

Implementasi *Fast Fourier Transform* dalam Pengembangan Alat dan Bantuan Program Untuk Mengukur Total *Harmonic Distortion*

Judi Prajetno Sugiono¹, Hari Sutiksno², Setya Ardhi³, Ivan B. Sasaka⁴

^{1,2,3}Sekolah Tinggi Teknik Surabaya

¹jpsugiono@stts.edu, ²harisutiksno@gmail.com, ³setyaardhi@stts.edu, ⁴sasaka83@yahoo.com

ABSTRAK

Total Harmonic Distortion (THD) adalah salah satu parameter yang menyatakan kualitas dari sebuah sinyal listrik yang hendak dipergunakan dibandingkan dengan sinyal sinusoidal murni. THD adalah suatu ukuran yang menyatakan seberapa besar sinyal yang tidak lagi berbentuk seperti aslinya. Dengan analisa Fourier, besarnya THD dinyatakan sebagai perbandingan dari rata-rata geometris dari akar jumlah kuadrat harmonisa terhadap fundamental frekuensinya. Penelitian ini bertujuan membangun sebuah alat pengukur THD dengan memanfaatkan microcontroller AVR untuk menghitung THD secara digital. Perhitungan Harmonisa sinyal dalam deret Fourier tidak dilakukan dengan cara tradisional, tetapi dilakukan dengan algoritma *Fast Fourier Transform* (FFT). Algoritma ini secara komputasi numeris akan memberikan kecepatan hitung yang lebih baik dibanding dengan perhitungan tradisional. Uji coba alat dilakukan dengan menggunakan beberapa bentuk sinyal, kemudian hasilnya akan dibandingkan dengan hasil yang dihitung dengan computer. Hasil uji coba menunjukkan bahwa metode ini dapat mampu memberikan akurasi pengukuran besarnya THD dari sebuah sinyal dengan baik.

Kata Kunci: *Total Harmonic Distortion* (THD), *Fast Fourier Transform* (FFT), Frekuensi Spektrum Harmonisa

ABSTRACT

Total Harmonic Distortion (THD) is one parameter that states the quality of an electrical signal that is to be used compared to pure sinusoidal signals. THD is a measure that states how much the signal is no longer shaped like the original. With Fourier Analysis, the THD magnitude is expressed as a comparison of the geometric mean of the root number of the harmonic square of the frequency fundamental. This study aims to build a THD measuring device using the AVR microcontroller to digitally calculate THD. Calculation of signal harmonics in Fourier series is not done in the traditional way, but is done using the *Fast Fourier Transform* (FFT) algorithm. This algorithm in numerical computation will provide a better calculated speed compared to traditional calculations. The measuring device is test using several forms of signals, then the results will be compared with results calculated on a computer. The results of the trial show that this method can provide accuracy in measuring the THD size of a signal properly.

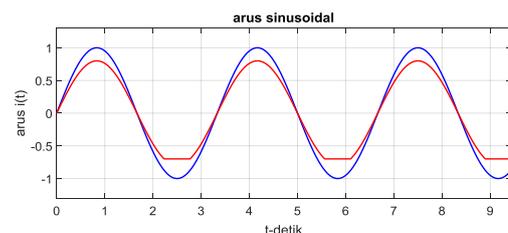
Keywords: *Total Harmonic Distortion* (THD), *Fast Fourier Transform* (FFT), Harmonic frequency spectrum.

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan daya listrik adalah sangat vital. Selain masalah ketersediaan, juga masalah kualitas. Kualitas listrik bukan hanya tersaji saat dihasilkan oleh sumber energi listrik, tetapi dipengaruhi juga oleh perangkat yang menggunakannya.

Setiap perangkat listrik memiliki potensi menghasilkan suatu gangguan pada arus listrik. Tegangan listrik yang seharusnya berbentuk sinusoidal murni setelah melewati beban yang non linier (contoh: rangkaian penyearah dalam komputer) akan menghasilkan perubahan bentuk gelombang [1].

Gelombang ini mungkin masih bisa diidentifikasi sebagai gelombang sinus tetapi sudah tidak murni lagi – disebut telah mengalami Distorsi [3]. Jika sumber daya listrik yang sama kemudian dipakai untuk mengaktifkan sebuah peralatan yang lain maka kualitas daya yang diperolehnya tidaklah sama dengan arus listrik [2] yang tanpa distorsi yang bisa terlihat pada gambar 1.



