

Metode Pengukuran *Total Harmonic Distortion* Arus Bolak-Balik (THDi) Menggunakan Kumparan Rogowski dan Osiloskop

Budhi Anto^{1,a)}

¹Laboratorium Elektronika Industri,
Jurusan Teknik Elektro,
Fakultas Teknik, Universitas Riau,
Jl. HR. Subrantas km 12,5 Pekanbaru, Indonesia, 28294

^{a)}budhianto.ur@gmail.com (corresponding author)

Abstrak

Salah satu parameter kualitas daya listrik arus bolak-balik adalah tingkat kandungan harmonisa baik pada sinyal tegangan maupun pada sinyal arus, yang masing-masingnya dinyatakan oleh total harmonic distortion tegangan (THDv) dan total harmonic distortion arus (THDi). Untuk mengukur THD biasanya digunakan alat yang dinamakan power quality analyzer. Namun harga satu unit alat tersebut sangat mahal untuk kalangan non-profesional seperti para akademisi dan hobbis yang hanya menggunakannya sesekali saja. Artikel ini menampilkan metode pengukuran THDi berbiaya murah dan akurat serta dapat direalisasikan menggunakan alat dan bahan yang dapat diperoleh dengan mudah. Untuk menampilkan sinyal arus digunakan sensor kumparan Rogowski dan osiloskop. Kumparan Rogowski dipilih karena sensor ini bersifat linier dan mempunyai pita frekuensi yang lebar. Sinyal arus bolak-balik menghasilkan fluks magnet yang berubah-ubah menembus penampang kumparan Rogowski. Selanjutnya fluks magnet tersebut menghasilkan tegangan induksi pada ujung-ujung kumparan Rogowski. Tegangan induksi tersebut kemudian masuk ke rangkaian integrator. Keluaran rangkaian integrator adalah suatu sinyal tegangan yang bentuknya sama dengan bentuk arus bolak-balik yang diukur. Sinyal tegangan tersebut kemudian ditampilkan pada osiloskop. Gambar arus bolak-balik yang ditampilkan pada layar osiloskop kemudian diolah secara numerik untuk menghitung nilai rms-nya dan nilai rms dari sinyal fundamentalnya, kemudian nilai THDi dihitung berdasarkan nilai-nilai rms tersebut. Penerapan metode ini untuk menghitung nilai THDi arus sinus murni, menghasilkan akurasi sebesar -0,0142%. Pengukuran terhadap arus masukan transformator-penyearah 6-pulsa dan 24-pulsa menghasilkan THDi masing-masing sebesar 12,66% dan 4,27%. Kondisi ini bersesuaian dengan bentuk gelombang arus masukan penyearah 24-pulsa yang mendekati gelombang sinus murni, sehingga kandungan harmonisanya kecil, oleh karena itu nilai THDi-nya kecil.

Kata-kata kunci: Total harmonic distortion arus, Kumparan Rogowski, Osiloskop, Metode numerik

PENDAHULUAN

Peralatan-peralatan listrik yang dicatu oleh sistem kelistrikan dewasa ini pada umumnya menggunakan rangkaian elektronika. Rangkaian elektronika-rangkaian elektronika tersebut menyebabkan arus yang mengalir pada sistem kelistrikan menjadi tidak berbentuk sinusoid lagi, meskipun tetap bersifat periodik dengan frekuensi sebesar frekuensi sistem kelistrikannya (sistem kelistrikan di Indonesia menggunakan frekuensi 50 Hz). Jika dilakukan analisis Fourier terhadap gelombang arus yang terdistorsi tersebut, maka akan diperoleh komponen arus dengan frekuensi fundamental dan komponen-komponen arus dengan frekuensi kelipatan frekuensi fundamental, yang disebut sebagai harmonisa.

Salah satu parameter yang berhubungan dengan kualitas daya listrik yang dikonsumsi oleh beban listrik adalah kandungan harmonisa pada arus yang ditarik oleh beban tersebut. Parameter tersebut dinyatakan sebagai *total harmonic distortion* dari arus (THDi). Secara matematis, THDi dinyatakan oleh persamaan berikut,

$$THDi = \sqrt{\frac{I_{rms}^2 - I_{1-rms}^2}{I_{1-rms}^2}} \quad (1)$$

dimana I_{rms} adalah nilai rms dari sinyal arus dan I_{1-rms} adalah nilai rms dari sinyal arus dengan frekuensi fundamental.

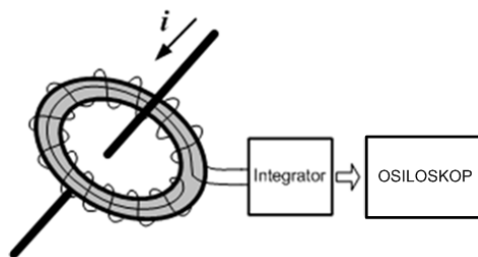
Untuk mengukur THDi dari suatu arus biasanya digunakan alat *power quality analyzer* yang prinsip kerjanya menggunakan teknik-teknik pengolahan sinyal secara digital (*digital signal processing*). Alat ini dilengkapi dengan rangkaian konverter analog ke digital yang sanggup mengolah sinyal arus bolak-balik [1]. Hasil pengukuran THDi akan ditampilkan pada media penampil alat ini. Namun harga alat ini sangat mahal untuk kalangan non-profesional seperti para akademisi dan hobbis yang hanya menggunakannya sesekali saja.

