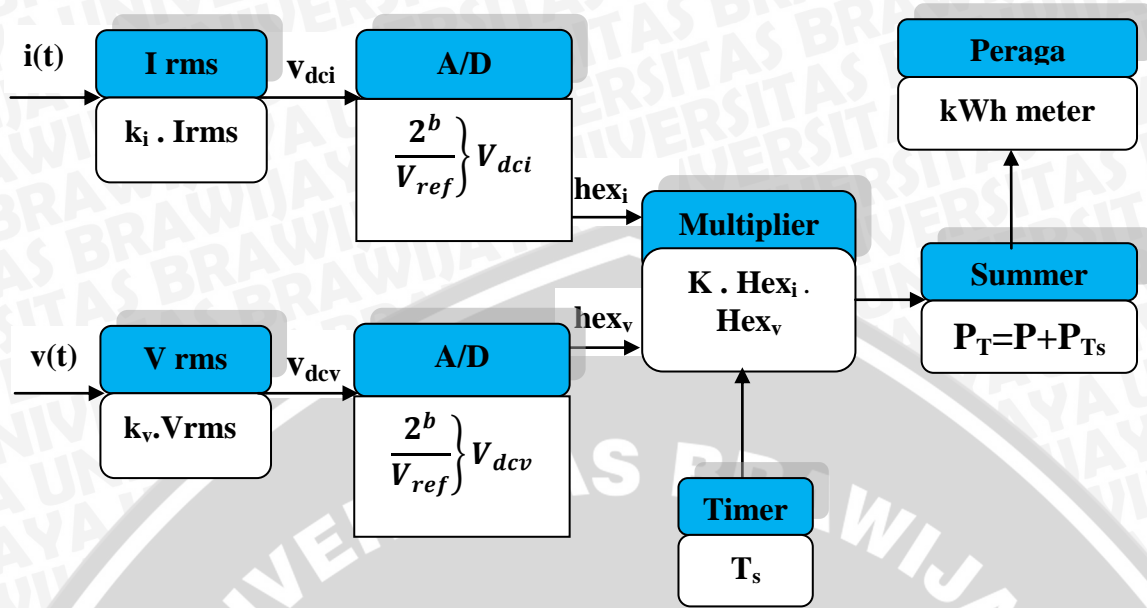
O. Laporan *Factory Tests*

Tiap-tiap meter mempunyai hasil test kalibrasi yang tersimpan didalam meter. Hasil test ini tidak dapat diubah atau diperpanjang setelah *Quality Control* dan Inspeksi.

1.2.4. Analisa Perhitungan kWh Meter Digital

Pengukuran pemakaian energi listrik pada *single-line* dengan menggunakan kilowatthour konvensional adalah dengan cara mendeteksi jumlah rotasi *light aluminium disk* dalam selang waktu tertentu. Rotasi *disk* disebabkan karena terjadinya torsi sebagai reaksi *eddy current* pada permukaan *disk* dengan medan magnet kumparan (*coil*) tegangan, kekuatan torsi sebanding dengan medan magnet yang ditimbulkan kumparan arus.

Pengukuran pemakaian energi listrik dengan menggunakan kWh meter digital elektronik adalah dengan cara mendeteksi besarnya sinyal arus dan tegangan pada *line*, energi listrik dihitung berdasar proses perkalian arus dan tegangan, sedangkan konsumsi energi listrik dihitung berdasarkan proses akumulasi energi listrik setiap selang waktu (*sampling time*). Diagram proses perhitungan konsumsi energi listrik pada *single line* adalah seperti Gambar 2.7.



Gambar 2. 7 Proses perhitungan kWh meter digital
 Sumber: Imamul Muchlis and Adi Santoso, *Wathour Meter Digital*.

