

Analisis Ketepatan Pengukur Tegangan *True* RMS Jala-Jala Listrik Berbasis Mikrokontroler ATmega 328P

Farobi Widia Nanda, Freddy Kurniawan*, Paulus Setiawan.

Departemen Teknik Elektro, Sekolah Tinggi Teknologi Adisutjipto, Yogyakarta

* email: freddykurniawan@stta.ac.id

Abstract

The analog AC-voltmeter usually can only measure the ideal-sinusoid voltage with narrow frequency range. Meanwhile, in fact the grid voltage is often not in the form of an ideal sinusoidal. To be able to measure a non-sinusoidal AC voltage with a wide range of frequency, a true-RMS voltmeter is needed. The research designed a true RMS measuring system using an ATmega 328P microcontroller. The input voltage is converted to pulse using Schmit trigger and fed to the microcontroller's external interrupt pin to calculate the input signal frequency. Meanwhile the microcontroller's ADC sampled the input signal with a frequency of 128 times the signal's frequency. RMS voltage calculations are performed using arithmetic operations for 16 and 32 bit integer variables. The test results show that the system can measure voltages with zero errors from 100 to 275 volts with a frequency of 50 Hz. The system can also measure voltages with zero errors at 220 volt with frequencies from 40 Hz to 150 Hz. However, this system can still be used to measure voltages ranging from 25 volts to 300 volts at frequencies from 35 Hz to 195 Hz with an average error of 0.21%. During RMS voltage calculation, the microcontroller's CPU usage was 13.35%, so that this system can be further developed.

Keywords — *True RMS voltage, Sampling, microcontroller ATmega328P*

1. Pendahuluan

Tegangan listrik merupakan jenis besaran fisik yang mempunyai fluktuasi bersifat periodik. Untuk itu pada beberapa kasus, nilai efektif atau RMS dari tegangan diperlukan untuk keperluan tertentu. Penggunaan alat ukur volt meter analog biasa kadang tidak memberikan nilai yang akurat. Alat ukur analog biasanya hanya dapat mengukur nilai RMS untuk isyarat yang memiliki bentuk ideal dan dengan batasan frekuensi yang sempit. Bentuk isyarat tegangan yang terdistorsi karena pengaruh harmonisa sulit dibaca oleh pengukur tegangan analog. Dengan alat ukur digital, penentuan nilai RMS dapat dilakukan untuk berbagai variasi bentuk gelombang dan dengan batasan frekuensi yang lebih luas.

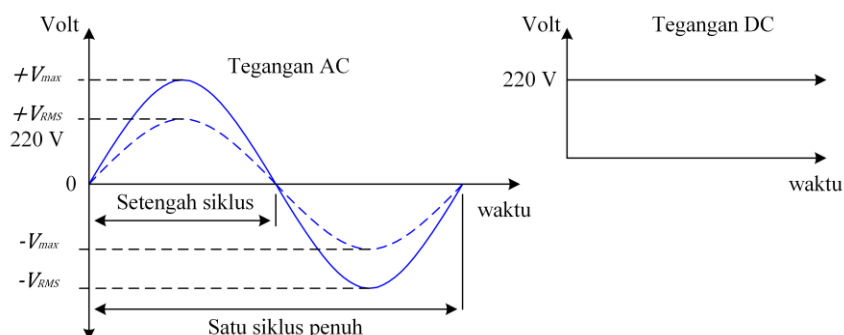
Pada penelitian sebelumnya, pengukur nilai tegangan RMS jala-jala listrik telah berhasil diimplementasikan. Mikrokontroler ATmega 8535 dapat dijadikan komponen utama pengukur nilai tegangan RMS jala-jala listrik dengan kisaran frekuensi dari 22 Hz hingga 80Hz. Galat hasil pengukuran akan bernilai nol untuk kisaran tegangan 170 V hingga 250 V dengan frekuensi 45 Hz hingga 62 Hz. Semakin rendah nilai tegangan dan frekuensi tegangan yang diukur, maka galat absolut akan semakin tinggi [1].

Penelitian ini adalah pengembangan dari penelitian sebelumnya yaitu "Implementasi Pengukur Nilai Tegangan RMS Jala-Jala Listrik Berbasis Mikrokontroler" [1], dengan menggunakan mikrokontroler ATmega 328P sebagai komponen utama. Alat pengukur tegangan berbasis mikrokontroler tersebut harus dapat mengukur tegangan RMS dengan jangkauan frekuensi yang lebih luas dan tingkat galat yang lebih kecil. Untuk mewujudkan alat tersebut, diperlukan sebuah analisis mendalam tentang pengolahan isyarat, pengolahan data, dan perancangan algoritma pemrograman pada mikrokontroler, untuk hasil yang lebih baik.

2. Tinjauan Pustaka

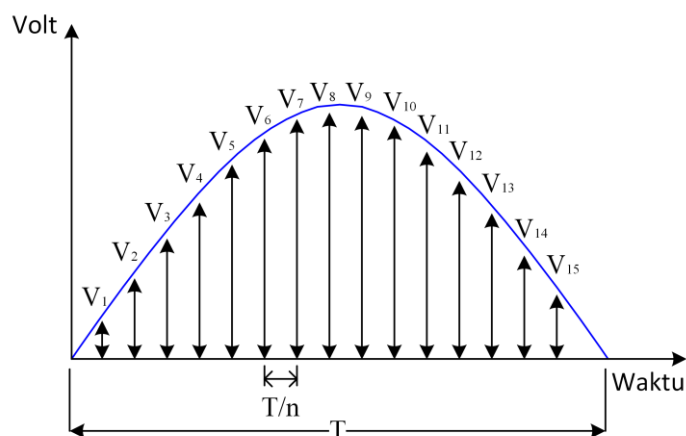
2.1 Tegangan RMS

RMS kepanjangan dari “*Root Mean Squared*”. Nilai RMS adalah akar kuadrat dari nilai rata-rata dari fungsi kuadrat. Notasi yang digunakan untuk nilai RMS adalah V_{RMS} atau I_{RMS} . Istilah RMS hanya mengacu pada tegangan bolak-balik yang berubah terhadap waktu, arus, atau bentuk gelombang yang kompleks. RMS tidak digunakan dalam analisis perhitungan sirkuit DC karena besarnya selalu konstan. Nilai RMS digunakan untuk membandingkan nilai tegangan ekuivalen dari gelombang sinusoidal bolak-balik yang memasok daya listrik yang sama ke beban yang diberikan sebagai rangkaian DC ekuivalen. Nilai RMS sering disebut “nilai efektif” dan umumnya disajikan sebagai V_{eff} atau I_{eff} . Ilustrasi tegangan RMS pada tegangan AC dan DC ditunjukkan pada gambar 1 [2].



Gambar 1. Nilai RMS pada Tegangan AC dan DC [2]

Nilai RMS dari suatu gelombang dapat ditentukan dengan cara melakukan pencuplikan atau pengambilan data dengan frekuensi yang sama di sepanjang gelombang. Setengah positif dari gelombang dibagi menjadi sejumlah “ n ” bagian yang sama atau “*mid-ordinate*” dan semakin banyak *mid-ordinate* yang ditarik sepanjang gelombang, maka hasil akhir penghitungan akan semakin akurat [3]. Ilustrasi pencuplikan pada setengah gelombang sinusoidal dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Pencuplikan Data pada Gelombang Sinus Setengah Positif [2]

Seperti yang terlihat pada Gambar 2, setiap *mid-ordinate* dari suatu bentuk gelombang (dalam hal ini bentuk gelombang tegangan) dikuadratkan dan ditambahkan dengan *mid-*

ordinate lainnya. Selanjutnya hasil penjumlahan tersebut dibagi dengan jumlah *mid-ordinate* yang digunakan, untuk mendapatkan nilai rerata (*mean*) dari gelombang tegangan. Sehingga dapat didefinisikanlah istilah yang digunakan untuk menggambarkan tegangan RMS (V_{RMS}) sebagai “akar kuadrat dari rerata dari *mid-ordinate* dari bentuk gelombang tegangan” atau dapat didefinisikan pada Persamaan (1).