Gambar 1. Contoh Sinyal sinusoidal murni dan sinusoidal terdistorsi

Distorsi pada gelombang listrik yang besar akan berakibat berkurangnya kualitas daya yang dipergunakan, yang tentunya membawa dampak merugikan. Usaha-usaha untuk meningkatkan kualitas daya menjadi lebih baik dapat dilakukan jika diketahui seberapa besar distorsi yang terjadi. Sebab itu penelitian yang dilakukan ini bertujuan untuk membangun perangkat yang dapat mengukur besarnya distorsi yang terjadi pada arus atau tegangan listrik yang dipergunakan. Di samping perangkat yang hendak dibuat dalam mengukur

distorsi pada arus dan tegangan listrik maka nilai yang telah diukur THD akan diinputkan dalam program pada MATLAB untuk bisa memberikan hasil yang lebih pasti yang bisa dilihat pada Tabel 1 mengenai Hasil uji coba tiga bentuk gelombang dengan frekuensi berbeda untuk mengukur besarnya distorsi, dimana dengan program bisa membandingkan nilai yang diukur pada alat dan hasil ukur berdasarkan teori dengan bantuan MATLAB. Pada penelitian ini hasil Total Harmonic Distortion dicoba dengan perangkat yang dibuat dibandingkan dengan nilai yang diinputkan ke program tanpa dibandingkan dengan alat THD umumnya, dimana mengingat instrumentasi tersebut belum terpenuhi pada inventaris penelitian.

Sinyal Harmonisa

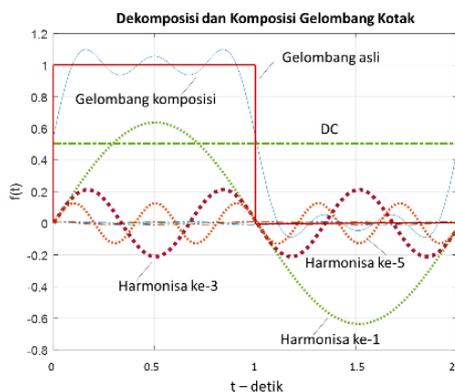
Menurut teori deret Fourier [4], sebuah sinyal dapat di dekomposisi menjadi komponen DC, dan sejumlah komponen harmonisa.

$$f(t) = DC + \sum_{n=1}^{\infty} \text{harmonisa ke } -n \quad (1)$$

Gambar 2 mengilustrasikan sebuah gelombang kotak dengan amplitude 1 volt, periode fundamental sebesar 2 detik, yang di dekomposisi dengan deret Fourier menjadi nilai DC, dan harmonisa ke-1 sampai harmonisa ke-n [4].

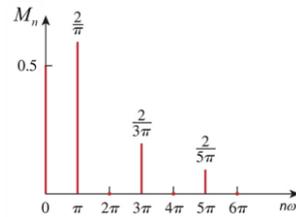
$$f(t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sin(\pi t) + \frac{2}{3\pi} \sin(3\pi t) + \frac{2}{5\pi} \sin(5\pi t) + \dots \quad (2)$$

Dalam contoh di gambar 2 ini hanya disajikan sampai n=5 saja. Jika dicermati, harmonisa yang muncul hanyalah harmonisa untuk n bernilai ganjil saja, n yang bernilai genap memberikan hasil sama dengan nol [12]. Pengertian ini dapat dilihat dengan lebih jelas dengan bantuan gambar berbentuk spektrum seperti yang disajikan gambar 4.



Gambar 2. Dekomposisi sinyal menjadi nilai DC dan harmonisa

Saat n=0 yang ditunjukkan adalah nilai DC sinyal, sedang n=1 disebut harmonisa fundamental yang mana nilainya adalah paling besar dari nilai harmonisa untuk n yang lain [11].

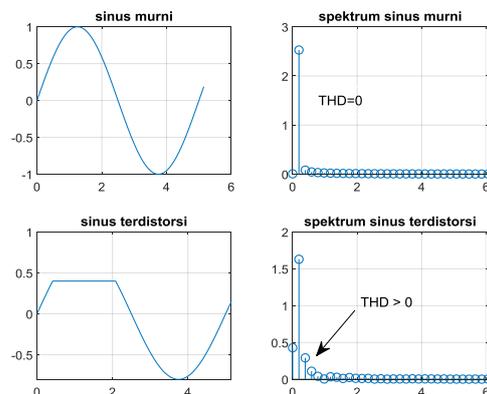


Gambar 3. Spektrum gelombang kotak dari gambar 2

Jika dengan Analisa Fourier sebuah sinyal dapat didekomposisi, maka sebaliknya sebuah sinyal dapat dikomposisi (dibentuk) oleh sekumpulan sinyal DC dan sinyal harmonisa [10], jika semua kondisi awal dipenuhi. Akan tetapi jika jumlah sinyal harmonisa-nya tidak lengkap maka akan didapati bentuk gelombang yang tak sempurna. Seperti yang ditunjukkan gambar 3, jika hanya disajikan sampai harmonisa ke-5 saja, gelombang komposisi belum menunjukkan bentuk gelombang kotak yang sempurna. Ketidakterlengkapan ini yang disebut diatas sebagai distorsi harmonik.