Diantara beberapa usaha yang telah dilakukan untuk mengukur THD dengan metode yang lebih sederhana adalah yang dilakukan oleh Bien et.al [2]. Mereka mengukur THD menggunakan rangkaian filter analog untuk mendapatkan sinyal tegangan dengan frekuensi fundamental dan menggunakan rangkaian konverter rms-dc untuk mendapat nilai-nilai rms dari sinyal tegangan dan sinyal tegangan dengan frekuensi fundamental. Selanjutnya nilai THD dihitung berdasarkan kedua nilai tersebut. Metode lain yang lebih kompleks diusulkan oleh Mog dan Ribiero [3]. Mereka menghitung THD dari suatu sinyal analog menggunakan teknik-teknik pengolahan sinyal digital dengan mempergunakan rangkaian terintegrasi (IC) *digital signal processor* (DSP) 48-bit. Sinyal tegangan yang kontinyu diubah menjadi sinyal diskrit dan selanjutnya setiap nilai tegangan diskrit tersebut diubah menjadi data-data digital oleh konverter analog ke digital (ADC). Satu set data digital kemudian diolah oleh prosesor DSP 48-bit menggunakan teknik-teknik berbasis Transformasi Laplace Diskrit (DFT=*Discrete Fourier Transform*) untuk mendapatkan nilai rms sinyal tegangan dan nilai rms sinyal tegangan dengan frekuensi fundamental. Selanjutnya THD dihitung berdasarkan kedua nilai rms tersebut. Metode pertama diatas menggunakan rangkaian elektronika analog dan metode kedua diatas menggunakan rangkaian elektronika digital untuk mengukur THD dan sekaligus menampilkan hasil pengukuran pada media penampil.

Pada manuskrip ini telah diusulkan suatu metode yang cukup sederhana tetapi akurat untuk mengukur THD dari sinyal arus bolak-balik dimana perhitungan-perhitungan dilakukan tidak menggunakan rangkaian elektronika tetapi menggunakan tabel. Metode ini pada dasarnya adalah suatu metode numerik untuk menghitung operasi integral yang sering ditemukan pada perhitungan nilai THD.

PRINSIP PENGUKURAN THDi MENGGUNAKAN KUMPARAN ROGOWSKI DAN OSILOSKOP

Metode pengukuran THDi menggunakan kumparan Rogowski dan osiloskop dijelaskan menggunakan gambar 1. Kumparan Rogowski berikut rangkaian integratornya digunakan untuk membaca arus bolak-balik sedangkan osiloskop digunakan sebagai media penampil. Gelombang arus bolak-balik selama 1 perioda yang ditampilkan osiloskop kemudian dicuplik sejumlah N sampel arus. Data-data arus tersebut kemudian diolah menggunakan persamaan-persamaan matematika tertentu sehingga diperoleh nilai rms dari gelombang tersebut dan juga nilai rms gelombang arus dengan frekuensi fundamental. Selanjutnya berdasarkan kedua nilai rms tersebut, nilai THDi dihitung.

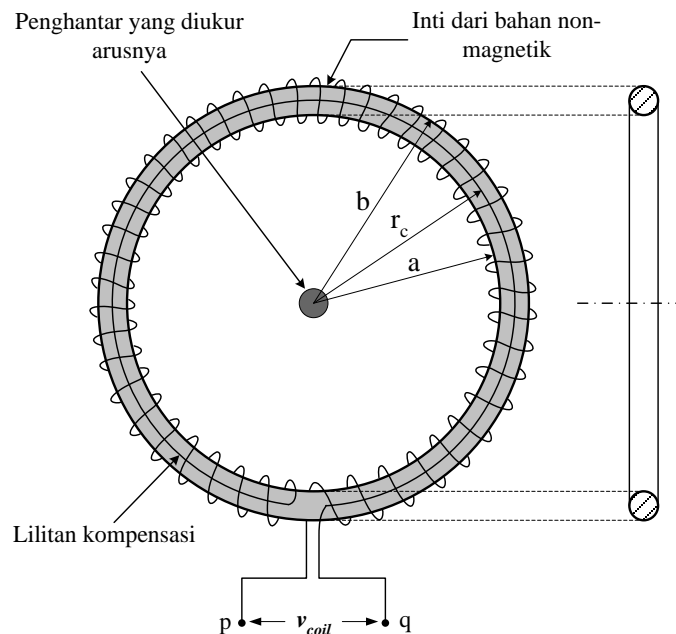


Gambar 1. Diagram blok metode pengukuran THDi.

Prinsip Kerja Kumaran Rogowski

Kumaran Rogowski, seperti namanya, ditemukan oleh Walter Rogowski pada tahun 1912 [4]. Konstruksi kumaran Rogowski diperlihatkan pada gambar 2. Konstruksi tersebut dinamakan kumaran Rogowski dengan satu-lapis belitan [5,6]. Belitan tersebut dililitkan di sepanjang inti toroid. Inti toroid terbuat dari bahan non-magnetik. Medan magnet di sekitar kumaran Rogowski dapat menginduksikan tegangan pada belitan tersebut sehingga akan mempengaruhi ketelitian pengukuran arus. Tegangan induksi tersebut dikompensasi oleh lilitan tunggal yang berada di tengah-tengah belitan [5,6].

Karena menggunakan inti dari bahan non-magnetik, karakteristik magnetisasi kumaran Rogowski adalah linier, tidak mengalami efek saturasi dan tidak mempunyai efek histeresis, sehingga arus bolak-balik yang diukur dapat dipetakan secara sempurna pada ujung-ujung kumaran Rogowski. Karakteristiknya yang linier tersebut telah mendasari pemilihan kumaran Rogowski sebagai sensor arus bolak-balik. Hal lain yang mendasari pemilihannya adalah konstruksi sensor dan rangkaian pengkondisi sinyalnya sederhana dan dapat direalisasikan menggunakan alat dan bahan yang dapat diperoleh dengan mudah, sehingga menghasilkan suatu transduser yang berbiaya murah namun tetap mempunyai akurasi yang tinggi.



Gambar 2. Konstruksi kumaran Rogowski dengan penampang toroid berbentuk lingkaran, penghantar yang akan diukur arusnya diletakkan di tengah-tengah kumaran.