Arus dan tegangan bolak-balik dikonversi oleh transduser rms menjadi tegangan dc, tegangan dc dirubah menjadi bilangan biner oleh *analog to digital converter*. Energi listrik rata-rata dihitung dengan proses multiplikasi bilangan biner antara arus dan tegangan, kemudian konsumsi energi listrik didapatkan dari proses akumulasi energi listrik setiap selang waktu (T_s). Proses aritmatik bagan diatas adalah sebagai berikut.

Konversi arus rms ke tegangan dc:

$$V_{dci} = k_i \times I_{rms} \tag{2-9}$$

Konversi tegangan rms ke tegangan dc:

$$V_{dcv} = k_v \times V_{rms} \tag{2-10}$$

Dengan k_i dan k_v berturut-turut adalah konstanta konversi linier arus rms dan tegangan rms ke tegangan dc. Konversi tegangan dc ke bilangan biner,

$$hex_i = \frac{V_{dci}}{\left(\frac{V_{ref}}{2^b}\right)} \tag{2-11}$$

$$hex_v = \frac{V_{dcv}}{\left(\frac{V_{ref}}{2^b}\right)} \tag{2-12}$$

Dengan $\left(\frac{V_{ref}}{2^b}\right)$, adalah besarnya tegangan analog untuk 1 bit atau resolusi konverter A/D b bit dengan tegangan referensi adalah sebesar V_{ref} . Substitusi persamaan

(1), (2), (3), dan (4) kedalam persamaan daya listrik dengan *time-sampling* sebesar T_s detik, maka didapatkan:

$$P_{Ts} = K \text{ hex}_i \cdot \text{hex}_v (\text{watthours}) \quad (2-13)$$

$$K = \left(\frac{V_{ref}}{2^b} \right)^2 \left(\frac{1}{k_i k_v} \right) \left(\frac{T_s}{3600} \right) [\text{Ampere.Volt.Hours}]$$

Dengan k adalah konstanta watthour.

Apabila untuk perhitungan kWh meter digital 3 fasa, dilakukan perhitungan watthours untuk 3-line adalah dengan cara menjumlahkan pemakaian daya listrik yang terdapat pada masing-masing line untuk setiap *sampling time*:

$$P_{Ts} = P_{Ts R-N} + P_{Ts S-N} + P_{Ts T-N}$$

1.3. Kesalahan kWh Meter

Pada dasarnya menera kWh meter adalah membandingkan pembacaan energi listrik oleh kWh meter yang ditera dengan energi listrik sebenarnya yang dideteksi dengan alat ukur listrik standar. Adapun yang dimaksud dengan alat ukur listrik yang standar adalah alat ukur listrik dengan ketelitian tinggi. Untuk keperluan laboratorium minimal alat ukur yang digunakan mempunyai tingkat ketelitian atau kelas 0.5 (kesalahan maksimum dari alat ini adalah $\pm 0.5\%$).

Persentase kesalahan pengukuran kWh meter dihitung menggunakan rumus: (SPLN 57-1 : 1991)

$$\% \text{ Kesalahan} = \frac{\text{Energi yang diukur oleh meter} - \text{Energi sebenarnya}}{\text{Energi sebenarnya}} \times 100\% \quad (2-14)$$

Oleh karena nilai benar tidak dapat dipastikan, maka nilai tersebut didekati oleh sebuah nilai dengan ketidakpastian yang ditetapkan, yang dapat ditelusur ke suatu standar yang disepakati bersama antara pembeli dan pabrikan atau standar nasional.

Energi yang dicatat oleh kWh meter dapat diketahui dengan membaca alat hitungnya untuk meter digital atau dengan menghitung putaran piringan untuk meter mekanik, sedangkan energi sesungguhnya dapat diketahui dengan 3 cara, yaitu:

1. Didapat dari hasil kali tegangan, arus, faktor daya dan waktu yang ditunjukkan oleh amperemeter, voltmeter, cosphimeter, dan *stopwatch*.

2. Didapat dari hasil kali daya listrik (W) dan waktu yang ditunjukkan oleh wattmeter standar dan *stopwatch*.
3. Didapat dari penunjukan standar kWh meter yang dinyatakan dalam putaran dengan ketelitian tinggi.