Total Harmonic Distortion

Seperti dapat diamati dari bentuk gelombang pada Gambar 4, jika gelombang asli yang dianalisa adalah gelombang sinus murni (ideal) maka analisa Fourier akan memberikan satu komponen saja yaitu harmonisa fundamental saja (yaitu harmonisa ke-1) – yang berarti bahwa tidak ada yang mendistorsi gelombang tersebut [9]. Jika sebuah gelombang sinusoidal memberikan komponen harmonisa lebih daripada itu (yaitu n ≥ 2) maka bisa dipastikan gelombang tersebut mengalami distorsi harmonis.



Gambar 4. THD sinyal sinus murni dan tidak murni *Total Harmonic Distortion* atau THD, didefinisikan sebagai penjumlahan semua komponen harmonik dari bentuk gelombang tegangan atau arus dibandingkan terhadap

komponen fundamental dari tegangan atau gelombang arusnya [8]

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} |M_n|^2}{|M_1|^2}} \cdot 100\% \quad (3)$$

Dimana:
 |M_n| adalah magnitude dari harmonisa ke n Rumus di atas menunjukkan perhitungan untuk THD pada sinyal tegangan. Hasil akhirnya adalah persentase yang membandingkan komponen harmonik dengan komponen fundamental dari sinyal. Semakin tinggi persentase THD, semakin banyak distorsi yang hadir pada sinyal listrik.

Fast Fourier Transform

Untuk menghitung harmonisa gelombang dalam bentuk spektrum dapat dipergunakan teori *Fourier Transform*. *Fourier Transform* akan memetakan fungsi dalam domain waktu, kedalam fungsi dengan persamaan [7]:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \rightarrow \omega: \text{frekuensi kontinu} \quad (4)$$

Perhitungan dengan computer mengharuskan untuk merubah persamaan diatas dalam bentuk diskrit:

$$F(\Omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(n)e^{-j\Omega n} \rightarrow \Omega: \text{frekuensi diskrit} \quad (5)$$

Perhitungan diskrit ini memunculkan beberapa kendala yaitu hasil transformasi memiliki bentuk kontinu, yang berarti membutuhkan proses pendiskritan ulang [6]. Kesulitan ini kemudian diatasi dengan sebuah algoritma yang dinamakan *Discrete Fourier Transform* atau DFT. DFT melakukan tiga tahap proses: Pertama, mensampling sinyal pada frekuensi sampling ≥ 2 frekuensi maksimum; Kedua, memotong sinyal dalam jumlah data yang cukup; Ketiga melakukan resampling pada domain frekuensi (yang berarti konvolusi pada waktu). Proses ini menghasilkan sebuah persamaan:

$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n)e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} = \sum_{n=0}^{N-1} f(n)W_N^{nk}; \rightarrow \text{dimana } W_N^{nk} = e^{-j\frac{2\pi}{N}nk}$$

Setelah diteliti, DFT masih menyisakan problem waktu hitung yang sangat lama. Jika jumlah data yang dihitung adalah $N=2\gamma$, dimana γ bilangan integer maka perhitungan DFT membutuhkan N^2 perkalian dan $N(N-1)$ penjumlahan, dan tentunya jumlah memori besar. Untuk mengatasi hal tersebut, dua orang peneliti Cooley dan Tukey mengajukan algoritma yang disebut *Fast Fourier Transform* (FFT) [4]. Algoritma ini memetakan input data

dalam bentuk diagram kupu-kupu seperti gambar 6. Dengan ketentuan $N=2\gamma$, maka untuk 8 buah data (diperoleh $\gamma=3$) dalam format DFT dituliskan:

$$F(k) = \sum_{n=0}^7 f(n)W_8^{nk} \quad (7)$$

Pangkat n dan k diuraikan dalam bentuk biner:

$$N = 8 = 2^3 \begin{cases} n = 4n_2 + 2n_1 + n_0, & \rightarrow n_i = 0 \text{ atau } 1 \\ k = 4k_2 + 2k_1 + k_0 & \rightarrow k_i = 0 \text{ atau } 1 \end{cases}$$

