

Rancang Bangun Alat Sinkronisasi Tegangan, Frekuensi, dan Sudut Fasa Sistem Fotovoltaik dengan Grid/Jaringan PLN Menggunakan Arduino

M. Khairul Akbar¹, Syukriyadin², Ramdhan Halid Siregar³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Elektro dan Komputer, Universitas Syiah Kuala
Jl. Tgk. Syech Abdurrauf No.7, Darussalam, Banda Aceh, 23111, Aceh, Indonesia

¹khairul123@mhs.unsyiah.ac.id

³ramdhan@unsyiah.ac.id

²syukriyadi@unsyiah.ac.id

Abstrak— Pada penelitian ini dirancang dan dibuat prototipe alat untuk melakukan sinkronisasi antara PLTS dan grid dengan parameter sinkronisasi tegangan, frekuensi, dan beda sudut fasa. Sehingga dengan adanya sistem sinkronisasi, PLTS dan grid dapat diparalelkan dan mensuplai daya ke beban bersamaan. Sistem sinkronisasi terdiri dari komponen *voltage detector*, *frequency detector*, *phase angle detector*, dan *switch controller* yang semuanya dikontrol menggunakan *board arduino*. *Phase angle detector* menggunakan metode *zero crossing detection* sedangkan *switch controller* akan bekerja berdasarkan input dari *detector* untuk melakukan sinkronisasi atau memparalelkan PLTS dan grid. Uji coba dilakukan untuk mengamati bahwa sinkronisasi antara PLTS dan grid berhasil dilakukan dengan pengambilan data hasil pengukuran arus di sisi grid, inverter (yang mewakili sistem PLTS), dan di beban. Berdasarkan hasil pengujian, sistem berhasil melakukan sinkronisasi sehingga PLTS dan grid mensuplai arus ke beban bersamaan. Pengujian dilakukan pada tegangan nominal 12 V dan persentase arus yang disuplai dari inverter/PLTS ke beban besarnya tidak konstan atau berubah bergantung besarnya beban yang digunakan. Inverter mensuplai 50% dari besar total arus ke beban 8 Ω , 24,27% ketika beban 11,65 Ω , 14,28% ketika beban 13 Ω dan 15,90% ketika beban yang digunakan 13,63 Ω .

Kata Kunci— PLTS, grid, tegangan, frekuensi, sudut fasa, sistem sinkronisasi, *voltage detector*, *frequency detector*, *phase angle detector*

I. PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan pembangkit listrik energi terbarukan yang memanfaatkan energi cahaya matahari, biasa disebut juga dengan istilah sistem fotovoltaik (*PV system*). Suatu sistem PV terdiri dari modul surya untuk mengkonversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik yang kemudian disimpan ke baterai. Untuk dapat melayani beban AC, maka energi listrik yang tersimpan di baterai (*DC Supply*) diubah menjadi energi listrik bolak-balik menggunakan perangkat inverter. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) menghasilkan daya listrik yang bersifat fluktuatif dipengaruhi radiasi sinar matahari yang mengenai modul surya. Ketika intensitas

radiasi matahari tinggi maka PLTS akan menghasilkan energi listrik yang lebih maksimal, sedangkan pada saat intensitas radiasi rendah maka energi listrik yang dihasilkan kurang maksimal atau menurun, apalagi pada saat gelap maka PLTS tidak menghasilkan energi listrik sedikitpun [1].

Pemanfaatan sistem PLTS pastinya diharapkan agar beban seperti pencahayaan, pompa air dan peralatan elektronik lainnya tidak hanya dilayani oleh sumber energi listrik dari PLN melainkan juga dari sistem PLTS, agar setidaknya iuran biaya listrik yang dibayar lebih murah. Oleh karena itu dibutuhkan suatu sistem sinkronisasi agar PLTS dapat digunakan bersamaan dengan grid PLN (*hybrid*). Sistem pembangkit listrik hybrid terdiri dari dua atau lebih sumber energi listrik yang berbeda, baik terhubung ke grid maupun tidak, tetapi apabila terhubung ke grid akan lebih handal karena grid dapat mensuplai energi listrik ke beban pada saat sistem PLTS terputus dari sistem [2] [3]. Sehingga diperlukan sistem sinkronisasi agar energi listrik dari PLTS dan grid PLN dapat mensuplai dan melayani beban. Dengan demikian, maka pada penelitian ini dirancang dan dibuat prototipe alat sinkronisasi untuk PLTS dan grid PLN dengan parameter sinkronisasi tegangan, frekuensi, dan beda sudut fasa.