Arus listrik yang mengalir pada penghantar di tengah-tengah toroid akan menghasilkan medan magnet. Kuat medan magnet \mathbf{H} di setiap titik di sekitar penghantar tersebut memenuhi Hukum Ampere, yaitu,

$$\oint_c \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = i \tag{2}$$

dimana $d\mathbf{l}$ adalah elemen kecil dari lintasan magnetik c tempat nilai \mathbf{H} dievaluasi dan i adalah arus yang dilingkupi oleh lintasan magnetik c . Persamaan (2) diselesaikan menggunakan sistem koordinat silinder. Karena besar \mathbf{H} pada arah tangensial bidang silinder adalah sama, maka dengan mengambil lintasan c yang berbentuk lingkaran yang berpusat pada penghantar, diperoleh persamaan berikut,

$$H_\phi = \frac{i}{2\pi r} \tag{3}$$

Dimana H_ϕ adalah besar kuat medan magnet pada arah tangensial dan r adalah jari-jari lintasan c dengan penghantar yang diukur arusnya sebagai pusatnya.

Jumlah fluks magnet Φ yang dihasilkan oleh arus i yang menembus penampang toroid dihitung sebagai berikut,

$$\Phi = \int_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = \int_s \mu_o H_\phi dS = \frac{\mu_o}{2\pi} i \int_s \frac{dS}{r} \tag{4}$$

dimana S adalah penampang toroid dan dS adalah elemen kecil dari penampang toroid, μ_o adalah permeabilitas ruang hampa sebesar $4\pi \times 10^{-7}$ H/m. Untuk penampang toroid yang berbentuk lingkaran berlaku persamaan berikut [7],

$$\Phi = \frac{\mu_o}{2} i (a + b - 2\sqrt{ab}) \tag{5}$$

dimana a adalah jari-jari sebelah dalam toroid dan b adalah jari-jari terluar toroid. Karena i merupakan fungsi waktu, maka jumlah fluks magnet (Φ) yang dihasilkan juga merupakan fungsi waktu. Sesuai Hukum Faraday, terdapat tegangan induksi v_{coil} pada ujung-ujung kumparan Rogowski (terminal p dan terminal q) yaitu,

$$v_{coil} = -T_r \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{\mu_o T_r}{2} (a + b - 2\sqrt{ab}) \frac{di}{dt} \tag{6}$$

dimana T_r adalah jumlah lilitan kumparan Rogowski.

Persamaan (6) dapat ditulis dalam bentuk lain sebagai berikut,

$$v_{coil} = -M \frac{di}{dt} \tag{7}$$

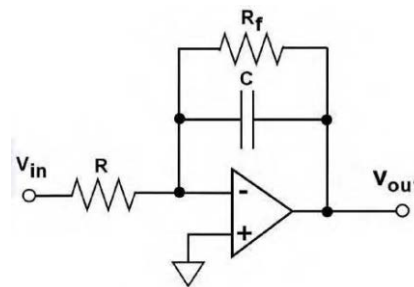
dengan M adalah induktansi bersama.

$$M = \frac{\mu_o T_r}{2} (a + b - 2\sqrt{ab}) \tag{8}$$

Dari persamaan (7) diatas, tegangan induksi pada ujung-ujung kumparan Rogowski sebanding dengan seberapa cepat perubahan arus yang diukur. Persamaan ini juga mensyaratkan bahwa untuk mendapat bentuk arus i kembali maka ujung-ujung kumparan Rogowski harus dihubungkan ke rangkaian integrator.

Dari persamaan (7), untuk arus i yang berbentuk sinusoid dengan $i(t) = I_m \sin \omega t$, maka tegangan induksi pada ujung-ujung kumparan Rogowski adalah $v_{coil}(t) = -M \omega I_m \cos \omega t$. Nilai maksimum v_{coil} adalah sebagai berikut,

$$v_{coil-maks} = M \omega I_m \tag{9}$$



Gambar 3. Rangkaian *inverting integrator*.

Rangkaian Pengkondisi Sinyal

Rangkaian pengkondisi sinyal menggunakan rangkaian integrator berbasis penguat operasional (gambar 3). Rangkaian tersebut adalah *inverting integrator* dimana polaritas v_{out} terbalik terhadap v_{in} . Dengan mengambil nilai $R_f \gg R$, maka sinyal keluaran integrator adalah sebagai berikut,

$$v_{out} = -\frac{1}{RC} \int v_{in} dt \tag{10}$$

Disini diambil nilai $R = 10 \text{ k}\Omega$, $R_f = 330 \text{ k}\Omega$ dan $C = 10 \text{ nF}$.

Menghitung Persamaan Integral Menggunakan Metode Numerik (Metode Trapesium)

Menghitung nilai rms dari suatu gelombang arus bolak-balik melibatkan persamaan integral, begitu pula dalam menghitung nilai rms dari komponen fundamentalnya. Nilai rms dari sinyal arus bolak-balik i dengan perioda T dapat dihitung menggunakan persamaan berikut,

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \tag{11}$$

Nilai rms dari komponen fundamental arus i (I_{1-rms}) dihitung menggunakan analisis Fourier sebagai berikut,

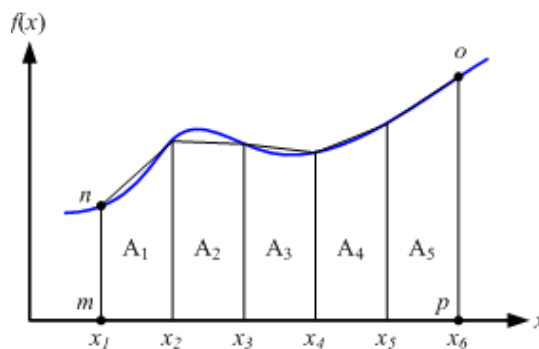
$$a_1 = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) \cos \frac{2\pi}{T} t dt \tag{12}$$

$$b_1 = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) \sin \frac{2\pi}{T} t dt \tag{13}$$

$$I_{1-rms} = \sqrt{\frac{a_1^2 + b_1^2}{2}} \tag{14}$$

Persamaan (11), persamaan (12) dan persamaan (13) diselesaikan secara numerik dengan menggunakan metode trapesium [8].