Perbedaan antara dua nilai kesalahan suatu meter dalam persen, salah satu diantaranya merupakan nilai acuan dan nilai yang lain diperoleh dari satu besaran berpengaruh yang berbeda dari nilai acuannya. Tiap besaran atau faktor yang berasal dari luar meter dapat mempengaruhi unjuk kerjanya merupakan besaran atau faktor yang berpengaruh. Faktor-faktor yang berpengaruh terhadap kesalahan meter antara lain :

- Faktor Distorsi

Ratio antara nilai-nilai kandungan harmonik (diperoleh dengan cara mengurangi besaran bolak-balik non-sinusoidal dengan besaran fundamentalnya) dengan nilai arus besaran non-sinusoidal. Faktor distorsi biasanya dinyatakan dalam persen.

- Koefisien Suhu Rata-rata

Ratio antara variasi kesalahan dalam persen dengan perubahan suhu yang menyebabkan variasi tersebut.

- Indeks Kelas

Sebuah angka yang merupakan batas kesalahan yang diizinkan dalam persen, untuk semua nilai arus antara $0.1 I_d$ dan I_{max} , faktor daya satu (dan beban seimbang, untuk meter fase tiga), bila meter diuji dalam kondisi acuan) sebagaimana didefinisikan/ditentukan dalam standar ini.

Tabel 2. 4 Batas Kesalahan Persentase yang Diizinkan

Arus dasar (% I_d)	Faktor Daya	Batas kesalahan meter kWh Kelas 2	Batas Kesalahan meter kWh Kelas 1	Batas kesalahan meter kWh Kelas 0,5
100	1,0	± 2,0 %	± 1,0 %	± 0,5 %
100	0,5	± 2,0 %	± 1,0 %	± 0,8 %
50	1	± 2,0 %	± 1,0 %	± 0,5 %
50	0,5	± 2,0 %	± 1,0 %	± 0,8 %
10	0,5	± 2,5 %	± 1,5 %	± 0,8 %
5	1	± 2,5 %	± 1,5 %	± 1,0 %

Sumber : SPLN 60-3:1992; Bagian 3: Prosedur Uji Instrumen Energi Listrik

1.4. Jenis Beban Listrik

Didalam sistem tenaga listrik dikenal 2 (dua) jenis beban listrik yaitu beban listrik linier dan Beban listrik nonlinier.

a. Beban Listrik Linier

Beban Listrik Linier adalah beban yang tidak mempengaruhi karakteristik dari tegangan dan arus. Beban linier merupakan beban yang mengeluarkan bentuk gelombang yang berbentuk linier, dimana arus yang mengalir sebanding dengan tahanan dan perubahan tegangan harmonisa (Roger C Dugan and Mark F McGranaghan, 2003:184).

Pada beban linier ini, bentuk gelombang arus akan mengikuti bentuk gelombang tegangan yang ditimbulkannya. Bila gelombang tegangan berbentuk sinusoidal, bentuk gelombang arus juga membentuk sinusoidal.

Contoh-contoh beban listrik linier:

- 1) Pemanasan Resistif
- 2) Lampu-lampu Pijar
- 3) Motor-motor induksi dengan putaran konstan
- 4) Motor-motor sinkron

b. Beban Listrik Nonlinier

Beban nonlinier adalah beban yang mempengaruhi karakteristik bentuk gelombang keluarannya tidak sebanding dengan tegangan dalam setiap setengah siklus sehingga bentuk gelombang keluarannya tidak sama dengan gelombang masukannya. Beban nonlinier inilah yang menimbulkan atau menghasilkan harmonisa.

Contoh-contoh Beban Listrik Nonlinier:

- 1) *Static Power Converter*
- 2) *Electronic Ballast*
- 3) Variabel Frekuensi
- 4) *Arc Furnace*
- 5) Komputer, printer, semikonduktor *switching*

Beban nonlinier terbagi atas 2 (dua) beban: (Roger C Dugan and Mark F McGranaghan, 2003:189).