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{n-1} (v_i)^2}{n}} \quad (1)$$

V_{RMS} merupakan nilai RMS yang sesungguhnya (*True RMS*), sedangkan v_i adalah nilai tegangan sesaat hasil pencuplikan.

2.2 Teori Pencuplikan

Isyarat secara umum berbentuk kontinu (analog). Untuk pengolahan isyarat pada mikrokontroler, bentuk isyarat harus diubah ke diskret. Untuk memperoleh sinyal diskret dari sinyal analog harus dilakukan suatu proses sampling atau pencuplikan [4]. Secara matematik, proses sampling dapat dinyatakan oleh Persamaan (2) [5].

$$x(n) = x_a(nt) = x(t)_{t=t_s}, \text{ untuk } -\infty < n < \infty \text{ (} n = \text{integer)} \quad (2)$$

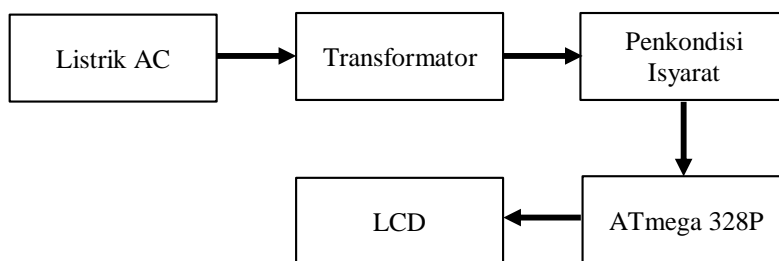
$x(n)$ merupakan sinyal waktu diskrit, $x_a(nt)$ merupakan sinyal analog yang dicuplik selama periode T_s dan $x(t)$ merupakan sinyal waktu analog.

Aliasing adalah fenomena bergesernya frekuensi tinggi gelombang seismetik menjadi lebih rendah yang diakibatkan pemilihan interval sampling yang terlalu besar. Aliasing dapat merusak kualitas bahkan dapat artifact yang menyesatkan, seperti pada kasus lapisan yang sangat miring, aliasing dapat menghasilkan efek *dipping* yang semu. Secara spasial, aliasing dapat menyisakan *artifact (noise)* setelah proses migrasi atau dikenal dengan *migration artifact*. [4]. Aliasing terjadi karena frekuensi masukan lebih besar dari $\frac{1}{2}$ frekuensi sampling (f_s). Apabila terjadi aliasing maka fungsi pembentuk suatu gelombang yang sebenarnya tidak dapat diamati secara jelas.

3. Metode Penelitian

3.1 Blok Diagram Sistem

Masukan dari sistem pengukur tegangan RMS ini adalah simulasi tegangan bolak-balik dari tegangan 5 hingga 300 volt dengan rentang frekuensi 35 Hz hingga 200 Hz yang dapat mewakili tegangan jala-jala. Tegangan masukan diumpankan ke *transformator step down* yang akan menurunkan nilai amplitudo tegangan masukan. Blok diagram sistem pengukur tegangan RMS ini dapat dilihat pada Gambar 3.



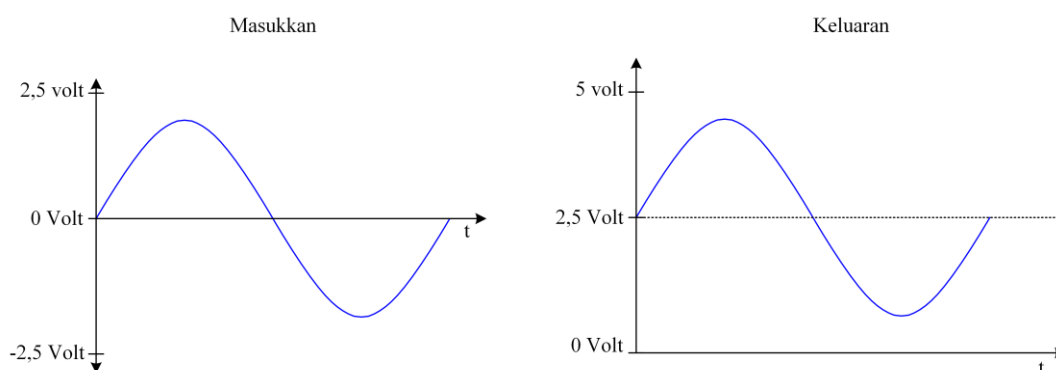
Gambar 3. Blok Diagram Sistem

Pendeteksian nilai tegangan tidak melalui sensor tegangan, karena ADC mikrokontroler ATmega328 dapat secara langsung menerima masukan berupa tegangan. Setelah tegangan diturunkan, isyarat masukan diumpungkan ke pengkondisi isyarat untuk mengubah isyarat tegangan bolak-balik menjadi isyarat yang sesuai dengan karakteristik masukan ADC mikrokontroler.

3.2 Pengkondisi Isyarat

Isyarat tegangan bolak balik adalah berbentuk sinus yang berayun dari nilai positif ke negatif. Nilai isyarat masukan yang bernilai negatif tidak terbaca oleh ADC mikrokontroler sehingga perlu penambahan offset sebesar 2.5 volt [6].

ADC hanya menerima isyarat tegangan dari 0 sampai 5 volt. Sementara keluaran dari *transformator* adalah 12 volt, maka rangkaian pengkondisi isyarat juga berfungsi sebagai rangkaian pembagi tegangan. Sehingga tegangan yang keluar dari pengkondisi isyarat akan mengalami penurunan nilai menjadi 1,7 volt dengan nilai offset 2.5 volt, atau nilai tegangan akan berayun dari 0,8 volt sampai 4,2 volt, untuk tegangan masukan 300 volt. Dengan menggunakan ADC 10 bit, tegangan masukan maksimal 1,7 volt dan tegangan referensi 5 volt, maka ketelitian pada sistem ini adalah 0,488% dan resolusi hingga 0,004888 volt. Masukan dan keluaran isyarat tegangan dari rangkaian pengkondisi isyarat dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Isyarat Masukan dan Keluaran Pengkondisi Isyarat

Berdasarkan Gambar 4 masukan pengkondisi isyarat mengalami kenaikan offset sebesar 2,5 Volt. Selanjutnya keluaran pengkondisi isyarat dimasukkan ke pin ADC.

3.3 Pencuplikan Isyarat Tegangan

Frekuensi cuplik isyarat minimal untuk pengambilan data adalah 2 kali frekuensi masukan, agar tidak terjadi *aliasing* [7]. Agar penghitungan tegangan menjadi presisi, maka

isyarat tegangan dicuplik dengan frekuensi cuplik 128 kali frekuensi masukannya. Apabila frekuensi isyarat tegangan jala-jala adalah $f_{PLN} = 50$ Hz, maka isyarat harus dicuplik dengan frekuensi 6400 Hz, atau 6400 kali cuplik untuk satu periode isyarat. Frekuensi pencuplikan untuk tegangan dengan frekuensi $f_{PLN} = 50$ Hz dihitung menggunakan Persamaan (3).

$$f_s = n \times f_{PLN} \quad (3)$$

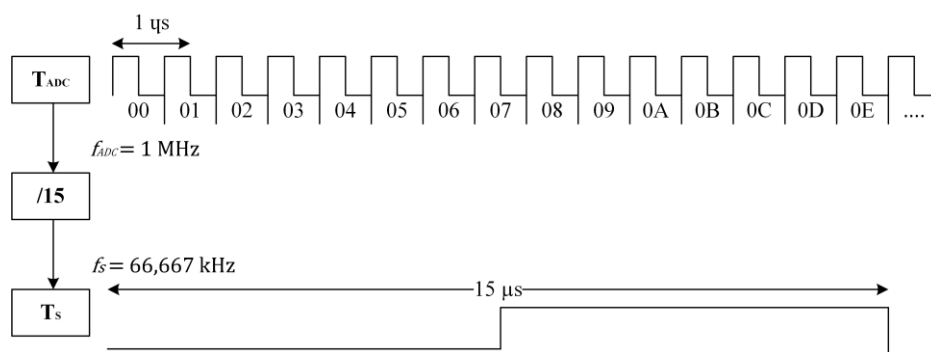
$$f_s = 128 \times 50 = 6400 \text{ Hz}$$

f_s merupakan frekuensi pencuplikan, n merupakan jumlah cuplikan, dan f_{PLN} merupakan frekuensi masukan. Periode antara dua cuplikan berurutan dihitung menggunakan Persamaan (4).

$$T_s = \frac{1}{f_s} \quad (4)$$

Sebagaimana Persamaan (4), T_s merupakan periode antar cuplikan dan f_s merupakan frekuensi cuplikan. Periode antar cuplikan bernilai konstan hingga cuplikan ke n . Program penjadwalan pencuplikan diatur menggunakan pewaktu 0 dan OCR0. Nilai OCR diatur agar variabel menyesuaikan periode isyarat masukan. Nilai keluaran ADC hasil cuplikan disimpan di memori dengan format *integer* tak bertanda 16 bit.