Persamaan integral dari suatu fungsi $f(x)$ yang kontinu sebenarnya menyatakan luas area dibawah kurva fungsi tersebut yang diapit oleh batas kiri dan batas kanannya (gambar 4). Jika fungsi $f(x)$ dijadikan fungsi diskrit dengan variabel-variabelnya adalah $x[1], x[2], x[3], x[4], x[5]$ dan $x[6]$, dan nilai-nilai fungsinya adalah f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 dan f_6 , maka luas A_{mnop} dapat didekati oleh jumlah luas kelima trapesium A_1, A_2, A_3, A_4 , dan A_5 .



Gambar 4. Menghitung luas area di bawah fungsi $f(x)$ secara numerik dengan metode trapesium

$$\int_{x_1}^{x_6} f(x) dx = A_{mnop} \tag{15}$$

$$A_{mnop} \approx \sum_{k=1}^5 A_k = \frac{1}{2} (x_2 - x_1) \{ (f_2 + f_1) + (f_3 + f_2) + (f_4 + f_3) + (f_5 + f_4) + (f_6 + f_5) \}$$

$$= \frac{1}{2} (x_2 - x_1) \sum_{k=1}^5 (f_{k+1} + f_k) \tag{16}$$

Persamaan (16) diatas diperoleh jika fungsi $f(x)$ dicuplik sejumlah 6 kali dengan interval pencuplikan yang sama yaitu $(x_6-x_1)/5$. Jika $f(x)$ dicuplik sejumlah N kali dengan interval pencuplikan yang sama sebesar $(x_N-x_1)/(N-1)$, maka diperoleh persamaan berikut,

$$A_{mnop} \approx \sum_{k=1}^{N-1} A_k = \frac{(x_N - x_1)}{2(N-1)} \sum_{k=1}^{N-1} (f_{k+1} + f_k) \tag{17}$$

Dengan menerapkan persamaan (17) ke persamaan (11), diperoleh pendekatan numerik terhadap nilai rms arus i yaitu,

$$I_{rms} \approx \sqrt{\frac{\Delta t}{2T} \sum_{k=1}^{N-1} (i_{k+1}^2 + i_k^2)} \tag{18}$$

dengan $\Delta t = T/(N-1)$. Δt disebut juga dengan periode pencuplikan (*sampling periode*).

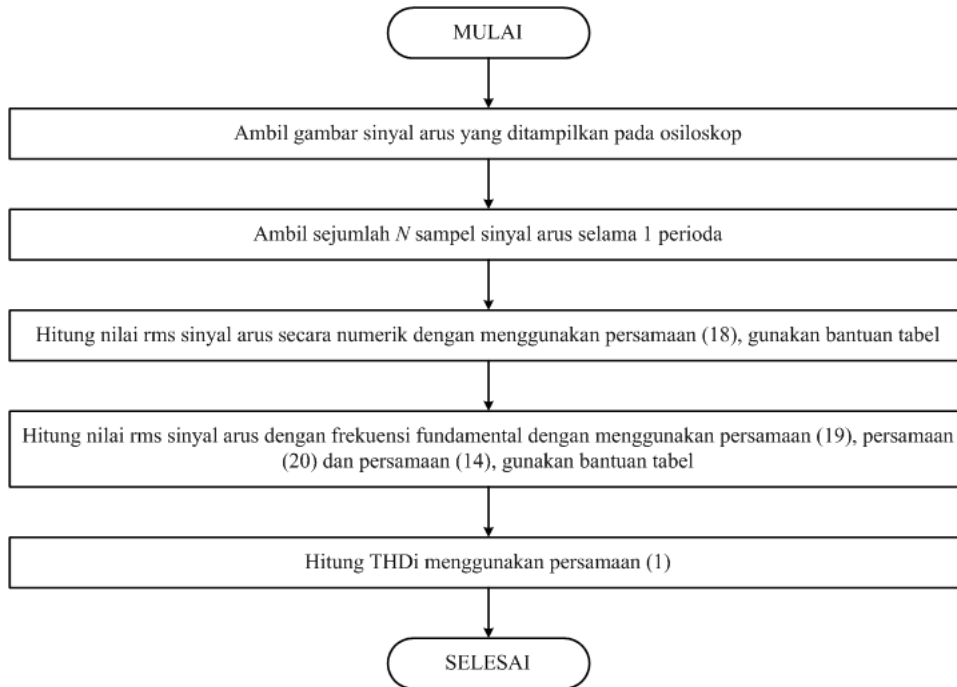
Dengan menerapkan persamaan (17) ke persamaan (12) dan persamaan (13) , diperoleh persamaan-persamaan berikut,

$$a_1 \approx \frac{2}{T} \times \frac{\Delta t}{2} \sum_{k=1}^{N-1} \left\{ i_{k+1} \cos \left(\frac{k}{N-1} \right) 2\pi + i_k \cos \left(\frac{k-1}{N-1} \right) 2\pi \right\} \tag{19}$$

$$b_1 \approx \frac{2}{T} \times \frac{\Delta t}{2} \sum_{k=1}^{N-1} \left\{ i_{k+1} \sin \left(\frac{k}{N-1} \right) 2\pi + i_k \sin \left(\frac{k-1}{N-1} \right) 2\pi \right\} \tag{20}$$

METODE PENGUKURAN DAN PERHITUNGAN THDi

Langkah-langkah pengukuran dan perhitungan THDi dijelaskan dengan mengacu pada gambar 5. Persamaan (18), persamaan (19) dan persamaan (20) dapat dengan mudah diselesaikan dengan bantuan tabel pada program Microsoft EXCEL.



Gambar 5. Diagram alir perhitungan THDi.

HASIL DAN DISKUSI

Kumparan Rogowski dirancang untuk menghasilkan tegangan induksi maksimum sebesar 50 mV pada arus sinusoid dengan nilai rms 5 A (atau dengan nilai $I_m = 7,071$ A) dan frekuensi 50 Hz, sehingga berdasarkan persamaan (9), kumparan Rogowski harus mempunyai $M = 22,5\mu\text{H}$. Inti kumparan Rogowski yang dibuat menggunakan bahan plastik berongga dengan jari-jari sebelah dalam $a=2,4$ cm dan jari-jari sebelah luar $b=5,5$ cm. Bahan ini adalah berasal dari mainan anak-anak. Untuk mendapatkan nilai $M = 22,5\mu\text{H}$, maka sesuai persamaan (8), kumparan Rogowski sekurang-kurangnya harus mempunyai 5648 lilitan. Parameter kumparan Rogowski diperlihatkan pada tabel 1. Kumparan Rogowski yang telah dibuat beserta rangkaian pengkondisi sinyalnya diperlihatkan pada gambar 6a dan gambar 6b.