Banyak penelitian sebelumnya yang melakukan sinkronisasi antara PLTS dan grid PLN dengan metode sinkronisasi yang berbeda-beda. Pada penelitian ini, sinkronisasi yang akan dilakukan menggunakan kontroller arduino dan rangkaian *zero crossing detection* untuk mendeteksi beda sudut fasa antara PLTS dan grid PLN. Sistem yang digunakan pada penelitian ini adalah sistem hibrid antara PLTS dan jaringan listrik PLN, hal ini dikarenakan apabila sistem yang digunakan adalah sistem on grid maka sudah terdapat inverter on grid (*grid tie inverter*) yang bisa digunakan langsung untuk sinkronisasi secara otomatis. Sehingga pada penelitian ini, inverter yang digunakan adalah inverter biasa dengan tegangan input inverter 12VDC yang memiliki output gelombang sinusoidal murni (*pure sine wave*) agar dapat disinkronkan dengan jaringan PLN yang memiliki gelombang tegangan sinusoidal juga. Kelebihan sistem sinkronisasi pada penelitian ini

adalah sistem lebih sederhana karena inverter yang digunakan sudah *pure sine wave*, sehingga sistem sinkronisasi hanya mengendalikan *switch controller* ketika tegangan dan frekuensi PLTS dan grid sama, dan beda sudut fasa tegangan antara keduanya tidak melebihi batas maksimum yang dibolehkan.

Uji coba sistem yang telah dirancang dan dibuat untuk melihat kinerja prototipe apakah berhasil melakukan sinkronisasi antara PLTS dan grid PLN, dengan meninjau arus masing-masing dari grid, inverter, dan arus di beban. Pada pengujian sistem, inverter diasumsikan mewakili keseluruhan sistem PLTS pada penelitian ini.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Sinkronisasi

Sinkronisasi berarti meminimalisasi perbedaan tegangan, frekuensi dan sudut fase antara output generator dan grid [4] [5].

Perlunya sinkronisasi dan paralel pembangkit listrik sering didasarkan pada yang berikut:

1. Kapasitas pembangkit dimiliki sistem yang ada telah dilampaui oleh beban baru.
2. Peningkatan keandalan (beberapa pembangkit vs unit tunggal pembangkit) harus dipertimbangkan.
3. Efisiensi operasi generator [4] [5].

1) *Parameter Sinkronisasi*: Masalah pertama untuk proses sinkronisasi adalah menyamakan parameter sinkronisasi dimana besarnya besarnya tegangan, frekuensi, fase, dan sudut fase antara grid dan sistem PV harus dicocokkan. Tabel I menampilkan beberapa standarisasi untuk interkoneksi antara sistem PV dengan jaringan grid [6]. Adapun beberapa standar lain adalah IEEE Std. 1547, IEEE Std. 1588-2008, IEC Std. 1727, IEEE Std. 929-2000 [7].

TABLE I
STANDAR SISTEM PV-GRID INTERKONEKSI

Voltage parameter	Standar
Magnitude	ANSI C84.1
Frequency	IEEE 929
Phase Angle	IEEE 929
Synchronization	ANSI 25

2) *Peraturan Sinkronisasi PLN* : Dalam penyambungan sinkron dengan Sistem Distribusi PLN, perangkat paralel hanya berada dalam posisi tertutup jika semua tiga parameter sinkronisasi dalam rentang. Jika salah satu parameter berada diluar rentang, maka perangkat paralel tidak akan menutup [8].

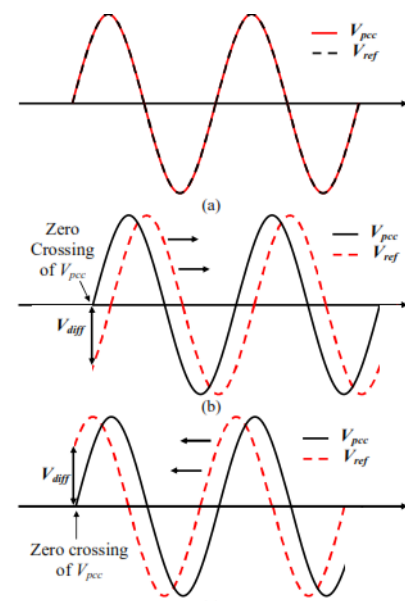
- *Pengaturan Tegangan* : PLT EBT harus beroperasi secara paralel dengan Sistem Distribusi PLN tanpa menyebabkan fluktuasi tegangan di titik sambung lebih besar $\pm 5\%$ dari tegangan Sistem Distribusi PLN [8].