1) Beban nonlinier yang di industri

- Konverter Daya Tiga fasa
- DC-Drive
- AC-Drive

2) Beban nonlinier Umum/Komersil

- *Electronic ballast*
- Lampu hemat energi (LHE)
- Komputer
- Alat-alat elektronik
- Alat-alat ukur
- *Air Conditioner (AC)*
- Penerangan gedung pada umumnya

Fasilitas modern ditandai oleh beban-beban nonlinier. Beban ini dapat membuat distorsi yang signifikan dari total beban fasilitas yang dapat menimbulkan arus harmonisa ke dalam sistem daya dan menyebabkan distorsi harmonisa pada tegangan. Masalah harmonisa ini dipengaruhi oleh kenyataan bahwa beban nonlinier ini memiliki faktor daya relatif rendah.

1.5. Teori Harmonisa

Harmonisa adalah gangguan yang terjadi pada sistem distribusi tenaga listrik akibat terjadinya distorsi gelombang arus dan tegangan. Gelombang ini terbentuk dari kelipatan frekuensi fundamentalnya (50 Hz), misalnya: 100 Hz, 150Hz, 200Hz, 300Hz,350Hz, dan seterusnya. Ini disebut sebagai frekuensi harmonisa yang timbul pada bentuk gelombang aslinya. Gelombang-gelombang ini kemudian menumpang pada gelombang murni/ aslinya yaitu gelombang dengan frekuensi 50 Hz, sehingga terbentuk gelombang cacat yang merupakan jumlah antara gelombang murni sesaat dengan gelombang harmonisanya. Bentuk gelombang dari gelombang fundamental adalah gelombang sinusoidal. Menurut, ahli matematika Jean Baptiste Fourier, gelombang yang tidak sinusoidal

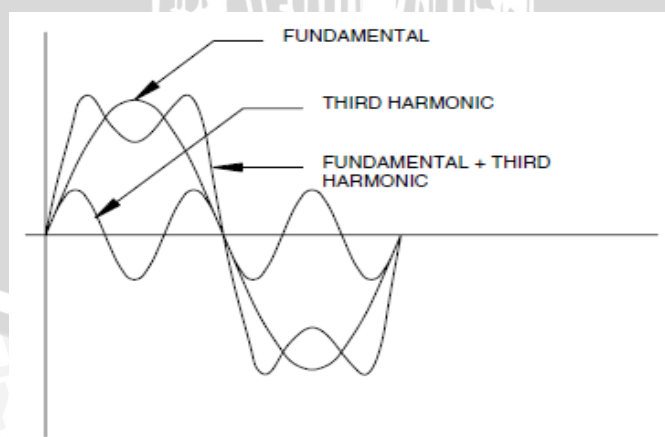
merupakan penjumlahan dari gelombang-gelombang sinusoidal dengan frekuensi kelipatan frekuensi gelombang fundamental.

Untuk gelombang non-sinusoidal, persamaan matematika Fourier dapat dinyatakan sebagai berikut (C Sankaran, 2002:80):