n dan k ditulis dalam bentuk seperti diatas, disertai penyesuaian operasi sigma:

$$F(k_2, k_1, k_0) = \sum_{n_0=0}^1 \sum_{n_1=0}^1 \sum_{n_2=0}^1 f_0(n_2, n_1, n_0) W_8^{(4n_2+2n_1+n_0)(4k_2+2k_1+k_0)}$$

$$F(k_2, k_1, k_0) = \sum_{n_0=0}^1 \sum_{n_1=0}^1 \sum_{n_2=0}^1 f_0(n_2, n_1, n_0) W_8^{(4n_2k_0)} W_8^{2n_1(2k_1+k_0)} W_8^{n_0(4k_2+2k_1+k_0)}$$

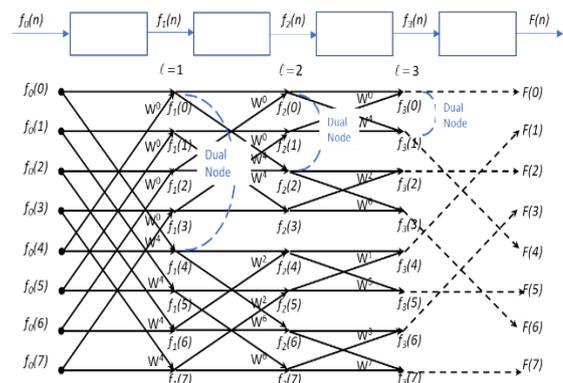
Disederhanakan:

$$f_1(k_0, n_1, n_0) = \sum_{n_2=0}^1 f_0(n_2, n_1, n_0) W_8^{(4n_2k_0)}$$

$$f_2(k_0, k_1, n_0) = \sum_{n_1=0}^1 f_1(k_0, n_1, n_0) W_8^{2n_1(2k_1+k_0)}$$

$$f_3(k_0, k_1, k_2) = \sum_{n_0=0}^1 f_2(k_0, k_1, n_0) W_8^{n_0(4k_2+2k_1+k_0)}$$

Pada gambar 5 bisa disimpulkan terdapat 3 array [5] (yaitu sejumlah $\gamma=3$) untuk memperoleh hasilnya. Tetapi Hasil akhir yang diperoleh memiliki urutan indeks $f_3(k_0, k_1, k_2)$ yang berbeda dengan yang diinginkan $F(k_2, k_1, k_0)$, maka perlu dilakukan satu kali proses yaitu pengurutan data.



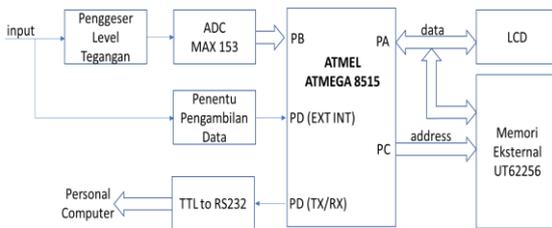
Gambar 5. Diagram Kupu-Kupu FFT dengan N=8

2. METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian ini dilakukan sejumlah langkah penelitian sebagai berikut:

- Studi literatur tentang konsep *Total Harmonic Distortion* dan perhitungannya menggunakan *Fast Fourier Transform*
- Analisis akan kebutuhan perangkat elektronik yang akan dipergunakan untuk membangun alat pengukur THD.
- Perancangan sistem alat ukur THD secara digital, yang memperhatikan kendala-kendala ketersediaan perangkat keras dan bahasa pemrograman yang tersedia.
- Implementasi dan Pengujian: adalah proses pembuatan alat dan pengujian terhadap sejumlah kondisi yang menimbulkan THD.

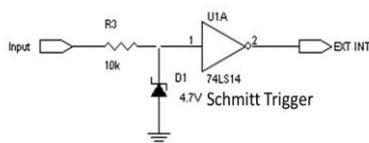
Desain Perangkat Keras



Gambar 6. Block Diagram Rangkaian THD meter

Blok diagram sistem THD meter dapat dilihat pada gambar 6, yang mana tersusun pada berikut ini. Mikrokontroler digunakan untuk mengendalikan keseluruhan sistem dan melakukan perhitungan FFT dan THD. Port A dan Port C digunakan sebagai data bus dan address bus yang terhubung pada LCD dan Memory; Port B digunakan untuk mengambil data dari ADC; Port D dipergunakan untuk komunikasi dengan personal komputer dan penanganan interrupt.