Untuk meningkatkan kecepatan cuplikan ADC maka frekuensi kerja ADC perlu ditingkatkan. Frekuensi ADC dapat ditingkatkan dengan mengubah nilai pembagi frekuensi atau *prescaler* [8]. ADC bekerja pada frekuensi 8 MHz dengan menggunakan *prescaler* 8 maka frekuensi kerja ADC adalah 1 MHz. Ilustrasi pembagian frekuensi ADC dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram Waktu Pencuplikan ADC

ADC membutuhkan waktu 13 siklus *clock* untuk mengonversi tegangan analog masukan ke data digital (mencuplik tegangan) dan 1,5 siklus untuk *sample and hold* [5]. Maka waktu yang dibutuhkan ADC untuk pencuplikan adalah 14,5 mikrodetik dibulatkan menjadi 15 mikrodetik. Diagram waktu pencuplikan ADC ditampilkan pada Gambar 5. Frekuensi maksimal *clock* yang digunakan oleh ATmega 328P adalah 16 MHz [5]. Pada pengujian sistem ini digunakan simulasi aplikasi Proteus yang menjalankan mikrokontroler ATmega 328P dengan frekuensi *clock* sebesar 8 MHz. Dengan *prescaler* ADC = 8, berdasarkan Gambar 5, jika f_{ADC} merupakan frekuensi ADC dan f_s merupakan frekuensi cuplik ADC, maka nilai f_s didapatkan dari f_{ADC} dibagi 15 siklus *clock* ADC. Nilai 15 siklus merupakan waktu yang

dibutuhkan ADC untuk konversi data. Sehingga kecepatan cuplik ADC mencapai 76,9 k Hz. Dengan konfigurasi ini, sistem ditargetkan dapat mengukur tegangan masukan secara akurat dengan frekuensi masukan 35 Hz hingga 300 Hz.

Penghitungan nilai tegangan RMS dikerjakan setelah proses pencuplikan. Berdasarkan Persamaan (1) maka proses penghitungan tegangan RMS dibagi menjadi 3 langkah :

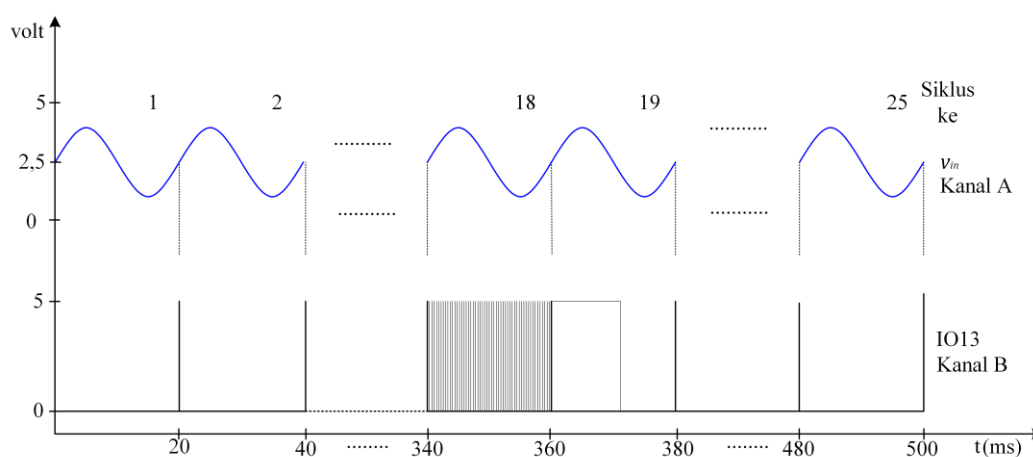
1. Pengkuadratan data hasil cuplikan v_n menjadi $[v_n]^2$, data hasil penghitungan disimpan pada memori dengan format data *long integer* tak bertanda (*unsigned long*) 32 bit.
2. Penjumlahan data hasil pengkuadratan ($[v_n]^2$) menjadi $\sum_{n=0}^{n-1}[v_n]^2$, data hasil penghitungan disimpan pada memori dengan format data *long integer* tak bertanda (*unsigned long*) 32 bit.
3. Pembagian dan pengakaran $\sum_{n=0}^{n-1}[v_n]^2$ menjadi $\sqrt{\frac{1}{128} \sum_{n=0}^{127}[v_n]^2}$, Data hasil penghitungan disimpan pada memori dengan format data *integer* 16 bit.

Ketiga proses di atas dijalankan setelah proses pencuplikan. Algoritma pencuplikan dan penghitungan RMS hanya dijalankan untuk satu periode gelombang.

3.4 Diagram Alir Sistem

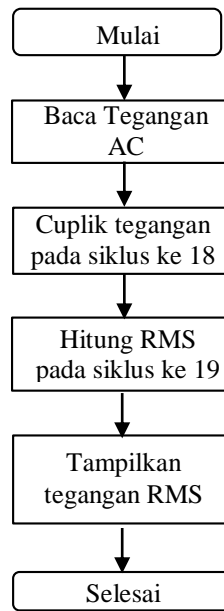
Masukan dari sistem ini adalah tegangan jala-jala listrik yang sudah dikondisikan oleh pengkonsisi isyarat. Penghitungan periode diperlukan untuk menentukan frekuensi masukan dan periode pencuplikan. Isyarat tegangan jala-jala diubah ke bentuk pulsa menggunakan *schmit trigger* dan diumpankan ke pin *External Interrupt* [9]. Periode isyarat masukan dapat dideteksi dengan menggunakan fungsi *micros*.

Selanjutnya periode pencuplikan ditentukan sesuai dengan frekuensi tegangan masukan. Penjadwalan pencuplikan diatur oleh pewaktu 0. Instruksi pencuplikan dan penghitungan RMS dijalankan setiap 25 siklus gelombang. Data hasil cuplikan disimpan di variabel v_n dalam format data *integer* 16 bit. Tampilan monitor sistem saat proses pencuplikan dapat dilihat pada Gambar 6. Kanal A adalah tegangan masukan ADC kanal B adalah waktu sibuk CPU.



Gambar 6. Siklus Pencuplikan dan Penghitungan RMS Isyarat Tegangan

Pencuplikan dan penghitungan nilai RMS tegangan dikerjakan pada siklus ke 18 dan 19 pada setiap 25 siklus secara rutin. Program penghitungan RMS berjalan setelah proses pencuplikan. Penghitungan RMS berjalan beriringan dengan pencuplikan tegangan. Diagram alir sistem di dapat dilihat pada Gambar 7.