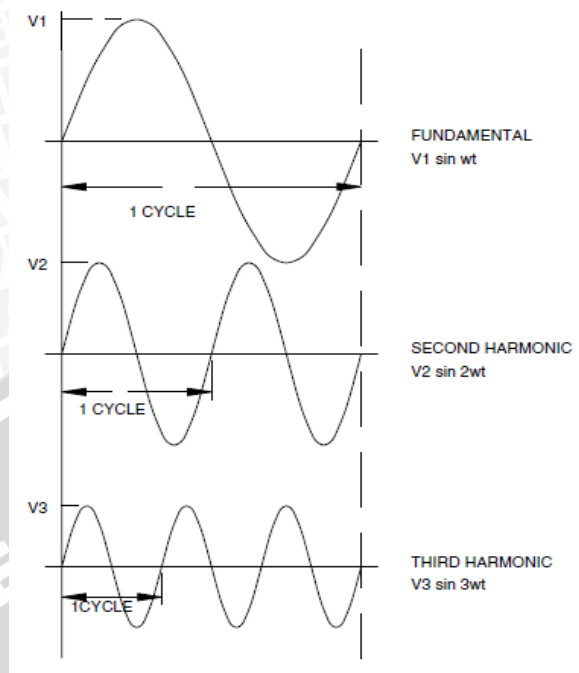
$$v(t) = V_0 + V_1 \sin(\omega t) + V_2 \sin(2\omega t) + V_3 \sin(3\omega t) + \dots + V_n \sin(n\omega t) + V_{n+1} \sin((n+1)\omega t) + \dots \quad (2-15)$$

Dalam persamaan ini, V_0 menunjukkan komponen DC dari gelombang. V_1 , V_2 , V_3 , ..., V_n adalah nilai maksimum dari harmonisa. Jika frekuensi gelombang fundamental adalah f , maka harmonisa kedua mempunyai frekuensi $2 \times f$, harmonisa ketiga mempunyai frekuensi $3 \times f$, dan harmonisa ke- n akan mempunyai frekuensi $n \times f$. Jika frekuensi gelombang fundamental/ harmonisa gelombang pertama 50 Hz, maka frekuensi harmonisa kedua adalah 100 Hz, frekuensi harmonisa ketiga adalah 150 Hz, dan seterusnya.

Dengan menggunakan analisa matematika Fourier, gelombang non-sinusoidal dapat diturunkan menjadi beberapa gelombang sinusoidal yang mempunyai frekuensi gelombang fundamentalnya. Analisa Fourier ini dapat menunjukkan harmonisa-harmonisa yang menyebabkan gelombang fundamental menjadi gelombang cacat.



Gambar 2. 8 Hasil Penjumlahan Gelombang-gelombang Non Sinusoidal
Sumber: C Sankaran, 2002:84



Gambar 2. 9 Fundamental, Harmonisa kedua, dan Harmonisa ketiga
 Sumber: C Sankaran, 2002:83

1.6. Analisis Fourier untuk Bentuk Gelombang

Setiap bentuk gelombang periodik, yaitu yang memiliki bentuk $f(t)=f(t+T)$ dapat dinyatakan oleh sebuah deret Fourier bila memenuhi persyaratan *Dirichlet* :

1. Bila gelombang diskontinyu, hanya terdapat jumlah diskontinuitas yang terbatas dalam perioda T
2. Gelombang memiliki nilai rata-rata yang terbatas dalam perioda T
3. Gelombang memiliki jumlah maksimum dan minimum yang terbatas dalam perioda T

Bila syarat-syarat tersebut dipenuhi, deret Fourier dapat dinyatakan dalam bentuk:(Budiono, 1997:181)

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \tag{2-16}$$

Secara umum, tegangan dan arus akibat harmonisa dapat dinyatakan dalam deret Fourier sebagai berikut:

$$v(t) = \sum_{h=1}^{\infty} a_h \cos(h\omega_o + \phi_h) \tag{2-17}$$

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} b_h \cos(h\omega_o + \theta_h) \tag{2-18}$$

Dengan:

$$a_o = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \tag{2-19}$$

$$a_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos h\omega t dt \quad (2-20)$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin h\omega t dt \quad (2-21)$$

Dimana h adalah orde harmonisa, yaitu bilangan 1,2,3,.. dan seterusnya. Pada kasus di sistem tenaga listrik, umumnya orde yang dominan adalah orde ganjil saja (1,3,5,dst). Orde h=1 menyatakan komponen dasar atau fundamental dari gelombang. Suku a_0 menyatakan komponen dc atau nilai rata-rata dari gelombang, yang mana umumnya komponen ini tidak muncul dalam jaringan sistem arus bolak-balik. Bila gelombang arus atau tegangan berbentuk sinusoidal sempurna, maka orde h=1 saja yang ada. Gelombang yang cacat (terdistorsi) memiliki koefisien-koefisien dengan indeks h. Amplitude harmonisa biasa dinyatakan sebagai:

$$c_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}, h \geq 1 \quad (2-22)$$