Rangkaian penentu pengambilan data, digunakan untuk menentukan berapa lama pengambilan data sinyal input.

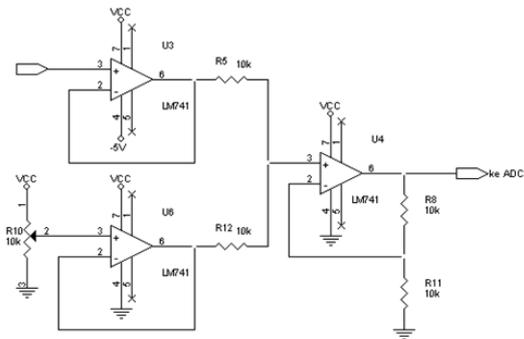


Gambar 7. Penentu Pengambilan Data

Rangkaian pada gambar 7 memanfaatkan kemampuan Schmitt Trigger untuk menghasilkan pulsa tunggal pada level tegangan tertentu. Dengan demikian jika sinyal input adalah sinyal periodik

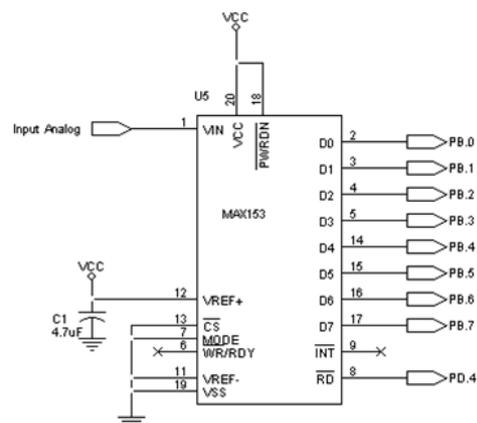
maka lama satu periode sinyal dapat terdeteksi. Sinyal yang diukur cukup satu periode saja..

Rangkaian penggeser level tegangan digunakan untuk menggeser level tegangan input, sehingga nilai negatif pada sinyal input tidak terjadi. Keberadaan nilai negatif tidak diijinkan pada input ADC. Rangkaian pada gambar 8 pada prinsipnya adalah rangkaian penjumlah sinyal dengan input tegangan DC.



Gambar 8. Rangkaian Penggeser Level Tegangan

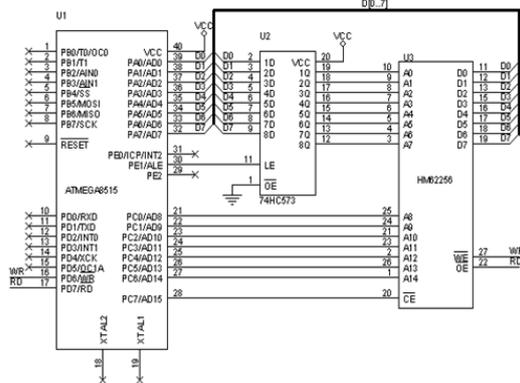
Rangkaian ADC pada gambar 9 digunakan untuk mensampling signal input menjadi sinyal digital. ADC MAX153 melakukan konversi tegangan analog pada kaki 1 (VIN) menjadi data digital 8 bit (D0-D7) ketika kaki RD diberi pulsa low sesaat dan kaki CS diberi tegangan low (diaktifkan). Pada sistem ini, kaki D0-D7 disambungkan langsung pada port B, sedangkan kaki RD disambungkan pada port D.7 ATmega8515. Memory RAM 62256 sebesar 32 Kbyte dipakai untuk menyimpan hasil hitung FFT. Port A ATmega8515 berfungsi sebagai pemberi informasi low order address bus dan data bus, Port C berfungsi sebagai pemberi informasi high order address bus.



Gambar 9. Rangkaian ADC Max 153

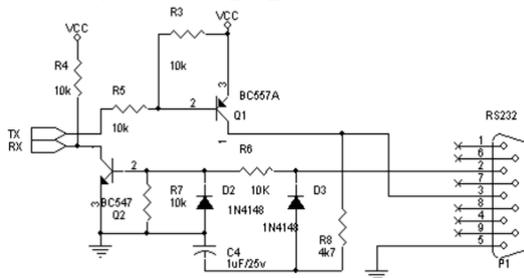
Port D.6 berfungsi untuk memberikan instruksi penulisan data ke memori eksternal

sedangkan Port D.7 pada gambar 10 berfungsi untuk memberikan instruksi pembacaan data dari memori eksternal.