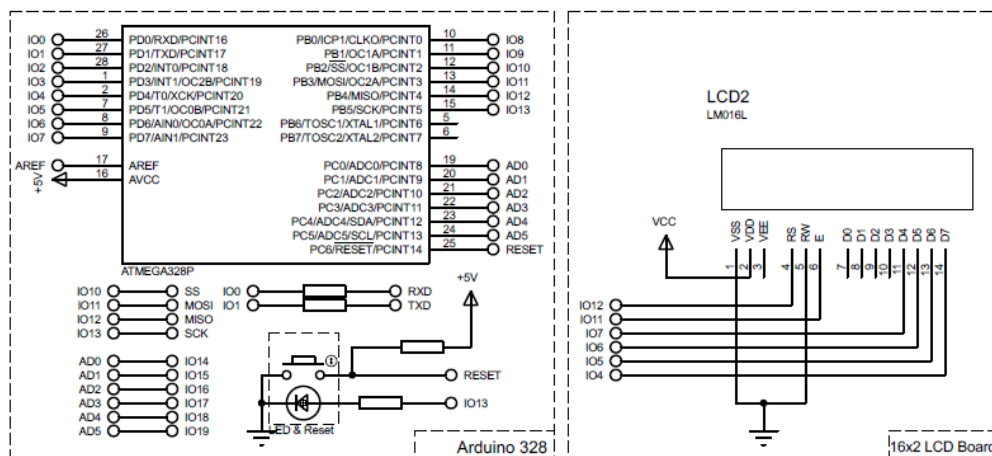


Gambar 7. Diagram Alir Sistem

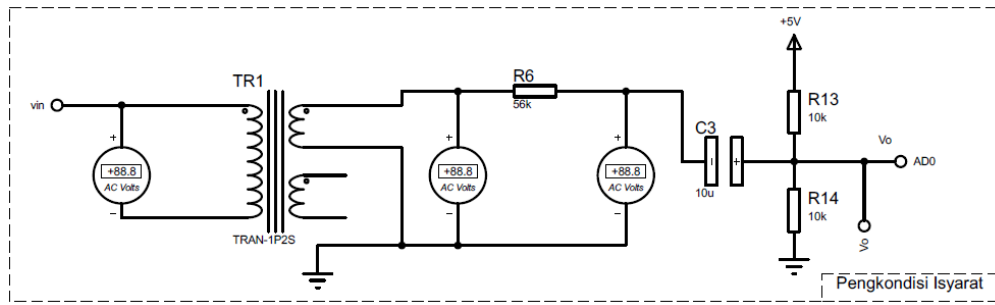
3.5 Skematis Sistem

IC 74HC14 merupakan *schmit trigger* dan digunakan untuk mengubah karakteristik isyarat tegangan AC menjadi bentuk pulsa. Keluaran 74HC14 diumpankan ke pin *external interrupt* mikrokontroler untuk pembacaan periode isyarat tegangan.

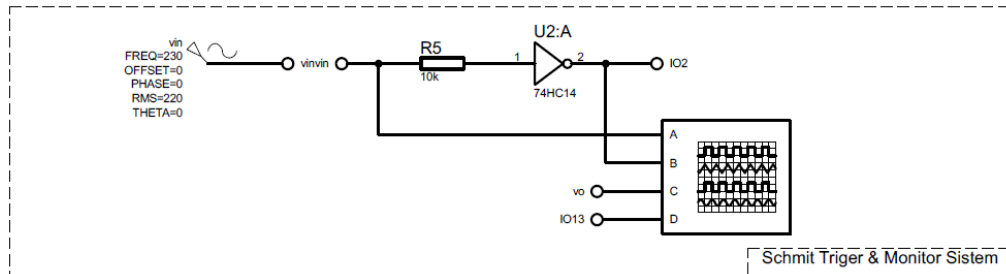
Tegangan sumber diumpankan ke *transformator step down* dengan *transform ratio* 20. Tegangan keluaran transformator diperkecil dengan hambatan sebesar 56 kilo ohm hingga V_{maks} bernilai 1,7 volt, untuk tegangan masukan 300 volt. Tegangan tersebut mengalami penambahan ofset 2,5 volt setelah masuk ke rangkaian pengkondisi isyarat. Tegangan keluaran pengkondisi isyarat diteruskan ke pin ADC 0. Setelah data tegangan diolah dalam mikrokontroler, hasil perhitungan tegangan RMS akan tampil di layar LCD. Skematis rangkaian sistem dapat dilihat pada Gambar 8, 9, dan 10.



Gambar 8. Rangkaian Mikrokontroler Atmega 328P dan Display LCD



Gambar 9. Rangkaian Pengkondisi Isyarat

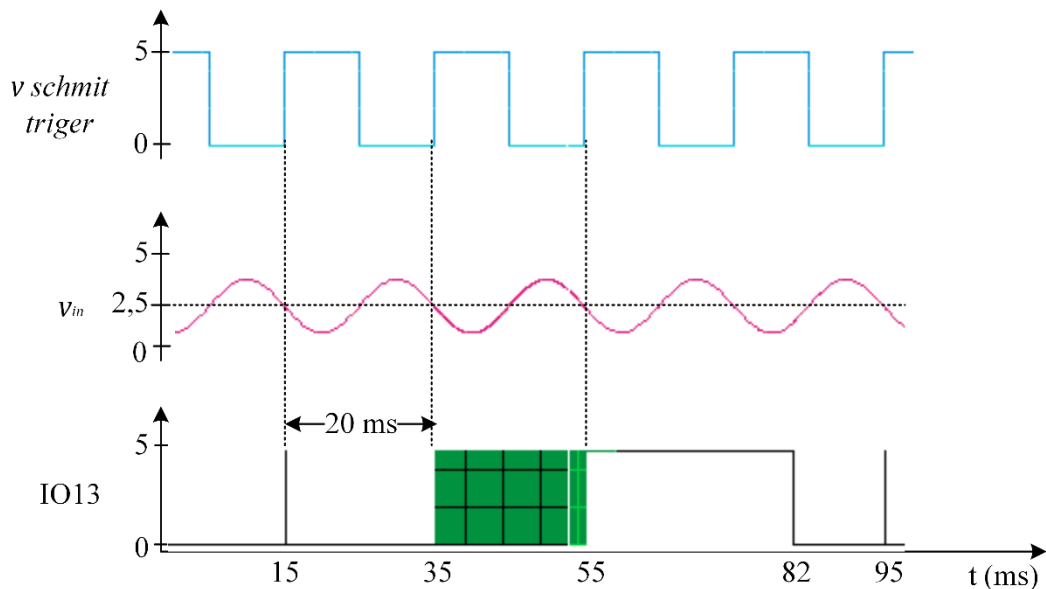


Gambar 10. Rangkaian Pembentuk Gelombang Kotak dan Pemonitor Sistem

Gambar 8 merupakan skematis rangkaian mikrokontroler ATmega 328P dan penampil LCD. Gambar 9 merupakan skematis rangkaian pengkondisi isyarat. Gambar 10 merupakan skematis rangkaian *schmit triger*.

3.6 Monitor Sistem

Monitor sistem diperlukan untuk memantau kinerja sistem dan tingkat kesibukan CPU. Aktivitas pencuplikan tegangan dan penghitungan RMS dapat dipantau secara *realtime* pada layar osiloskop. Mikrokontroler diprogram untuk mengeluarkan keluaran logika tinggi pada pin IO13 ketika melakukan proses, dan logika rendah ketika tidak ada proses. Layar monitor osiloskop dapat menampilkan isyarat tegangan masukan, tegangan keluaran pengkondisi isyarat, tegangan keluaran 74HC14. Layar monitor ditampilkan pada Gambar 11.