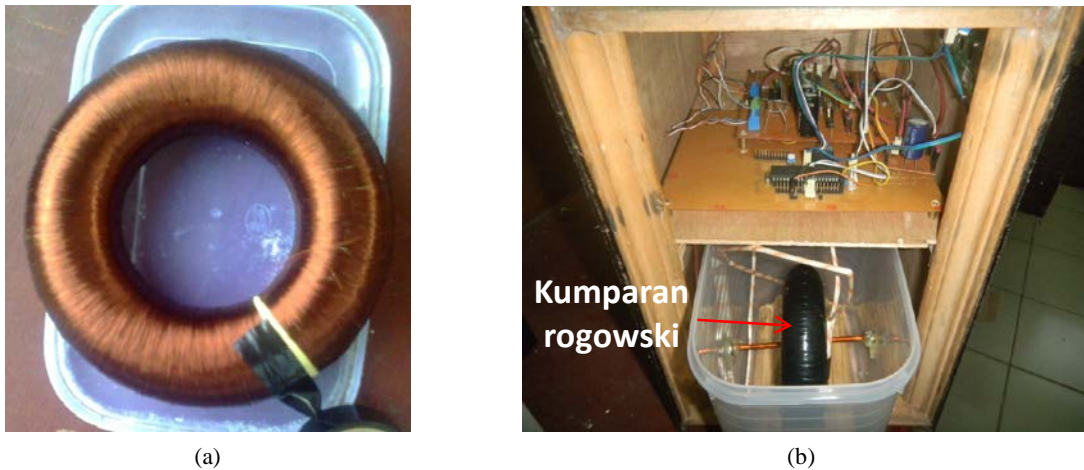
Tabel 1. Parameter kumparan Rogowski

a (cm)	b (cm)	T_r (lilitan)
2,4	5,5	5648

Validasi terhadap metode perhitungan THDi dilakukan dengan menghitung nilai THDi dari sinyal arus i yang berbentuk sinusoid murni yang secara analitis mempunyai nilai THDi = 0. Misalkan gelombang yang ditampilkan oleh osiloskop adalah $i(t) = \sin 100\pi t$. Gelombang tersebut mempunyai $T = 20\text{mS}$. Gelombang i tersebut dicuplik sejumlah $N=21$ sampel, sehingga menghasilkan $\Delta t=1\text{mS}$. Perhitungan THDi dilakukan menggunakan tabel 2.

Pada tabel 2, kolom 5 adalah faktor pengali terhadap sinyal arus yang ditampilkan pada layar osiloskop. Nilai tersebut ditentukan oleh parameter konstruksi kumparan Rogowski dan rangkaian integratornya. Kolom 6 adalah data sampel arus dikali faktor pengalinya. Kolom 7 cukup jelas. Kolom 8 (Δt) menyatakan periode pencuplikan dalam satuan mS. Kolom 9 menyatakan luas trapesium yang dibentuk oleh $I_{k+1}\cos[2\pi k/(N-1)]$ dan $I_k\cos[2\pi(k-1)/(N-1)]$. Kolom 12 menyatakan luas trapesium yang dibentuk oleh $I_{k+1}\sin[2\pi k/(N-1)]$ dan $I_k\sin[2\pi(k-1)/(N-1)]$. Kolom 13 menyatakan kuadrat terhadap nilai arus pada kolom 6, sedangkan kolom 14 menyatakan luas trapesium yang dibentuk oleh I_{k+1}^2 dan I_k^2 .

Dari tabel 2 diperoleh total luas trapesium pada kolom 9 sebesar $-8,8 \times 10^{-16}$, sehingga dengan menggunakan persamaan (19) diperoleh $a_1 = (2/T) \times$ total luas trapesium pada kolom 9 atau $a_1 = (2/20) \times (-8,8 \times 10^{-16}) = -8,8 \times 10^{-17} \approx 0$. Nilai T dinyatakan dalam satuan mS. Dari tabel 2 juga diketahui bahwa total luas trapesium pada kolom 12 adalah 53,10113579, sehingga dengan menggunakan persamaan (20) diperoleh $b_1 = (2/20) \times 53,10113579 = 5,31011358$. Dengan menggunakan persamaan (14) diperoleh $I_{1-rms} = 3,754817321$. Dari tabel 2 juga diperoleh total luas trapesium pada kolom 14 sebesar 281,9730679. Dengan menerapkan persamaan (18) diperoleh nilai rms dari arus yang ditampilkan pada layar osiloskop sebesar $I_{rms} = \sqrt{(281,9730679/20)} = 3,754817359$. Dengan menerapkan persamaan (1), berdasarkan nilai I_{1-rms} dan nilai I_{rms} diatas diperoleh THDi sebesar 0,000142.



Gambar 6. Kumpanan Rogowski yang dibuat (a). Gambar b memperlihatkan kumpanan Rogowski dan rangkaian pengkondisi sinyalnya

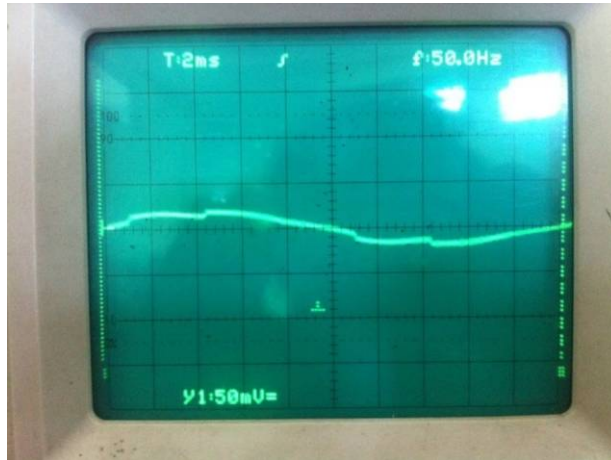
Akurasi perhitungan THDi dapat dinyatakan oleh galat perhitungan yaitu selisih antara perhitungan THDi secara analitis dengan perhitungan THDi secara numerik. Dari perhitungan-perhitungan diatas, diperoleh akurasi perhitungan THDi sebesar -0,000142 atau -0,0142%. Akurasi perhitungan THDi dapat ditingkatkan dengan memperbanyak jumlah sampel arus dalam 1 periode, karena total luas trapesium semakin mendekati luas grafik gelombang arus i .