- *Pengaturan Frekuensi*: PLT EBT harus mampu beroperasi dengan output maksimum dalam rentang frekuensi 47,5 hingga 51,0 Hz, khusus untuk PLTB dan PLTS rentang frekuensi 49,0 hingga 51,0 Hz mengacu pada SPLN No. D3.022-2:2012. Jika frekuensi Sistem Distribusi mencapai 50,5 Hz atau lebih tinggi, maka PLT EBT yang berada pada kondisi tidak tersambung/offline tidak dapat diparalelkan ke Sistem Distribusi PLN. Tetapi, jika PLT EBT telah mensuplai daya ke Sistem Distribusi PLN, kontrol daya aktif akan diterapkan oleh PLN [8].

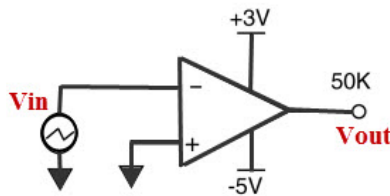
B. Metode Zero Crossing Detection

Metode *Zero Crossing Detection* pada dasarnya adalah pengukuran tegangan dan mendeteksi titik nol dari tegangan sesaat ketika tegangan berubah dari nilai negatif (-Ve) ke nilai positif (+Ve) seperti ditunjukkan pada gambar 1. Karena menggunakan komponen untuk *switching*, maka pasti terdapat yang namanya harmonisa atau *noise* [9].

Zero Crossing Detection juga disebut sebagai pembanding, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2, dimana *Zero Crossing Detection* menggunakan penguat operasional dasar (*Op-Amp*) untuk membandingkan dua tegangan secara bersamaan dan mengubah keluaran sesuai dengan hasil perbandingan. *Zero Crossing Detection* dapat diaplikasi untuk *phasemeter* dan *time marker generator* [10].



Gambar 1. Zero Crossing Detection pada gelombang sinusoidal [9]

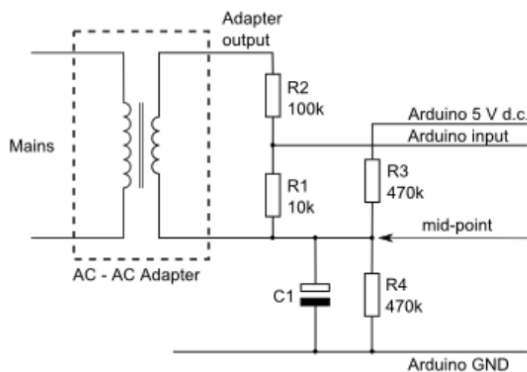


Gambar 2. Rangkaian dasar dari Zero Crossing Detection [10]

C. Komponen Sinkronisasi

Fase, frekuensi, dan tegangan adalah parameter dan input pada rangkaian sinkronisasi.

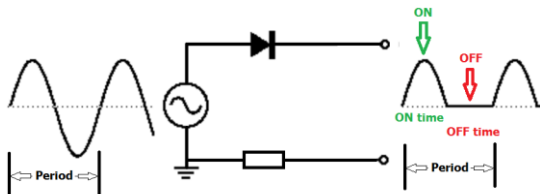
1) *Voltage Detector*: Pengukuran tegangan AC dilakukan dengan menurunkan tegangan karena arduino hanya mampu mengukur tegangan antara 0V – 5V dan tidak dapat membaca nilai tegangan negatif. Tegangan sumber dapat diturunkan dengan transformator dan rangkaian pembagi tegangan seperti pada gambar 3 [11].



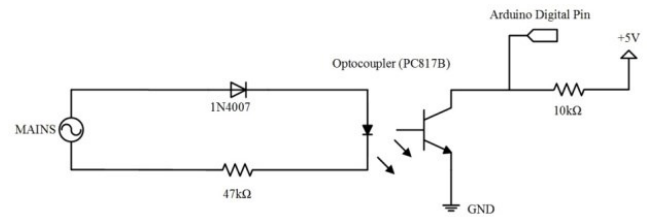
Gambar 3. Rangkain Sensor Tegangan Dengan Arduino [12]

$$\text{Peak voltage output} = \frac{R1}{(R1+R2)} \times \text{peak voltage input} (1)$$

2) *Frequency Detector*: Frekuensi pada tegangan AC dapat dihitung dengan mengukur periode waktu gelombang tegangan AC. Periode waktu adalah waktu satu gelombang penuh, berarti setengah gelombang positif dan setengah gelombang negatif. Untuk memudahkan dalam mendeteksi dan mengukur frekuensi, digunakan penyearah dioda seperti pada gambar 4. Rangkain untuk mengukur besaran frekuensi ac ditunjukkan pada gambar 5 [13].