Gambar 11. IO13 sebagai Pemonitor Sistem Pengukur Tegangan *True RMS*

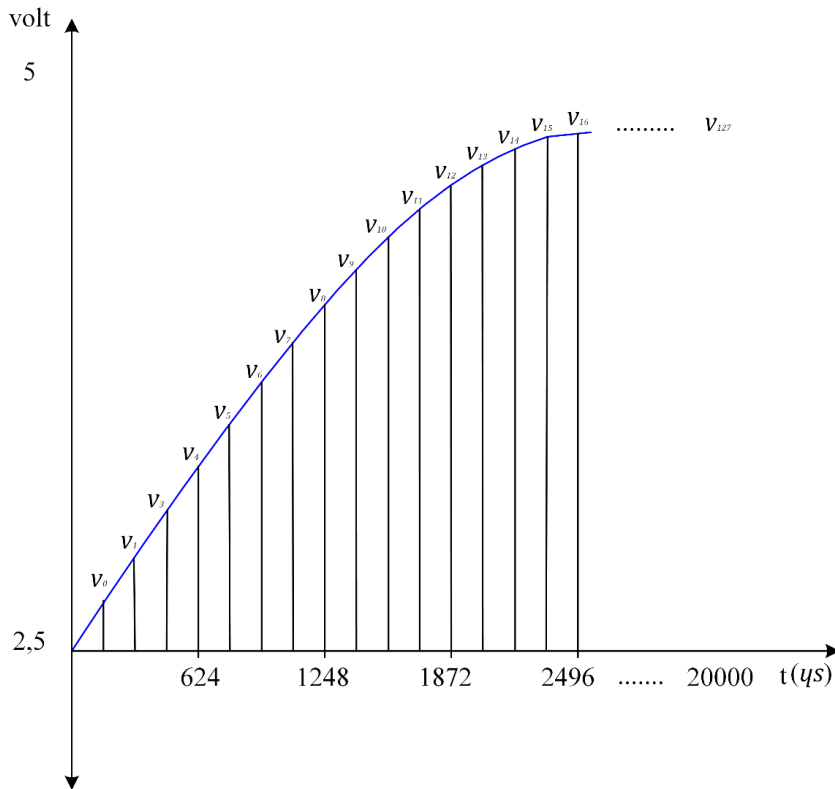
Pada Gambar 11 di atas, $v_{schmit\ trigger}$ merupakan isyarat keluaran 74HC14, v_{in} merupakan Isyarat Masukan ADC, IO13 merupakan waktu sibuk CPU. Grafik waktu sibuk CPU dapat dianalisis hingga skala waktu mikrodetik.

4. Hasis dan Analisis

4.1 Analisis Pencuplikan Isyarat Tegangan Oleh ADC

Mikrokontroler dijalankan dengan frekuensi 8 Mhz. Dengan menggunakan *prescaler* 8, ADC diatur untuk bekerja pada frekuensi *clock* 1 MHz. ADC membutuhkan waktu 15 siklus *clock* untuk mengonversi tegangan analog masukan ke data digital (mencuplik tegangan) [5]. Sehingga dengan satu periode *clock* ADC sebesar $1 / (1\text{ MHz}) = 1$ mikrodetik, satu kali pencuplikan membutuhkan waktu 15 mikrodetik.

Kecepatan cuplik bersifat konstan hingga periode pencuplikan berakhir. Sehingga pergeseran pencuplikan tidak berpengaruh terhadap hasil pencuplikan [10]. waktu yang dibutuhkan untuk satu kali proses pencuplikan (t) diatur menggunakan pewaktu 0, yaitu $T/128$. Artinya t bersifat dinamis mengikuti frekuensi masukan sistem. Ilustrasi pencuplikan isyarat tegangan oleh dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12. Pencupikan Isyarat Tegangan Frekuensi 50 Hz

Ilustrasi pada Gambar 12 adalah proses pencuplikan untuk satu periode cuplik pada tegangan masukan 300 volt dan frekuensi masukan 50 Hz. Proses pencuplikan dilakukan sekali setiap 25 periode gelombang, sehingga jika frekuensi masukan 50Hz, maka pencuplikan dilakukan 2 kali dalam satu detik.

ADC membutuhkan waktu $T_{ADC} = 15$ mikrodetik untuk mencuplik data analog. Untuk menyimpan data hasil cuplikan ke variabel v_i mikrokontroler membutuhkan waktu 5 mikrodetik [11]. Mikrokontroler membutuhkan waktu tambahan untuk eksekusi $IO13 = HIGH$, $IO13 = LOW$ untuk memonitor sistem, dan penambahan variabel i untuk pengulangan pencuplikan, sehingga total kebutuhan waktu lain-lain $T_{OTH} = 25$ mikrodetik. Sehingga waktu minimal yang harus tersedia untuk satu pencuplikan adalah 40 mikrodetik. Dengan durasi waktu minimal tersebut, maka frekuensi maksimal yang dapat diukur sistem dihitung menggunakan Persamaan (5).

$$f_{max} = \frac{1}{(T_{ADC} + T_{OTH}) \times n} \quad (5)$$

$$f_{max} = \frac{1}{(15 + 25) \times 128}$$

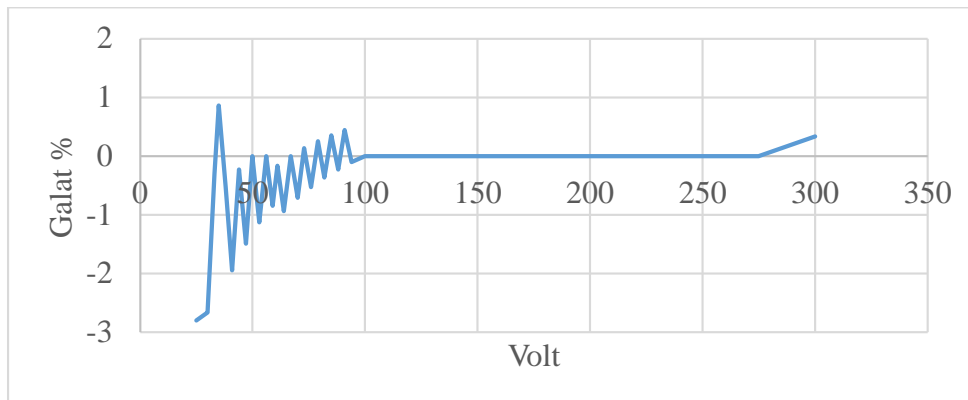
$$f_{max} = 195,3125 \text{ Hz}$$

Sebagaimana Persamaan (5), f_{max} merupakan frekuensi masukan maksimal yang dapat diukur sistem, T_{ADC} merupakan waktu cuplika ADC, T_{OTH} merupakan waktu lain-lain yang

dibutuhkan oleh mikrokontroler, n merupakan jumlah cuplikan.

4.2 Hasil Pengujian

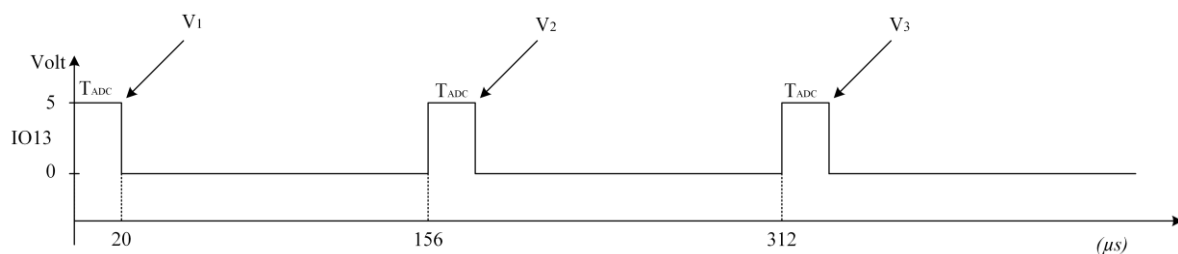
Sistem ini dirancang untuk dapat mengukur tegangan RMS jala-jala listrik dengan rentang tegangan 5 hingga 300 volt dengan variasi frekuensi 35 hingga 195 Hz. Galat hasil pengukuran tegangan listrik jala-jala 50 Hz dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13. Grafik Galat Pengukuran Tegangan *True* RMS Jala-Jala Listrik Tegangan 25 – 300 Volt Frekuensi 50 Hz.

Pengujian di bawah 100 volt dilakukan dengan melakukan pengukuran dengan kenaikan tegangan setiap 3 volt. Dengan kenaikan tegangan setiap 3 volt untuk pengujian tegangan 25 volt hingga 100 volt. Pengujian 100 volt hingga 300 volt dilakukan dengan melakukan pengukuran tegangan dengan kenaikan setiap 25 volt. Secara umum, sistem dapat mengukur tegangan dengan galat di bawah 4%.