Tabel 2. Perhitungan THDi arus sinusoid murni, jumlah sampel arus $N=21$

k	k-1	cos[k-1]	i[k]	kaliibrasi	I[k]	I[k]xocos[k-1]	Δt	Luas_trap1[k]	sin[k-1]	I[k]xsin[k-1]	Luas_trap2[k]	Sqr-I [k]	Luas_trap3[k]
1	0	1	0	5,31	0	0	1	0,78024201	0	0	0,253515997	0	1,346095912
2	1	0,951	0,309	5,31	1,64079	1,560484021	1	2,0432308	0,309	0,507031994	1,171131065	2,6922	6,220412111
3	2	0,809	0,588	5,31	3,12228	2,52597758	1	2,525489794	0,588	1,835230137	2,655298625	9,7486	14,10122206
4	3	0,588	0,809	5,31	4,29579	2,525002008	1	2,042739557	0,809	3,475367113	4,139010909	18,4538	21,97719638
5	4	0,309	0,951	5,31	5,04981	1,560477106	1	0,780238553	0,951	4,802654705	5,056327353	25,5006	26,84834052
6	5	0	1	5,31	5,31	0	1	-0,780238553	1	5,31	5,056327353	28,1961	26,84834052
7	6	-0,309	0,951	5,31	5,04981	-1,560477106	1	-2,042739557	0,951	4,802654705	4,139010909	25,5006	21,97719638
8	7	-0,588	0,809	5,31	4,29579	-2,525002008	1	-2,525489794	0,809	3,475367113	2,655298625	18,4538	14,10122206
9	8	-0,809	0,588	5,31	3,12228	-2,52597758	1	-2,0432308	0,588	1,835230137	1,171131065	9,7486	6,220412111
10	9	-0,951	0,309	5,31	1,64079	-1,560484021	1	-0,78024201	0,309	0,507031994	0,253515997	2,6922	1,346095912
11	10	-1	0	5,31	0	0	1	0,78024201	0	0	0,253515997	0	1,346095912
12	11	-0,951	-0,309	5,31	-1,64079	1,560484021	1	2,0432308	-0,309	0,507031994	1,171131065	2,6922	6,220412111
13	12	-0,809	-0,588	5,31	-3,12228	2,52597758	1	2,525489794	-0,588	1,835230137	2,655298625	9,7486	14,10122206
14	13	-0,588	-0,809	5,31	-4,29579	2,525002008	1	2,042739557	-0,809	3,475367113	4,139010909	18,4538	21,97719638
15	14	-0,309	-0,951	5,31	-5,04981	1,560477106	1	0,780238553	-0,951	4,802654705	5,056327353	25,5006	26,84834052
16	15	0	-1	5,31	-5,31	0	1	-0,780238553	-1	5,31	5,056327353	28,1961	26,84834052
17	16	0,309	-0,951	5,31	-5,04981	-1,560477106	1	-2,042739557	-0,951	4,802654705	4,139010909	25,5006	21,97719638
18	17	0,588	-0,809	5,31	-4,29579	-2,525002008	1	-2,525489794	-0,809	3,475367113	2,655298625	18,4538	14,10122206
19	18	0,809	-0,588	5,31	-3,12228	-2,52597758	1	-2,0432308	-0,588	1,835230137	1,171131065	9,7486	6,220412111
20	19	0,951	-0,309	5,31	-1,64079	-1,560484021	1	-0,78024201	-0,309	0,507031994	0,253515997	2,6922	1,346095912
21	20	1	0	5,31	0	0	1	0,78024201	0	0	0,253515997	0	1,346095912
Total								-8,88178E-16	Total		53,10113579	Total	281,9730679

Metode ini telah digunakan untuk menghitung THDi dari arus masukan rangkaian transformator-penyearah 6-pulsa. Bentuk sinyal arus i diperlihatkan pada gambar 7. Sinyal arus i dicuplik sejumlah 21 sampel. Perhitungan THDi dilakukan dengan menggunakan tabel 3. Dari tabel 3 diperoleh

$a_1=(2/20) \times (0,091858832)=0,0091858832$ dan $b_1=(2/20) \times 1,145890783=0,1145890783$. Dengan menggunakan persamaan (14) diperoleh $I_{1-rms} = 0,081286645$. Dengan menerapkan persamaan (18) terhadap total luas trapesium pada kolom 14, diperoleh $I_{rms} = \sqrt{(0,134269828/20)}=0,081935898$. Dengan menerapkan persamaan (1) diperoleh THDi arus masukan dari rangkaian transformator-penyearah 6-pulsa sebesar 0,1266 atau 12,66%.

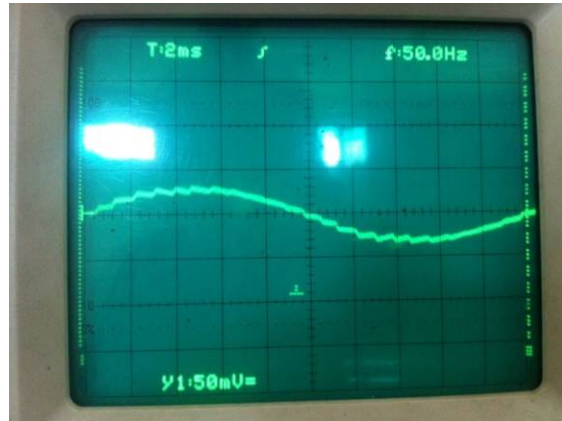


Gambar 7. Bentuk arus masukan rangkaian transformator-penyearah 6-pulsa.