Gambar 4. Periode gelombang tegangan AC [13]



Gambar 5. Rangkaian Sensor Frekuensi [13]

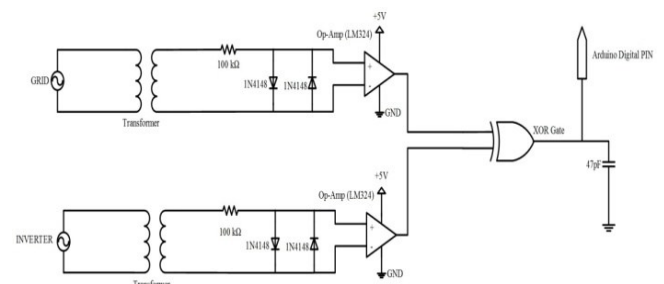
Perhitungan frekuensi digunakan persamaan :

$$f = \frac{1}{T} \quad (2)$$

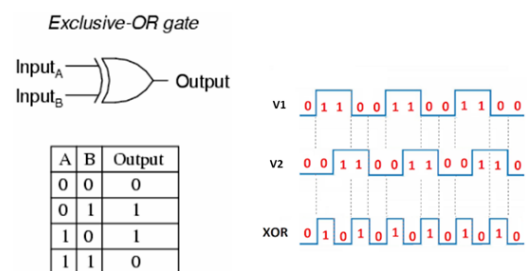
Ket : f = frekuensi (Hz)

T = periode (sekon)

3) *Phase Angle Detector*: Pengukuran beda sudut fasa antara grid dan inverter sama halnya dengan pengukuran faktor daya (*power factor*), hanya implementasinya saja yang berbeda. Untuk pengukuran sudut fasa, tegangan dari kedua sumber diturunkan terlebih dahulu dengan transformator kemudian digunakan Op-Amp untuk mendeteksi titik nol dari gelombang tegangan grid dan inverter. Op-Amp mengkonversi sinyal gelombang sinusoidal menjadi gelombang kotak dengan amplitudo 4V yang kemudian dihubungkan ke input gerbang XOR dan diproses oleh arduino, seperti ditunjukkan pada gambar 6. Adapun output dari gerbang XOR ditampilkan pada gambar 7 [13].



Gambar 6. Rangkaian Pengukuran Beda Sudut Fasa [13]



Gambar 7. Output Gerbang XOR [13]

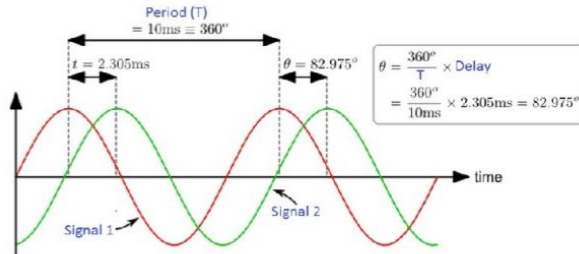
Untuk menghitung beda sudut fasa (θ) antara dua gelombang tegangan menggunakan rumus :

$$\theta = \frac{360^\circ}{T} \times \text{Delay} \quad (3)$$

Ket : T = periode (s)

Delay = selisih waktu antar dua gelombang tegangan (s)

Contoh dari perhitungan beda sudut fase seperti ditunjukkan pada gambar 8.



Gambar 8. Contoh perhitungan beda sudut fasa [14]

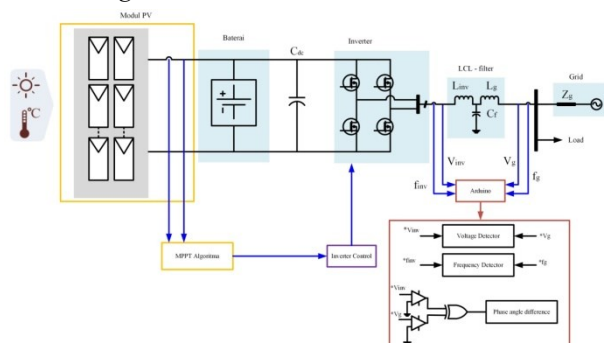
III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Tahapan Penelitian



Gambar 9. Diagram alir tahapan penelitian

B. Perancangan Sistem



Gambar 10. Konfigurasi Sistem

Seperti yang tampak pada gambar 10, bahwa sistem ini terdiri dari beberapa komponen, sehingga perancangan terdiri dari beberapa komponen, antara lain :

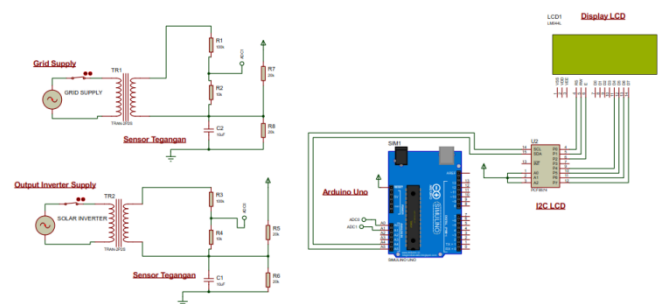
1) *Spesifikasi Modul Surya*: Modul surya yang digunakan pada penelitian ini yaitu modul surya jenis polycrystalline dengan spesifikasi yang ditunjukkan pada tabel II.