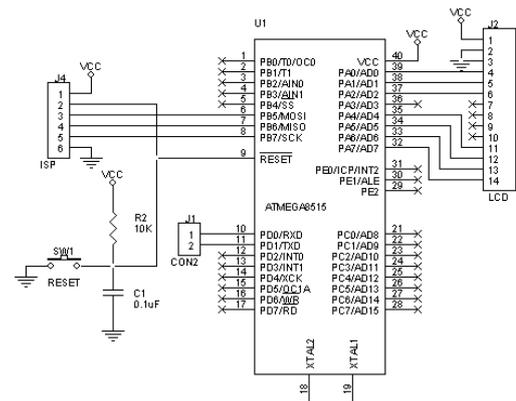
Gambar 10. Rangkaian Memori Eksternal

TTL to RS232 pada gambar 11 merupakan rangkaian untuk mentransfer data ke personal komputer atau PC. Jalur menuju Personal Komputer hanya digunakan sebagai sarana untuk uji coba alat dengan menggunakan program simulasi. Pengiriman data ke PC menggunakan teknik *interface* serial dengan memanfaatkan fasilitas USART yang ada pada ATmega8515 dan diterima oleh PC melalui serial *port*. Karena serial *port* pada PC menggunakan standard level RS232 sedangkan *mikrokontroler* menggunakan level TTL, maka harus ditambahkan sebuah rangkaian untuk mengubah level tegangan TTL menjadi level tegangan RS232.



Gambar 11. Rangkaian TTL to RS232

LCD L1632 dipergunakan untuk tampilan hasil ukur. LCD M1632 merupakan sebuah LCD penampil data dalam bentuk susunan dot matrix. LCD ini mempunyai kontroler yang terdiri dari ROM dan RAM yang dapat menyimpan data karakter yang akan ditampilkan. Semua fungsi LCD pada gambar 12 ini dikendalikan dengan pemberian instruksi sehingga LCD ini sangat mudah dikendalikan apabila dihubungkan dengan mikrokontroler.

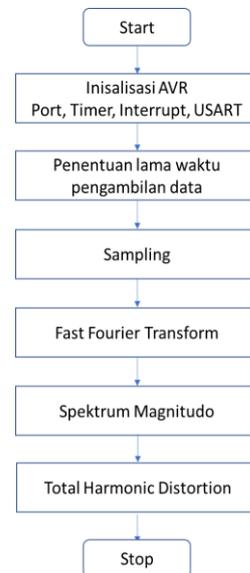


Gambar 12. Rangkaian LCD M1632

Desain Perangkat Lunak

Tahap berikutnya adalah pembuatan perangkat lunak yang dimulai dengan Inisialisasi sistem AVR yaitu fungsi *Port*, *Timer*, *Interrupt* dan USART. Setelah inialisasi selesai dilakukan, output rangkaian penentu pengambilan data dibaca dan dipakai sebagai interrupt untuk mengaktifkan *timer* yang mengukur panjang periode sinyal yang akan diukur. Sinyal input yang sudah dipastikan berada pada *range* positif (oleh rangkaian DC *adder*) disampling oleh ADC, disimpan dalam memori yang dapat dilihat pada gambar 13.

Data kemudian dihitung dengan algoritma FFT yang hasilnya masih berupa bilangan kompleks.



Gambar 13. Cara Kerja Sistem

Patut menjadi perhatian adalah perhitungan bilangan kompleks yang terjadi dilakukan dengan bentuk kartesian, mengikuti rumusan euler:

$$e^{i\theta} = (\cos \theta + i \sin \theta) / (2)$$

$$e^{-i\theta} = (\cos \theta - i \sin \theta) / (2i) \quad (10)$$

Untuk mendapatkan bentuk spektrum maka dikonversikan dalam magnitude (yakni nilai absolut) dan fasa. *Total Harmonic Distortion* kemudian dihitung berdasar jumlah harmonisa yang diinginkan (default dalam alat ini dihitung 5 harmonisa).

Perhitungan FFT

Proses perhitungan FFT yang dikembangkan oleh Cooley-Tukey dapat dibagi disimpulkan menjadi 4 tahap yaitu:

1. Perhitungan dilakukan satu array demi satu array mengikuti urutan variabel ℓ ; dimana nilai $\ell=1, 2, \dots, \gamma$
2. Dalam diagram kupu-kupu gambar 6, terlihat jelas munculnya pasangan dual node, yang berarti perhitungan tidak perlu dilakukan ulang untuk tiap pasang dual node. Dual node inilah yang mereduksi jumlah perkalian maupun penjumlahan dari DFT. Karena posisi pasangan dual node adalah sejauh yaitu $\frac{N}{2^\ell}$ maka diperoleh:

$$x_\ell(n) = x_{\ell-1}(n) + x_{\ell-1}(n + \frac{N}{2^\ell})W_N^p \quad (9)$$

$$x_\ell(n + \frac{N}{2^\ell}) = x_{\ell-1}(n) - x_{\ell-1}(n + \frac{N}{2^\ell})W_N^p$$