Nilai-nilai c sebagai fungsi h seringkali digambarkan dalam suatu barchart dan dikenal dengan “spektrum frekuensi” gelombang. Perhitungan koefisien dari tiap harmonisa dapat dilakukan dengan berdasarkan langkah-langkah prosedur pendekatan numerik berikut ini(A.R. Margunadi, 1994:311):

1. Untuk menghitung pendekatan suatu integrasi secara numerik, interval antara batas-batas integrasi dibagi menjadi k bagian yang sama. Bila $f_1, f_2, f_3, \dots, f_k$ menyatakan ordinat $f(t)$ pada batas-batas bagian interval tersebut, sedangkan a dan b menunjukkan batas-batas integrasi maka

$$\int_a^b f(t)dt = \frac{b-a}{k} (f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_k) \quad (2-23)$$

2. Relasi untuk memperoleh koefisien tiap harmomisa sebagai berikut:

$$a_0 = \frac{2}{k} \sum_{i=1}^k f_i \quad (2-24)$$

$$a_h = \frac{2}{k} \sum_{i=1}^k f_i \cos(h \frac{i2\pi}{k}) \quad (2-25)$$

$$b_h = \frac{2}{k} \sum_{i=1}^k f_i \sin(h \frac{i2\pi}{k}) \quad (2-26)$$

3. Formula untuk sudut fasa adalah(Sudaryatno Sudirham, 2010:93):

$$\varphi_h = \tan^{-1} \left(\frac{b_h}{a_h} \right) \quad (2-27)$$

4. Amplitudo dari setiap komponen harmonisa adalah

$$A = \sqrt{a_h^2 + b_h^2} \quad (2-28)$$

sehingga persamaannya

$$f(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [\sqrt{a_h^2 + b_h^2} \cos(h \omega_0 t - \phi_h)] \quad (2-29)$$

1.7. Harmonisa Arus dan Tegangan

Tingkat kecacatan seringkali dinyatakan dengan *Total Harmonic Distortion (THD)*, *Total Harmonic Distortion* digunakan sebagai ukuran untuk melihat berapa besar pengaruh keseluruhan adanya harmonisa terhadap sinyal sinus. Pengaruh keseluruhan harmonisa diperbandingkan terhadap komponen fundamental, karena komponen fundamentalah yang memberikan transfer energi nyata.

Untuk tegangan nonsinus, THD didefinisikan sebagai berikut: (J. Arrilanga & N.R Watson, 2003:11)

$$THD_V = \frac{\sqrt{V_{rms}^2 - V_1^2}}{V_1} \times 100\%$$

V_{rms} dapat dinyatakan dengan identitas parseval $V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2}$

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \quad (2-30)$$

Dengan,

- V_h = tegangan rms pada frekuensi tunggal pada harmonisa ke n
- V_1 = tegangan rms fundamental
- N = harmonisa maksimum
- h = orde harmonisa

Untuk arus nonsinus, THD didefinisikan sebagai berikut:

$$THD_I = \frac{\sqrt{I_{rms}^2 - I_1^2}}{I_1} \times 100\%$$

I_{rms} dapat dinyatakan dengan identitas parseval $I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \quad (2-31)$$

Dengan,



- I_h = arus rms pada frekuensi tunggal pada harmonisa ke n
- I_1 = arus rms fundamental
- N = harmonisa maksimum
- h = orde harmonisa

1.8. Standar Harmonisa

Karena begitu besar dan bervariasi dampak harmonisa pada peralatan dan sistem secara teknis dan ekonomis maka diperlukan standarisasi harmonisa. Standar yang mengatur distorsi harmonisa ini adalah standar IEEE 512-1992, standar ini mengatur batasan harmonisa yang diijinkan seperti terlihat dalam Tabel 2.5 dan 2.6.