TABEL II SPESIFIKASI MODUL SURYA POLYCRYSTALLINE	
Model	BP350U
Serial	C1051213 4439776
Electrical Ratings	(At STC 1000 W/m ² , AM 1,5 spectrum, cell temperature 25°)
Peak Power (Pmax)	50 W
Warranted Minimum Pmax	45 W
Voltage (Vmp)	17,5 V
Current (Imp)	2,9 A
Open Circuit Voltage (Voc)	21,8 V
Short Circuit Current (Isc)	3,17 A
Minimum Bypass Diode	9 A
Maximum Series Fuse	20 A

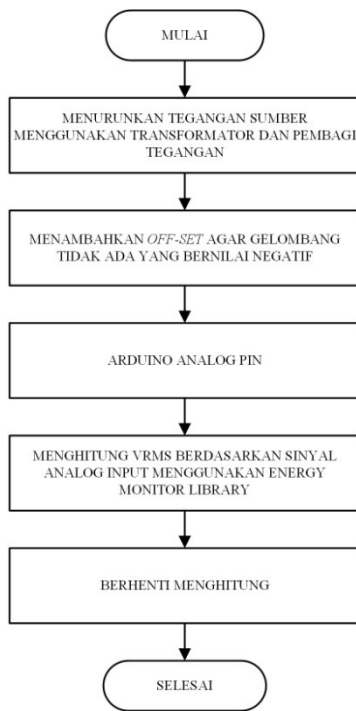
Pada penelitian ini, jumlah modul surya yang digunakan sebanyak 2 unit sehingga menghasilkan daya peak nya sebesar 100 Watt.

2) *Spesifikasi Inverter*: Inverter yang digunakan adalah inverter dengan input 12VDC dan memiliki gelombang output sinusoidal murni. Keluaran dari inverter memiliki tegangan 220 VAC, frekuensi 50 Hz, dan 500 W continous power. Efisiensi inverternya adalah 95%.

3) *Perancangan Voltage Detector*: Rangkaian resistor pada rangkaian voltage detector seperti ditunjukkan pada gambar 11 merupakan rangkaian pembagi tegangan, sedangkan kapasitor yang terdapat pada rangkaian tersebut berfungsi sebagai filter. *Flowchart* untuk pengukuran tegangan ditunjukkan pada gambar 12.

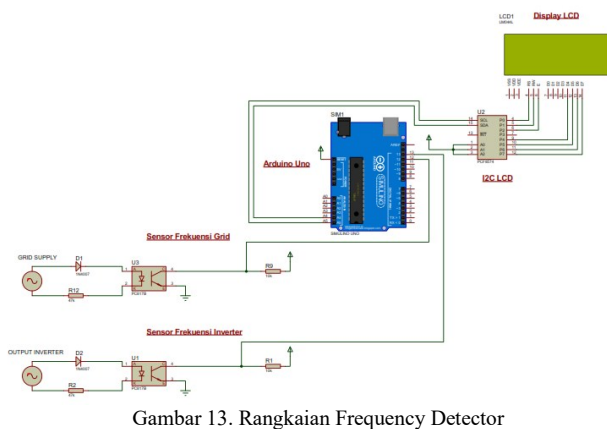


Gambar 11. Rangkaian Voltage Detector

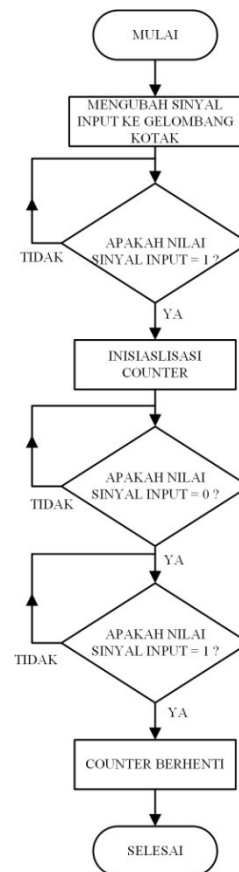


Gambar 12. Diagram Alir Pengukuran Tegangan

4) *Perancangan Frequency Detector*: Pada perancangan frequency detector atau sensor frekuensi seperti ditunjukkan pada gambar 13 bahwa tidak menggunakan modul sensor frekuensi apapun, tetapi hanya menggunakan optocoupler PC817B, dioda 1N4007, resistor 10 k Ω dan 47 k Ω pada tiap sensor frekuensi. Sedangkan *flowchart* untuk pengukuran frekuensi ditunjukkan pada gambar 14.