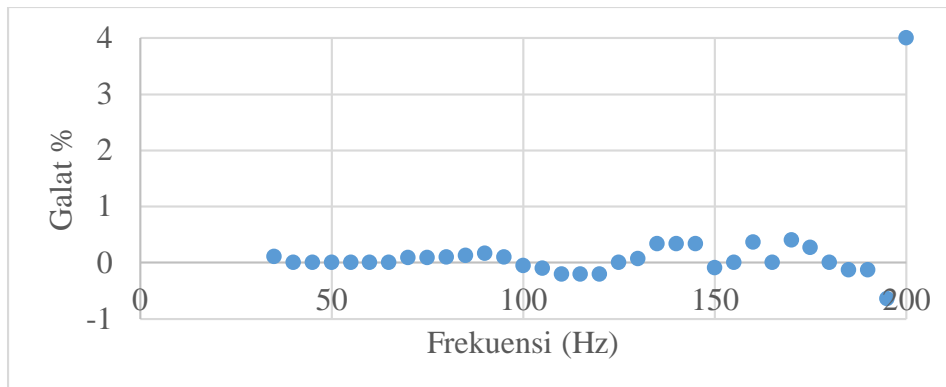
Nilai galat pengukuran dari tegangan rendah ke tegangan tinggi cenderung mengalami penurunan. Nilai galat pada pengukuran tegangan 100 volt hingga 275 volt nol persen. Ada galat kecil pengukuran untuk beberapa nilai tegangan. Tegangan 25 volt, terbaca 24 volt, tegangan 75 terbaca 74 volt, dan 300 volt terbaca 301 volt. Perbedaan nilai satu digit pada pengukuran juga mengakibatkan adanya galat pada pengukuran tegangan di bawah 25 volt. Secara umum nilai galat di bawah 0,5% untuk pengukuran 50 hingga 100 Volt. Sistem ini sudah bisa dikatakan layak sebagai pengukur tegangan RMS jala-jala listrik untuk rentang tegangan 50 hingga 300 volt, dengan nilai galat rata-rata pengukuran sebesar 0,21%. Tampilan monitor kerja CPU untuk pengukuran tegangan frekuensi 50 Hz ditampilkan pada Gambar 14.



Gambar 14. Tampilan Monitor Kerja CPU untuk Tegangan dengan Frekuensi 50 Hz.

Sebagaimana terlihat pada Gambar 14, bahwa nilai $T_{HIGH} = 20$ mikrodetik dan $t = 156$ mikrodetik. Perbedaan nilai T_{HIGH} dan t yang cukup jauh menjamin bahwa pada pengukuran tegangan dengan frekuensi 50 Hz sistem bekerja dengan baik dengan tingkat kesibukan yang rendah.

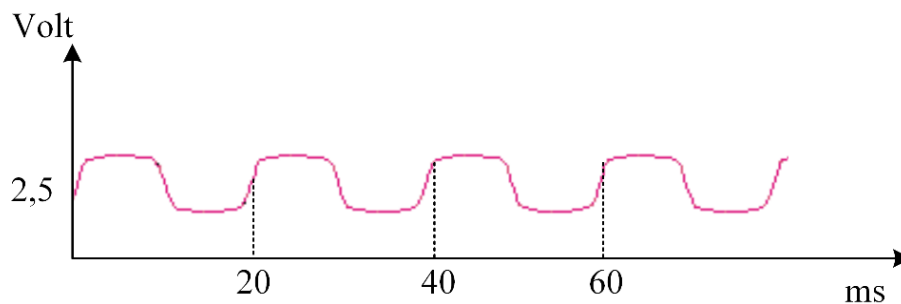
Pengujian selanjutnya adalah pengukuran tegangan dengan variasi frekuensi yang berbeda. Adapun frekuensi yang digunakan dalam pengujian ini adalah 35 Hz hingga 195 Hz. Grafik galat pengujian pengukuran tegangan RMS frekuensi 35 Hz sampai 195 Hz dilihat pada Gambar 15.



Gambar 15. Grafik Galat Pengukuran Tegangan RMS (25 Volt – 300 Volt) terhadap Perubahan Frekuensi (Frekuensi 35 Hz – 200 Hz).

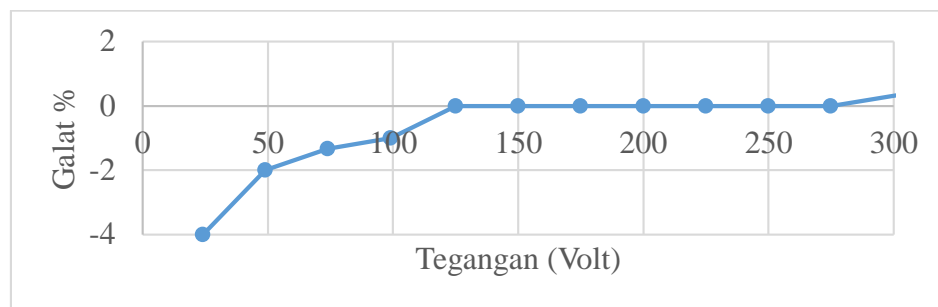
Berdasarkan hasil pengujian yang ditampilkan pada Gambar 15, pada frekuensi 40 Hz hingga 65 Hz sistem dapat mengukur tegangan RMS dengan galat nol. Ada kenaikan nilai galat pada pengujian pengukuran frekuensi di atas 195 Hz. Hal ini diakibatkan karena waktu yang digunakan ADC untuk mencuplik tegangan melebihi batas waktu yang tersedia. Adapun galat rata-rata pengujian adalah 0,15%.

Pengujian selanjutnya adalah pengujian tegangan dengan bentuk gelombang non sinus. Pengujian dilakukan dengan mengukur nilai tegangan RMS pada beban berupa *full bridge AC – DC converter*. Bentuk gelombang masukan dapat dilihat pada Gambar 16.



Gambar 16. Gelombang Masukan Pengujian Pengukuran Nilai RMS Gelombang Non Sinus

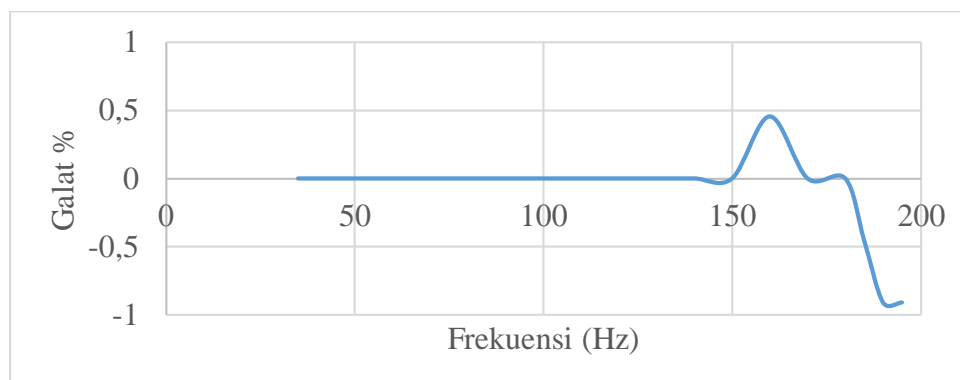
Hasil pengujian ditampilkan pada Gambar 17.



Gambar 17. Galat Pengujian Tegangan dengan Bentuk Non Sinus Frekuensi 50 Hz

Sebagaimana grafik pada Gambar 16 pengujian pengukuran nilai RMS pada gelombang non sinus mendapatkan nilai galat nol persen pada pengujian tegangan 100 volt hingga 275 volt. Nilai galat tertinggi pada pengujian ini adalah 4% pada pengujian tegangan 25 volt. Tegangan masukan 25 volt terbaca 24 volt pada sistem. Tren galat terus menurun seiring dengan kenaikan tegangan.