Tabel 2. 5 Standar Maksimum Distorsi Harmonisa IEEE 519-1992

Maksimum Distorsi Harmonisa Dalam % Arus Beban (I_L)						
Harmonisa Orde Ganjil Pada : $120\text{ V} \leq V \leq 69\text{ kV}$						
$\frac{I_{sc}}{I_L}$ \ h	h/11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$	THDi
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20-50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50-100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100-1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0
Harmonisa orde genap dibatasi 25% dari batasan harmonisa orde ganjil diatas						
Dimana:						
I_{sc} =	Arus hubung singkat maksimum di PCC atau pada Alat Pengukur dan Pembatas (APP).					
I_L =	Arus beban demand maksimum (komponen frekuensi fundamental) di PCC (Point of Common Coupling = Titik sambung bersama).					

Sumber : Alexander Kusko and Marc T. Thompson, 2007:79

Tabel 2. 6 Standar Distorsi Tegangan

Maximum distortion (in%)	System voltage		
	Below 69 kV	69-138 kV	>138 kV
Individual harmonic (%)	3.0	1.5	1.0
Total harmonic(%)	5.0	2.5	1.5

Sumber : James j. Burke, 1994:284

1.9. Dampak Harmonisa

Dampak terhadap sistem tenaga sendiri antara lain peningkatan *susut energi* yaitu energi “hilang” yang tak dapat dimanfaatkan, yang secara alamiah berubah menjadi panas. Harmonisa menyebabkan peningkatan temperatur pada konduktor kabel, pada kapasitor, induktor, dan transformator, yang bisa berakibat pada *derating* dari alat-alat ini dan justru *derating* ini membawa kerugian (finansial) yang lebih besar dibandingkan dengan dampak langsung yang berupa susut energi. Harmonisa tidak hanya menyebabkan *derating* piranti tetapi juga umur ekonomis piranti. Pembebanan nonlinier tidaklah selalu kontinyu, melainkan fluktuatif. Oleh karena itu pada selang waktu tertentu piranti terpaksa bekerja pada batas tertinggi temperatur kerjanya bahkan mungkin terlampaui pada saat-saat tertentu. Kenaikan tegangan bisa terjadi akibat adanya harmonisa yang dapat menimbulkan *partial-discharges* dalam piranti yang memperpendek umur. Harmonisa juga dapat menyebabkan terjadinya *overload* pada penghantar netral; kWh-meter memberi penunjukan tidak normal; rele proteksi juga akan terganggu, bisa tidak mendeteksi besaran rms bahkan mungkin gagal *trip*. (Sudaryatno Sudirham, 2010:161)

- Kapasitor dan Induktor

Terjadi pemanasan berlebih yang dapat merusak komponen serta memungkinkan terjadinya aliran arus yang sangat besar akibat terjadinya resonansi parallel maupun tegangan lebih karena resonansi seri.

- *Partial Discharge*

Harmonisa dapat menyebabkan tegangan maksimum pada suatu piranti jauh melebihi tegangan fundamentalnya. Tegangan lebih yang diakibatkan oleh adanya harmonisa bisa menyebabkan terjadinya *partial discharge* pada piranti. *Partial discharge* adalah peristiwa pelepasan atau loncatan bunga api listrik yang terjadi pada suatu bagian isolasi sebagai akibat adanya beda potensial yang tinggi pada isolasi tersebut. Jika hal ini terjadi umur piranti akan sangat diperpendek yang akan menimbulkan kerugian besar secara finansial.

- Kabel Netral

Pemanasan berlebih dan arus yang besar pada sistem 3 fasa 4 kawat akibat adanya harmonisa kelipatan tiga.