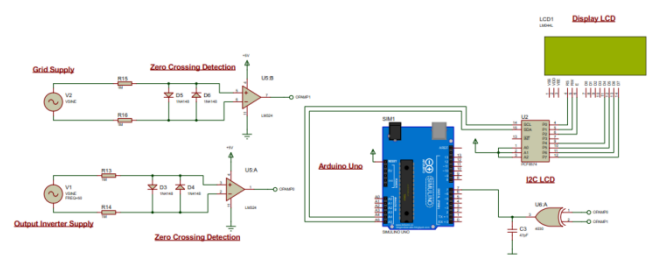


Gambar 13. Rangkaian Frequency Detector

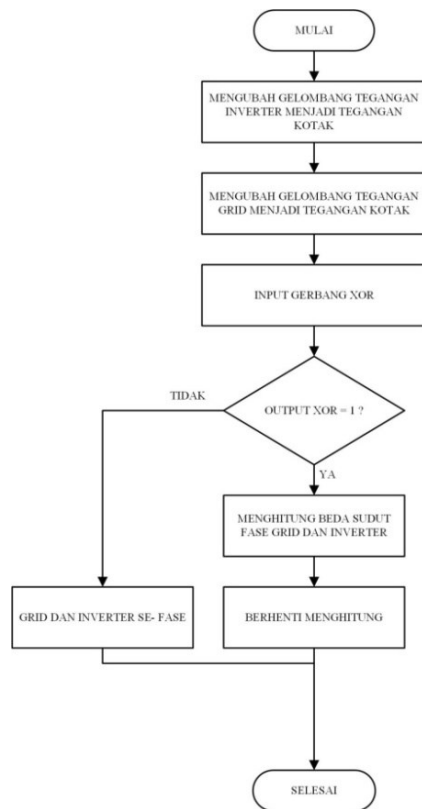


Gambar 14. Diagram Alir Pengukuran Frekuensi

5) *Perancangan Phase Angle Detector*: Phase angle detector adalah rangkaian untuk mengetahui perbedaan sudut fase rangkaian *zero crossing detection* untuk mendeteksi titik nol dari gelombang kemudian dilakukan perbandingan menggunakan pembanding/comparator yaitu gerbang exclusive OR (XOR). Arduino berfungsi untuk mengolah hasil dari pembanding XOR untuk mendeteksi beda fasa dan ditampilkan pada display LCD seperti ditunjukkan pada gambar 15. *Flowchart* untuk pengukuran beda sudut fasa ditunjukkan pada gambar 16.



Gambar 15. Rangkaian Phase Angle Detector



Gambar 16. Diagram Alir Pengukuran Beda Sudut Fasa

C. Pengujian Komponen

Pada tahapan ini, dilakukan pengujian terlebih dahulu untuk tiap komponen sebelum dilakukan uji coba sistem sinkronisasi secara keseluruhan.

1) *Pengujian Voltage Detector*: Pengujian sensor tegangan dilakukan untuk melihat apakah rangkaian sensor tegangan yang didesain telah benar dan sensor mampu membaca tegangan. Pengujian sensor tegangan yang dilakukan adalah mengukur beberapa nilai tegangan grid dan inverter untuk memastikan sensor dapat membaca nilai tegangan dengan tepat dan mendekati seperti pengukuran menggunakan voltmeter atau multimeter dan hasil pengujian yang telah dilakukan dimuat pada tabel III.

TABEL III
HASIL PENGUJIAN *VOLTAGE DETECTOR*

Tegangan Grid			Tegangan Inverter		
Sensor	Voltmeter	Galat	Sensor	Voltmeter	Galat
219,76 V	212,64 V	3,34 %	223,57 V	225,62 V	0,90 %
222,13 V	219,56 V	1,17 %	218,11 V	224,36 V	2,78 %

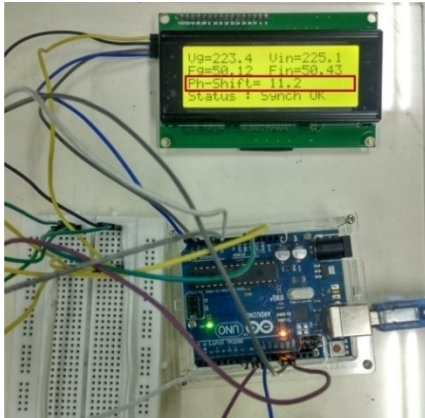
214,26 V	213,18 V	0,50 %	225,98 V	223,51 V	1,10 %
224,33 V	215,84 V	3,93 %	219,12 V	225,43 V	2,79 %
221,28 V	214,10 V	3,35 %	224,98 V	221,13 V	1,74 %