Tabel 3. Perhitungan THDi arus masukan transformator-penyearah 6-pulsa, jumlah sampel arus $N=21$

k	k-1	cos[k-1]	i[k]	kalibrasi	I[k]	I[k]x cos[k-1]	Δt	Luas_trap1[k]	sin[k-1]	I[k]x sin[k-1]	Luas_trap2[k]	Sqr-I [k]	Luas_trap3[k]
1	0	1	0	5,31	0	0,012625275	1	0,012625275	0	0	0,004102201	0	0,000352451
2	1	0,951	0,005	5,31	0,02655	0,02525055	1	0,042696437	0,309	0,008204401	0,025950178	0,0007	0,003115669
3	2	0,809	0,014	5,31	0,07434	0,060142323	1	0,055040279	0,588	0,043695956	0,05621502	0,0055	0,006372319
4	3	0,588	0,016	5,31	0,08496	0,049938235	1	0,04548012	0,809	0,068734084	0,097493418	0,0072	0,012420382
5	4	0,309	0,025	5,31	0,13275	0,041022006	1	0,020511003	0,951	0,126252752	0,121536376	0,0176	0,015634737
6	5	0	0,022	5,31	0,11682	0	1	-0,016408802	1	0,11682	0,108911101	0,0136	0,012462676
7	6	-0,309	0,02	5,31	0,1062	-0,032817605	1	-0,03981735	0,951	0,101002202	0,082720203	0,0113	0,008811281
8	7	-0,588	0,015	5,31	0,07965	-0,046817095	1	-0,044887949	0,809	0,064438204	0,0478248	0,0063	0,004581866
9	8	-0,809	0,01	5,31	0,0531	-0,042958802	1	-0,034104676	0,588	0,031211397	0,019707899	0,0028	0,001762256
10	9	-0,951	0,005	5,31	0,02655	-0,02525055	1	-0,012625275	0,309	0,008204401	0,004102201	0,0007	0,000352451
11	10	-1	0	5,31	0	0	1	0,02525055	0	0	0,008204401	0	0,001409805
12	11	-0,951	-0,01	5,31	-0,0531	0,050501101	1	0,063913473	-0,309	0,016408802	0,036294658	0,0028	0,005977573
13	12	-0,809	-0,018	5,31	-0,09558	0,077325844	1	0,069874319	-0,588	0,056180514	0,07104906	0,0091	0,010206988
14	13	-0,588	-0,02	5,31	-0,1062	0,062422794	1	0,045979319	-0,809	0,085917605	0,088409793	0,0113	0,010206988
15	14	-0,309	-0,018	5,31	-0,09558	0,029535844	1	0,014767922	-0,951	0,090901982	0,103860991	0,0091	0,011391224
16	15	0	-0,022	5,31	-0,11682	0	1	-0,016408802	-1	0,11682	0,108911101	0,0136	0,012462676
17	16	0,309	-0,02	5,31	-0,1062	-0,032817605	1	-0,03981735	-0,951	0,101002202	0,082720203	0,0113	0,008811281
18	17	0,588	-0,015	5,31	-0,07965	-0,046817095	1	-0,049183829	-0,809	0,064438204	0,05094594	0,0063	0,00520218
19	18	0,809	-0,012	5,31	-0,06372	-0,051550563	1	-0,038400557	-0,588	0,037453676	0,022829039	0,0041	0,00238257
20	19	0,951	-0,005	5,31	-0,02655	-0,02525055	1	-0,012625275	-0,309	0,008204401	0,004102201	0,0007	0,000352451
21	20	1	0	5,31	0	0	1	0,02525055	0	0	0,008204401	0	0,001409805
							Total	0,091858832		Total	1,145890783	Total	0,134269828

Pengukuran dan perhitungan THDi arus masukan dari rangkaian transformator-penyearah 24-pulsa menghasilkan gambar bentuk arus i seperti pada gambar 8. Perhitungan THDi dilakukan menggunakan tabel 4. Dari tabel 4 diperoleh $a_1 = (2/20) \times (0,006563521) = 0,0006563521$ dan $b_1 = (2/20) \times 1,67056718 = 0,167056718$. Dengan menggunakan persamaan (14) diperoleh $I_{1-rms} = 0,11812785$. Dengan menerapkan persamaan (18) terhadap total luas trapesium pada kolom 14, diperoleh $I_{rms} = \sqrt{(0,279592528/20)} = 0,11823547$. Dengan menerapkan persamaan (1) diperoleh THDi arus masukan dari rangkaian transformator-penyearah 24-pulsa sebesar 0,0427 atau 4,27%.



Gambar 8. Bentuk arus masukan rangkaian transformator-penyearah 24-pulsa.

Tabel 4. Perhitungan THDi arus masukan transformator-penyearah 24-pulsa, jumlah sampel arus $N=21$