- Generator
Pemanasan berlebih pada belitan dan inti.
- Transformator
Berkurangnya kapasitas dan pemanasan inti besi yang berlebihan karena naiknya susut energi pada inti dan belitan.
- kWh meter
Terjadinya kesalahan dalam pengukuran akibat arus yang besar hingga putaran piringan kWh meter menjadi lebih cepat. Selain itu bisa menyebabkan terbakarnya kumparan arus akibat adanya aliran arus harmonisa yang sangat besar.
- Peralatan audio dan peralatan rumah tangga lainnya
Tidak dapat berfungsi dengan sempurna, harmonisa mempengaruhi masa hidup dan kinerja dari beberapa komponen seperti diode, transistor, dan kapasitor.

1.10. Sistem Pengukuran

Peralatan-peralatan ukur untuk sistem arus bolak-balik dikalibrasikan terhadap gelombang bolak-balik sinusoidal murni. Penggunaan alat ukur untuk pengukuran gelombang yang mengandung harmonisa berpeluang mengandung kesalahan pengukuran, khususnya ketika terjadi kondisi resonansi arus atau tegangan yang tinggi. Alat ukur energi yang paling populer adalah dari jenis piringan induksi. Ketelitian kWh meter jenis ini terbatas pada frekuensi fundamentalnya saja. Daya total yang semestinya diukur oleh meter adalah:

$$\begin{aligned} \text{Daya total} &= V_{dc}I_{dc} + V_1I_1\cos\phi + V_nI_n\cos\phi_n & (2-32) \\ P_T &= (P_{dc}) + (P_1) + (P_{\text{harmonisa}}) \end{aligned}$$

Daya searah P_{dc} tidak akan terukur oleh meter, tetapi meter akan sensitive terhadap keberadaannya. Daya fundamental P_1 akan terukur secara akurat. Daya harmonisa $P_{\text{harmonisa}}$ tidak akan terukur secara akurat karena keterbatasan respon frekuensi meter. Daya harmonisa total didapat dengan menjumlahkan semua komponen suku-suku hasil perkalian tegangan dan arus serta beda sudutnya. Setiap daya searah P_{dc} yang muncul akan menyebabkan kesalahan sebanding

dengan rasio $\pm P_{dc}/P_T$, dengan tanda kesalahan bergantung pada arah aliran daya. Demikian pula dengan daya harmonisa $P_{harmonisa}$ yang muncul akan menyebabkan kesalahan yang dinyatakan dengan $\pm K \frac{P_{harmonisa}}{P_T}$, dimana faktor K bergantung pada karakteristik respon frekuensi meter. Tanda kesalahan bergantung pada arah aliran daya.

Daya searah dan daya harmonisa akan mengurangi kemampuan meter untuk mengukur daya frekuensi fundamental. Arus searah menyebabkan distorsi fluks dan menggeser daerah kerja permeabilitas pada komponen magnetic. Fluks yang dibangkitkan harmonisa, bersama-sama dengan fluks liar pada frekuensi yang sama menghasilkan torsi sekunder pada piringan.

Pengukuran tegangan atau arus yang cacat dengan menggunakan meter-meter PMMC standar menunjukkan penyimpangan hingga beberapa persen. Penyimpangan yang sangat besar (bisa mencapai puluhan persen, terutama bila bentuk gelombang berupa impuls-impuls pendek bolak-balik) terjadi pada meter-meter digital murah. Pada meter-meter digital murah, gelombang bolak-balik diukur dengan menyearahkannya terlebih dahulu, kemudian dilakukan penapisan secara sederhana dengan kapasitor perata. Akibatnya, meter hanya akan sensitif terhadap nilai puncak gelombang, dan bukannya nilai efektif gelombang.

Pengukuran faktor daya secara konvensional di industri umumnya adalah pengukuran dalam bandwidth yang sempit, sehingga pembacaan yang ditunjukkan adalah mendekati dpf (perhatikan bahwa dpf hanya mencakup komponen-komponen fundamentalnya saja).