3. Perhitungan nilai p (yaitu $p=n.k$) pada WNP dikerjakan metode pergeseran:
 - Tentukan indeks array hitung n dalam bentuk biner dengan γ bit
 - Geser angka biner ini $\gamma - \ell$ ke kanan dan mengisi posisi bit baru di sebelah kiri dengan nol.
 - Membalik urutan bit – di konversi ke decimal yakni nilai p

Listing program dalam membalikan urutan bit bisa di tulis sebagai berikut :

```
int Hitung_IBR(int n)
{
    int IBR,j;
    char i;
    IBR=0;
    for(i=0;i<g;i++)
    {
        j=n/2;
        IBR=(2*IBR)+(n-(2*j));
        n=j;
    }
    return (IBR);
}
```

4. Proses pengurutan data (Bit Reversed)

Urutan indeks $f_3(k_0, k_1, k_2)$ memiliki urtan hasil yang berbeda dengan yang diinginkan

$F(k_2, k_1, k_0)$. Dengan sedikit manipulasi menggunakan segmen Hitung_IBR maka pengurutan bisa dilakukan dengan program. Listing program dari proses pengurutan data dapat dituliskan dengan menggunakan sebagai berikut

```
void Bit_Reversed(void)
{
    int i,n;
    float TREAL, TIMAG;
    for (i=1; i<=N1; i++)
    {
        n=Hitung_IBR(i);
        if (n>i)
        {
            TREAL=x[i];
            TIMAG=XIMAG[i];
            x[i]=x[n];
            XIMAG[i]=XIMAG[n];
            x[n]=TREAL;
            XIMAG[n]=TIMAG;
        }
    }
}
```

5. Penghitungan Spektrum

Karena hasil perhitungan algoritma FFT menghasilkan bilangan real dan imajiner, maka untuk mencari nilai spektrum frekuensi tidak boleh hanya dilihat nilai real saja tetapi nilai imajiner juga harus diperhitungkan.

Listing program dari perhitungan spektrum dapat dituliskan dengan menggunakan sebagai berikut

```
void Nilai_Spektrum(void)
{
    int i, xF;
    float m, n, xT;
    for (i=0; i<=N1; i++)
    {
        m=x[i]*x[i];
        n=XIMAG[i]*XIMAG[i];
        x[i]=(sqrt(m+n)/(N/2));
        xF=floor(x[i]);
        xT=x[i]-xF;
        if(xT<0.5) MAG[i]=floor(x[i]);
        else xMAG[i]=ceil(x[i]);
    }
}
```

6. Perhitungan THD

Karena harmonisa yang dominan adalah 5 harmonisa awal (data ke-2 sampai ke-6) maka jumlah indeks n dibatasi sampai $n = 6$. Potongan program berikut ini menunjukkan perhitungan THD.

```
void Hitung_THD(void)
{
    float xHsum, xTsum, thdT;
    int i, thdF;
    xTsum=0; xHsum=0;
    for(i=Na; i<Na+6; i++)
    {
```

```

    xTsum=xTsum+(x[i]*x[i]);
}
for(i=Na+1; i<Na+6; i++)
{
    xHsum=xHsum+(x[i]*x[i]);
}
THD=(sqrt(xHsum)/x[1])*100;
thdF=floor(THD);
thdT=THD-thdF;
if(thdT<0.5) THD=floor(THD);
else THD=ceil(THD);
}

```

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil penelitian dilaporkan hasil uji coba alat terhadap 3 macam bentuk sinyal, yaitu sinyal sinus murni, sinyal kotak, dan sinyal sinus yang terpotong pada puncaknya pada tabel 1.

Masing-masing bentuk sinyal tersebut diuji pada frekuensi yang berbeda-beda dan hasilnya akan dibandingkan dengan hasil simulasi dengan komputer

Tabel 1. Hasil uji coba tiga bentuk gelombang dengan frekuensi berbeda.