2) *Pengujian Frequency Detector*: Untuk mengetahui keberhasilan rangkaian sensor frekuensi, maka desain sensor yang telah dirancang dilakukan pengujian untuk membaca nilai frekuensi. Hasil pengujian sensor frekuensi dibandingkan dengan pembacaan nilai frekuensi menggunakan osiloskop digital. Hasil pengukuran sensor frekuensi ditunjukkan pada tabel IV di bawah ini.

TABEL IV
HASIL PENGUJIAN *FREQUENCY DETECTOR*

Frekuensi Grid			Frekuensi Inverter		
Sensor	Osiloskop Digital	Galat	Sensor	Osiloskop Digital	Galat
49,32 Hz	50,13 Hz	1,61 %	50,56 Hz	49,72 Hz	1,68 %
50,42 Hz	50,25 Hz	0,33 %	49,81 Hz	50,10 Hz	0,57 %
49,40 Hz	49,89 Hz	0,98 %	50,58 Hz	50,11 Hz	0,93 %
51,15 Hz	50,51 Hz	1,26 %	49,88 Hz	50,21 Hz	0,65 %
49,29 Hz	50,37 Hz	2,14 %	49,59 Hz	50,23 Hz	1,27 %

3) *Pengujian Phase Angle Detector*: Metode yang digunakan untuk mengetahui perbedaan sudut fasa yang terjadi adalah salah satunya menggunakan metode zero crossing detection. *Zero crossing detection* yang dirangkai pada penelitian ini digunakan untuk mendeteksi titik nol dari gelombang sinusoidal, kemudian dilakukan perbandingan antara gelombang sinusoidal dari inverter dengan grid. Apabila adanya perbedaan hasil deteksi titik nol gelombang sinusoidal antara kedua tersebut maka akan terukur berapakah perbedaan sudut yang terjadi. Hasil pengujian *zero crossing detection* ditunjukkan pada gambar 17.

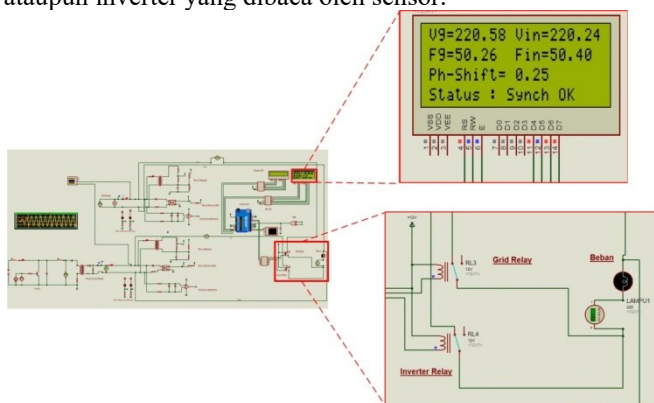


Gambar 17. Pengujian Phase Angle Detector

IV. HASIL SIMULASI DAN PEMBAHASAN

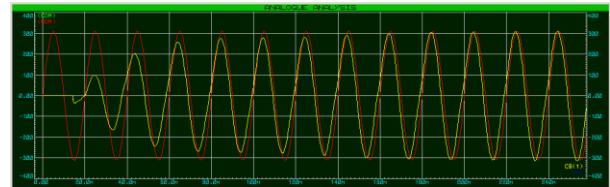
A. Hasil Simulasi Sistem

Desain sistem dibuat menggunakan Proteus agar dapat dilakukan simulasi sekaligus untuk mengetahui keberhasilan sistem yang telah dirancang. Ketika simulasi pengujian tiap komponen yaitu sensor tegangan, sensor frekuensi dan alat ukur beda sudut fasa telah berhasil, dan perancangan sistem keseluruhan telah berhasil dirancang. Hasil dari simulasi sistem yang dirancang adalah seperti tampak pada gambar 18. Display LCD akan menampilkan parameter dari sumber grid ataupun inverter yang dibaca oleh sensor.