k	k-1	cos[k-1]	i[k]	kalibrasi	I[k]	I[k]xcos[k-1]	Δt	Luas_trap1[k]	sin[k-1]	I[k]xsin[k-1]	Luas_trap2[k]	Sqr-I [k]	Luas_trap3[k]
1	0	1	0	5,31	0	0,02525055	0	0,008204401	0	0,016408802	0,039415798	0,0028	0,001409805
2	1	0,951	0,01	5,31	0,0531	0,050501101	1	0,068209353	0,309	0,016408802	0,039415798	0,0028	0,007049025
3	2	0,809	0,02	5,31	0,1062	0,085917605	1	0,081973048	0,588	0,062422794	0,0849099	0,0113	0,014450501
4	3	0,588	0,025	5,31	0,13275	0,078028492	1	0,06362745	0,809	0,107397006	0,129450154	0,0176	0,021499526
5	4	0,309	0,03	5,31	0,1593	0,049226407	1	0,024613204	0,951	0,151503303	0,160711651	0,0254	0,027124648
6	5	0	0,032	5,31	0,16992	0	1	-0,022972323	1	0,16992	0,155661541	0,0289	0,025489274
7	6	-0,309	0,028	5,31	0,14868	-0,045944647	1	-0,061986569	0,951	0,141403083	0,124400044	0,0221	0,019864152
8	7	-0,588	0,025	5,31	0,13275	-0,078028492	1	-0,081973048	0,809	0,107397006	0,0849099	0,0176	0,014450501
9	8	-0,809	0,02	5,31	0,1062	-0,085917605	1	-0,068209353	0,588	0,062422794	0,039415798	0,0113	0,007049025
10	9	-0,951	0,01	5,31	0,0531	-0,050501101	1	-0,02525055	0,309	0,016408802	0,008204401	0,0028	0,001409805
11	10	-1	0	5,31	0	0	1	0,02525055	0	0	0,008204401	0	0,001409805
12	11	-0,951	-0,01	5,31	-0,0531	0,050501101	1	0,068209353	-0,309	0,016408802	0,039415798	0,0028	0,007049025
13	12	-0,809	-0,02	5,31	-0,1062	0,085917605	1	0,081973048	-0,588	0,062422794	0,0849099	0,0113	0,014450501
14	13	-0,588	-0,025	5,31	-0,13275	0,078028492	1	0,06362745	-0,809	0,107397006	0,129450154	0,0176	0,021499526
15	14	-0,309	-0,03	5,31	-0,1593	0,049226407	1	0,024613204	-0,951	0,151503303	0,160711651	0,0254	0,027124648
16	15	0	-0,032	5,31	-0,16992	0	1	-0,022972323	-1	0,16992	0,155661541	0,0289	0,025489274
17	16	0,309	-0,028	5,31	-0,14868	-0,045944647	1	-0,061986569	-0,951	0,141403083	0,124400044	0,0221	0,019864152
18	17	0,588	-0,025	5,31	-0,13275	-0,078028492	1	-0,081973048	-0,809	0,107397006	0,0849099	0,0176	0,014450501
19	18	0,809	-0,02	5,31	-0,1062	-0,085917605	1	-0,068209353	-0,588	0,062422794	0,039415798	0,0113	0,007049025
20	19	0,951	-0,01	5,31	-0,0531	-0,050501101	1	-0,02525055	-0,309	0,016408802	0,008204401	0,0028	0,001409805
21	20	1	0	5,31	0	0	1	0,02525055	0	0	0,008204401	0	0,001409805
Total								0,006563521	Total		1,67056718	Total	0,279592528

Dari gambar 7 dan gambar 8, bentuk arus masukan rangkaian transformator-penyearah 24-pulsa lebih mendekati gelombang sinus daripada bentuk arus masukan rangkaian transformator-penyearah 6-pulsa. Ini berarti nilai THDi-nya lebih kecil daripada THDi penyearah 6-pulsa. Hipotesis ini terbukti dari hasil pengukuran dan perhitungan yang memperlihatkan bahwa THDi arus masukan penyearah 24-pulsa adalah 4,27% sementara THDi arus masukan penyearah 6-pulsa adalah 12,66%.

KESIMPULAN

Telah ditampilkan metode pengukuran THDi menggunakan sensor kumparan Rogowski dan osiloskop. Metode tersebut telah divalidasi dengan membandingkannya dengan nilai THDi arus sinusoid murni yang dihitung secara analitis. Dari proses tersebut untuk sampel arus sejumlah 21 data, diperoleh akurasi sebesar -0,0142%. Metode tersebut juga telah diterapkan untuk mengukur THDi arus masukan transformator-penyearah 6-pulsa dan THDi arus masukan transformator-penyearah 24-pulsa. Dari gambar-gambar yang ditampilkan pada osiloskop, arus masukan transformator-penyearah 24-pulsa lebih mendekati gelombang sinus daripada arus masukan transformator-penyearah 6-pulsa. Ini berarti THDi arus masukan penyearah 24-pulsa lebih kecil daripada THDi arus masukan penyearah 6-pulsa. Kondisi ini bersesuaian dengan hasil pengukuran THDi untuk masing-masing sinyal arus, dimana THDi penyearah 24-pulsa sebesar 4,27% dan THDi penyearah 6-pulsa sebesar 12,66%.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Andri Saputra, alumni Program D3 Teknik Listrik Universitas Riau atas pembuatan kumparan Rogowski dan rangkaian pengkondisi sinyalnya dan kepada Junaedi, mahasiswa Program S1 Teknik Elektro Universitas Riau atas pengukuran arus masukan rangkaian penyearah 6-pulsa dan 24-pulsa.

REFERENSI

1. Fluke Corporation, *Fluke 434/435, Three Phase Power Quality Analyzer: Users Manual*, Dec 2008, p. 23-2
2. A. Bien, G. Buchala dan A. Moronczyk, *THD factor measurement with using watch filtration of the fundamental frequency*, PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL POWER QUALITY AND UTILISATION, Cracow-Poland, September 1999, p. 217-221.
3. G.E. Mog, dan E. P. Ribiero, *Total Harmonic Distortion Calculation by Filtering for Power Quality Monitoring*, PROCEEDINGS OF IEEE-PES LATIN AMERICA CONFERENCE ON TRANSMISSION AND DISTRIBUTION 2004, p.629-632
4. D. A. Ward, dan J. L. T. Exon, *Using Rogowski coils for transient current measurements*, Engineering Science and Education Journal. Vol. 2, No. 3, p. 105-113, Jun. 1993
5. L. A. Kojovic, et al, *Practical Aspects of Rogowski Coil Applications to Relaying*. IEEE Power System Relaying Committee Special Report. September 2010
6. J. D. Ramboz, *Machinable Rogowski Coil, Design and Calibration*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. Vol. 45 no.2. April 1996. pp. 511-515
7. J. Hlavacek, et al, *The Rogowski Coil Design Software*, 16th IMEKO TC4 Symposium, Florence, Italy, September 2008.
8. S. C. Chapra dan P. C. Raymond, *Numerical Methods for Engineers*, Third Edition, McGraw-Hill, 1998, p.582-609