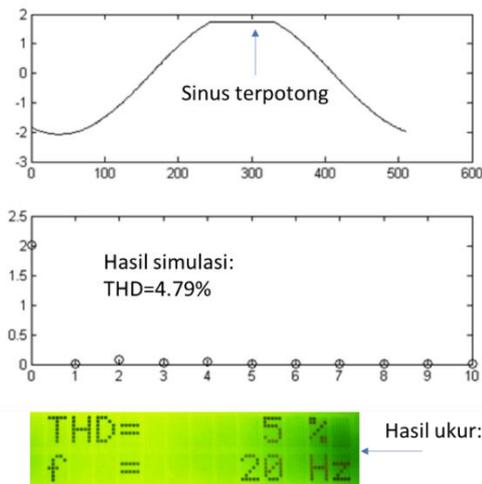
Frek (Hz)	Gelombang Sinus		Gelombang Kotak		Gelombang Sinus Terpotong	
	Teori*	Ukur	Teori*	Ukur	Teori*	Ukur
20	1.23%	1%	39.07	39%	4.79%	5%
200	1.41%	1%	39.38	39%	5.34%	5%
2K	1.57%	2%	39.38	39%	5.34%	6%
20K	12.42%	13%	29.32	29%	29.72%	28%

*) Hasil teori yang dimaksud pada tabel ini adalah hasil hitung dengan Matlab dengan perintah $M=fft(data)^2$; $THD=sqrt(\sum(M(2:6))/M(2))$

Dalam percobaan dilakukan juga pengukuran *inherent error* dari alat yang dibuat. *Inherent Error* adalah *error* atau kesalahan yang diakibatkan atau dihasilkan oleh alat itu sendiri.

Untuk mencari rata-rata *inherent error*, maka akan dilakukan 30 kali percobaan untuk gelombang sinus dan kotak dalam range frekuensi 20 Hz – 20 kHz.

Pada gambar 14 dapat disimpulkan bahwa alat ini stabil dan mempunyai *error* yang sama antara sinus dan kotak (1 %) jika alat ini dioperasikan pada *range* frekuensi dibawah 5 kHz.



Gambar 14. THD teoritis sinyal sinus terpotong dan THD hasil ukur

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan yang didapat setelah melakukan penelitian ini adalah sebagai berikut :

- Dari hasil uji coba dengan perhitungan di Matlab untuk sinyal dengan frekuensi dibawah 5 KHz menghasilkan error sebesar 2 %.
- Dari hasil uji coba *Inherent error* alat yang dibuat pada frekuensi gelombang dibawah 5 KHz didapatkan sebesar 1%.
- Jumlah data yang diukur mempengaruhi tingkat akurasi dan waktu hitung dari alat ukur yang dibuat. Tetapi untuk keperluan daya listrik yang diambil dari PLN dengan frekuensi diseperti 50 Hz tidak ditemui kendala.

5. REFERENSI

- [1] Lathi, B.P., *Linear Systems and Signals 2nd ed.*, Oxford University Press, 2005
- [2] Roberts, M.J., *Signals and Systems 2nd ed.*, McGraw Hill, 2012
- [3] Hwei P. Hsu, *Schaum's Outlines of Theory and Problems of Signals and Systems*, McGraw Hill, 1995
- [4] Alexander, Charles K. & Matthew N. O. Sadiku *Fundamentals of Electric Circuits 5th Ed.*, McGraw Hill, 2013
- [5] Brigham, E. Oran, *The Fast Fourier Transform & its Application*, Prentice Hall Inc., 1988
- [6] Rao & Kim & Hwang, *Fast Fourier Transform Algorithm and Applications*, Springer 2010
- [7] S. Nath, P. Sinha, S. K. Goswami, "A Wavelet Based Novel Method for the Detection of Harmonic Sources in Power Systems", *Electrical Power and Energy Systems*, 2011
- [8] D. Srinivasan, W. S. Ng, A.C. Liew, "NeuralNetwork-Based Signature Recognition for Harmonic Source Identification", *IEEE Trans. Power Del.* Vol. 21, No. 1, Jan. 2006

- [9] G. T. Heydt, "*Identification of harmonic sources by a state estimation technique*," IEEE Trans. Power Del. vol. 4, no. 1, pp. 569-576, jan. 1989.
- [10] "*IEEE Recommended Practices and Requirement for Harmonic Control in Electrical Power Systems*" IEEE std. 519-1992.
- [11] S. Nath, P. Sinha, S. K. Goswami, "A Wavelet Based Novel Method for the Detection of Harmonic Sources in Power Systems", Electrical Power and Energy Systems, 2012
- [12] H.Qian, R. Zhao, T. Chen, "*Interharmonics Analysis Based on Interpolating Windowed FFT Algorithm*" IEEE Trans. Power Del, Vol. 22, no. 2, Apr. 2007.