Pengujian selanjutnya adalah pengukuran tegangan 220 volt dengan variasi frekuensi yang berbeda. Pengujian dilakukan dengan memberikan masukan tegangan 220 volt berfrekuensi 35 hingga 195 Hz. Hasil pengujian ditampilkan pada Gambar 18.



Gambar 18. Grafik Galat Pengukuran Tegangan 220 Volt Frekuensi 35 Hz – 195 Hz

Secara umum galat pengukuran tegangan 220 untuk frekuensi 35 hingga 195 Hz adalah di bawah 1 % dengan nilai galat rata-rata 0,095%. Galat pengukuran untuk frekuensi 40 hingga 150 Hz bernilai nol. Ada galat kecil pada pengukuran tegangan frekuensi 157 hingga 164 Hz, tegangan, tegangan 220 volt terbaca 221 volt pada sistem. Selanjutnya nilai galat kembali mengecil hingga frekuensi 184 Hz. Pengukuran tegangan pada frekuensi 185 Hz, tegangan 220 volt terbaca 219 volt. Pengukuran tegangan pada frekuensi 190 Hz hingga 195 Hz tegangan 220 volt terbaca 218 volt.

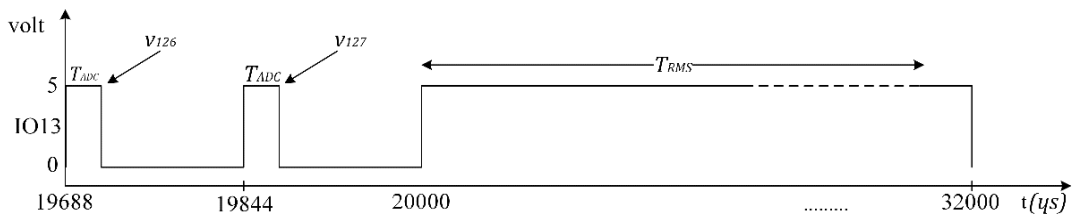
4.3 Analisis Waktu Sibuk CPU

Semakin tinggi frekuensi tegangan yang diukur, maka waktu sibuk CPU akan semakin meningkat, karena kecepatan cuplik yang dijalankan ADC semakin tinggi. Untuk frekuensi rendah di bawah 30 Hz, pengukuran tegangan RMS akan mendapatkan nilai galat yang agak tinggi karena pengukuran frekuensi kurang tepat. Pada frekuensi tinggi galat pengukuran disebabkan karena proses pencuplikan tidak tepat 128 kali, atau karena waktu yang dibutuhkan sistem untuk satu periode pencuplikan (t) lebih besar dari periode tegangan masukan (T). Atau

periode pencuplikan tegangan masukan (T_s) lebih kecil dari periode ADC melakukan pencuplikan dan konversi tegangan analog ke data digital [1]. Artinya sistem ini mempunyai batasan frekuensi tegangan yang dapat diukur, sesuai dengan kapasitas mikrokontroler.

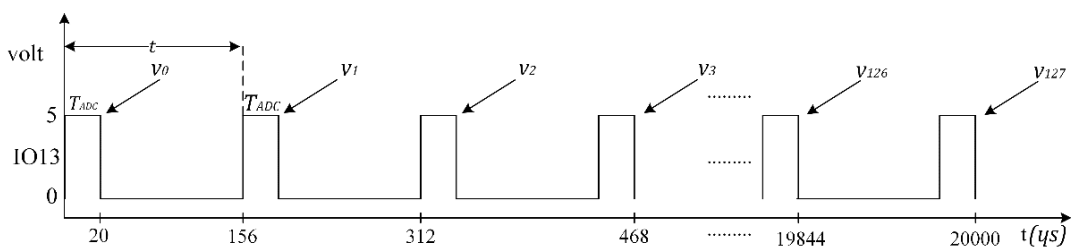
Sistem dirancang untuk dapat mengambil data tegangan setiap 25 gelombang masukan. Pencuplikan tegangan dilakukan pada siklus ke 18, penghitungan RMS dilakukan pada siklus ke 19. Apabila tegangan masukan 50 Hz, maka sistem mengambil data tegangan setiap 1/2 detik. Perubahan ini bersifat dinamis mengikuti perubahan frekuensi tegangan yang diukur.

Pada frekuensi 50 Hz, dalam 25 siklus gelombang tersebut, waktu sibuk CPU hanya berpusat pada dua siklus yaitu pada proses pencuplikan dan penghitungan RMS. Pada dua siklus sebelumnya, digunakan untuk menghitung periode isyarat masukan dan frekuensi masukan. Pada 23 siklus lainnya CPU dalam keadaan diam. Diagram waktu kesibukan CPU dapat dilihat pada Gambar 19.



Gambar 19. Waktu Sibuk CPU saat Pencuplikan Tegangan dan Penghitungan RMS

Grafik pada Gambar 19 merupakan waktu sibuk CPU pada dua siklus gelombang yang digunakan untuk pencuplikan dan penghitungan RMS. T_{ADC} merupakan waktu yang dibutuhkan ADC untuk mencuplik tegangan masukan, T_{RMS} merupakan waktu CPU menghitung nilai RMS. Grafik waktu sibuk pada Gambar 19 adalah untuk masukan 220 Volt frekuensi 50 Hz. Pada percobaan dengan frekuensi masukan yang berbeda, bentuk grafik akan berubah, pada bagian jeda antar pencuplikan. Periode pencuplikan tegangan RMS frekuensi 50 Hz dapat dilihat pada Gambar 20.



Gambar 20. Periode Pencuplikan (t) Isyarat Tegangan AC Frekuensi 50 Hz

Sebagaimana terlihat pada Gambar 20, T_{ADC} merupakan waktu sampling data oleh ADC yaitu $T_{ADC} = 20$ mikrodetik. Waktu yang tersedia untuk satu kali cuplik untuk frekuensi masukan 50 Hz dihitung menggunakan Persamaan (6).

$$t = \frac{T}{n} \tag{6}$$

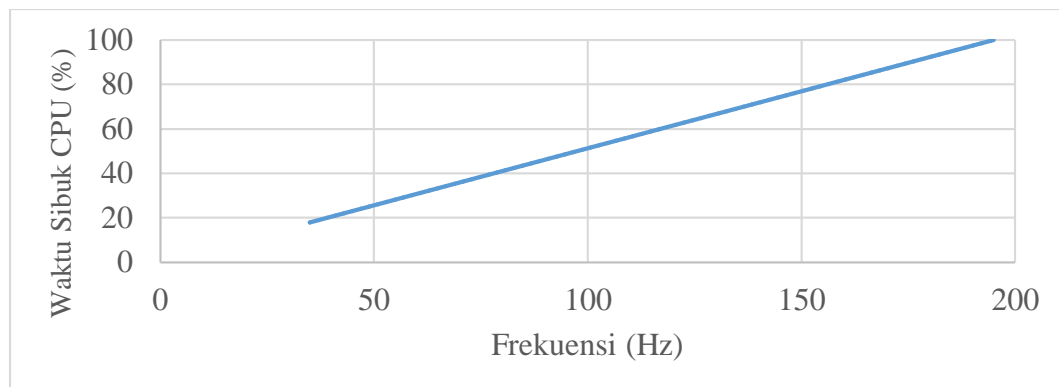
$$t = \frac{20 \mu s}{128} = 156 \mu s$$

Sebagaimana tertulis pada Persamaan (6), t merupakan waktu yang tersedia untuk satu kali pencuplikan, T merupakan periode isyarat masukan, dan n merupakan jumlah cuplikan. Mikrokontroler membutuhkan waktu tambahan untuk mengeksekusi instruksi $IO13 = HIGH$ dan $IO13 = LOW$ untuk memonitor sistem, dan penambahan variabel i untuk pengulangan pencuplikan sebanyak 20 mikrodetik. Maka waktu sibuk CPU untuk satu kali cuplikan adalah 40 mikrodetik. Ada jeda 116 mikrodetik antara satu cuplikan dan pencuplikan lainnya. Jeda waktu ini bisa dimanfaatkan untuk proses pencuplikan lain menggunakan *port* ADC lain. Maka waktu sibuk CPU pada saat proses pencuplikan pada frekuensi 50 Hz dihitung menggunakan Persamaan (7).

$$CPU_{usage} = \frac{T_{ADC} + T_{OTH}}{t} \times 100\% \quad (7)$$

$$CPU_{usage} = \frac{20 \mu s + 20 \mu s}{156 \mu s} \times 100\% = 25,64\%$$

CPU_{usage} merupakan waktu sibuk CPU, T_{ADC} merupakan waktu cuplik ADC, T_{OTH} merupakan waktu lain-lain yang dibutuhkan oleh mikrokontroler dan t merupakan waktu yang tersedia untuk satu kali pencuplikan. Grafik perubahan waktu sibuk CPU terhadap perubahan frekuensi ditampilkan pada Gambar 21.



Gambar 21. Grafik Perubahan Waktu Sibuk CPU saat Pencuplikan terhadap Perubahan Frekuensi (Frekuensi 35 Hz – 195 Hz).

Sebagaimana terlihat pada Gambar 21, waktu sibuk CPU mengalami kenaikan mengikuti kenaikan frekuensi masukan. Waktu sibuk tertinggi adalah 100% pada pengukuran tegangan dengan frekuensi 196 Hz.

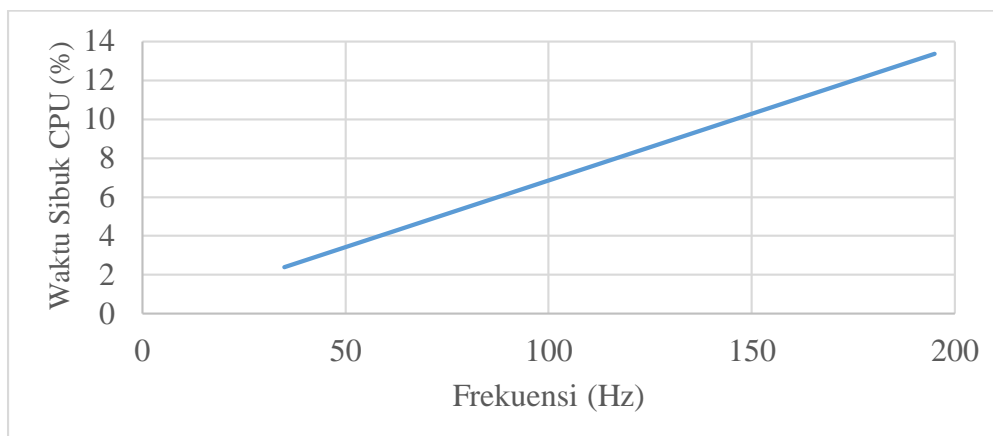
Dari 25 siklus gelombang, waktu sibuk CPU hanya berpusat pada 2 siklus gelombang saja, yaitu pencuplikan data isyarat pada siklus ke 18 dan penghitungan nilai RMS pada siklus ke 19. Waktu sibuk secara keseluruhan maka dapat dihitung menggunakan Persamaan (8).

$$CPU_{usage} = \frac{((T_{ADC} + T_{OTH}) \times 128) + T_{RMS}}{n_{siklus} \times T} \quad (8)$$

$$CPU_{usage} = \frac{(20 \mu s \times 128) + 12 ms}{25 \times 20 ms}$$

$$CPU_{usage} = 3,4 \%$$

Sebagaimana tertulis pada Persamaan (8), T_{RMS} merupakan waktu yang dibutuhkan mikrokontroler untuk menghitung nilai RMS dan n_{siklus} adalah jumlah siklus selama 1 *loop* program. Grafik waktu sibuk keseluruhan terhadap perubahan frekuensi ditampilkan pada Gambar 22.



Gambar 22. Waktu Sibuk CPU secara Keseluruhan terhadap Perubahan Frekuensi

Persentase waktu sibuk CPU yang kecil merupakan jaminan bahwa program dapat berjalan dengan baik dan dapat dikembangkan dengan tambahan algoritma lain yang dikerjakan di sela-sela waktu sibuk CPU.

5. Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Mikrokontroler ATmega 328P dapat digunakan untuk mengukur tegangan RMS dengan cara mencuplik tegangan dengan frekuensi 128 kali frekuensi tegangan. Proses pencuplikan dilakukan setiap 25 siklus gelombang dan dikendalikan oleh *timer 0*. Mikrokontroler ATmega 328P dapat digunakan sebagai basis pengukur tegangan RMS listrik dengan rentang tegangan 25 Volt hingga 300 Volt dan frekuensi 35 Hz hingga 195 Hz. Mikrokontroler ATmega 328P dapat mengukur tegangan RMS dengan galat nol persen pada tegangan 100 Volt sampai 275 Volt dengan frekuensi 50 Hz. Mikrokontroler Atmega 328P dapat mengukur tegangan RMS dengan galat nol persen pada tegangan 220 Volt dengan frekuensi 40 Hz sampai 150 Hz. Nilai galat untuk pengujian pengukuran tegangan RMS listrik jala-jala adalah 0,21 %. Dari hasil percobaan, didapat waktu sibuk CPU secara keseluruhan adalah 13,35%, sehingga sistem masih bisa dikembangkan lagi.

5.2 Saran

Rentang frekuensi sistem masih bisa dinaikkan dengan mengecilkan nilai *prescaler* ADC menjadi 4, atau 2. Sistem dapat ditingkatkan menjadi sistem pemonitor daya.

Daftar Pustaka

- [1] Kurniawan, F. (2011). Implementasi pengukur nilai tegangan RMS Jala-jala Listrik berbasis mikrokontroler. *Angkasa: Jurnal Ilmiah Bidang Teknologi*, 3(1), 188.
- [2] [Online]. Available: <https://www.electronics-tutorials.ws/wp-content/uploads/2018/05/articles-rms2.gif> [Accessed: 28-July-2020].

- [3] Hulak, A. M., Alves, M. F. (1999). On The Analysis Of (Un) True Root Mean Square Measurement. Université des Sciences et Technologies de Lille: Villeneuve D'Ascq Cedex, France.
- [4] Pelgrom, Marcel J.M. (2013). *Analogue To Digital Converter*. Springer Science & Business Media.
- [5] Atmel. [2014]. *ATmega 640/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V 8-bit Microcontroller with 16/32/64KB In-System Programmable Flash*, Atmel Corporation. California. U.S.A.
- [6] Kurniawan, I. H., Hayat, L. (2011). Perancangan dan Implementasi Alat Ukur Tegangan, Arus dan Frekuensi Listrik Arus Bolak-Balik Satu Fasa Berbasis Personal Komputer. *Techno*, 15(1), 24.
- [7] Auditiakusuma, B. (2011). Rancang Bangun Pembuatan Aplikasi Sampling Frekuensi File Audio Menggunakan Metode Filter FIR (Finite Impulse Response). *Skripsi*. Fakultas Sains dan Teknologi. Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah: Jakarta.
- [8] Akbar, R. (2018). Rancang Bangun Alat Monitoring Tegangan, Arus, Daya, kWh, Serta Estimasi Biaya Pemakaian Listrik Pada Rumah Tangga. *Skripsi*. Fakultas Teknologi Industri. Universitas Islam Indonesia: Yogyakarta.
- [9] Kurniawan, F. (2009). Implementasi Pengukur Frekuensi Dan Beda Fase Tegangan Dan Arus Jala-Jala Listrik Berbasis Mikrokontroler AVR, *Angkasa: Jurnal Ilmiah Bidang Teknologi*, 15(3), 115.
- [10] Kurniawan, F. (2011). Analisis Ketepatan Pengukur Nilai Tegangan Dan Arus RMS Jala-Jala Listrik Berbasis Mikrokontroler ATMEGA8535. *Angkasa: Jurnal Ilmiah Bidang Teknologi*, 3(2), 54.
- [11] Atmel. [2015]. *ATmega 328P 8-bit AVR Microcontroller with 32 K Bytes In-System Programmable Flash*, Atmel Corporation, California, U.S.A.