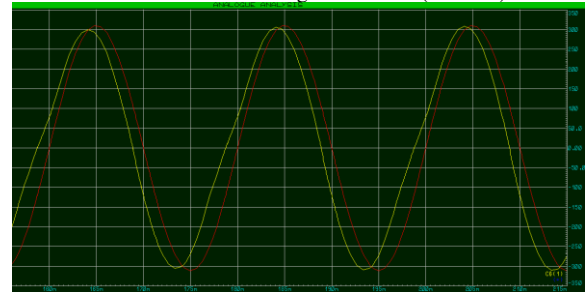


Gambar 18. Tampilan hasil simulasi sistem

Sebelum terjadinya proses switching, pada saat dilakukan simulasi terjadi *delay* beberapa detik sampai tegangan yang dihasilkan dari inverter telah stabil dan steady state sehingga bisa disinkronisasikan dengan grid, seperti yang ditunjukkan pada gambar 19. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa tegangan grid dan inverter baru sinkron ketika udah 160ms seperti pada gambar 20, dapat dilihat bahwa tegangannya sudah sinkron meskipun terdapat perbedaan sudut fasa sedikit. Grafik yang ditampilkan pada gambar 19 merupakan grafik tegangan inverter dan grid, dimana grafik berwarna merah merupakan grafik tegangan grid, sedangkan grafik berwarna kuning merupakan grafik tegangan inverter.

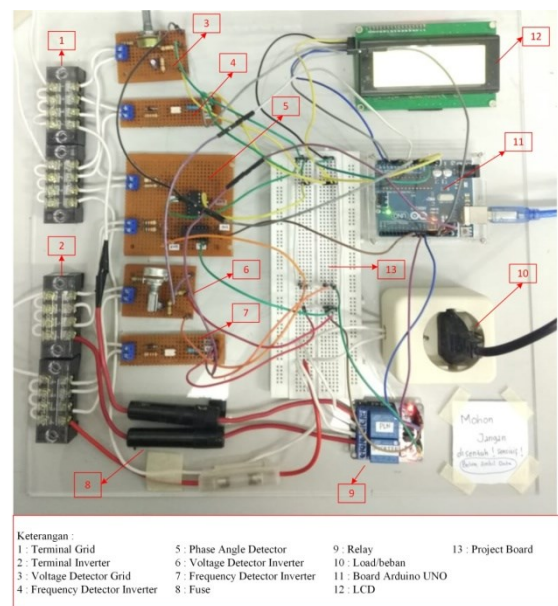


Gambar 19. Grafik Vgrid dan Vinv (simulasi)



Gambar 20. Grafik tegangan grid dan inverter pada saat 160ms s.d. 215ms

B. Implementasi Hardware: Semua komponen yang telah dirancang dan dilakukan pengujian akan diintegrasikan menjadi suatu sistem yang dapat melakukan sinkronisasi antara inverter dan grid. Prototipe alat yang dibuat seperti tampak pada gambar 21. Proses kendali sistem sinkronisasi dilakukan oleh unit kontroler. Sistem hybrid antara PLTS dan grid PLN dirancang untuk dapat melayani beban secara bersamaan ketika keduanya sinkron, atau hanya salah satu yang mensuplai beban ketika tidak sinkron. Unit kontroler yang digunakan adalah modul relay arduino yang akan bertindak sebagai *switch controller*.

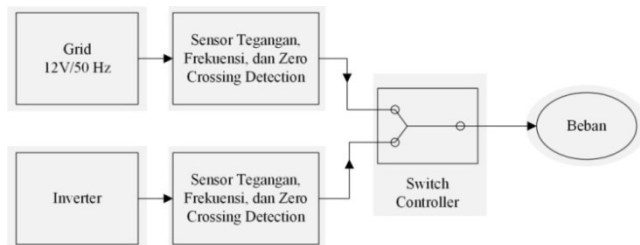


Gambar 21. Prototipe Sistem

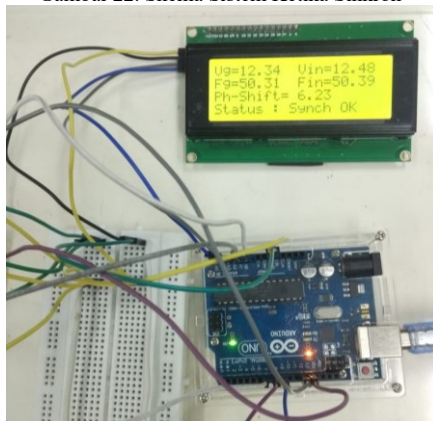
C. Pengujian Prototipe

Pengujian prototipe dilakukan pada tegangan nominal 12V dan frekuensi 50 Hz, hal ini dilakukan untuk menghindari kerusakan komponen apabila proses pengujian gagal.

1) *Grid dan Inverter Sinkron*: Unjuk kinerja alat pertama yang dilakukan adalah melihat proses sinkronisasi dapat dilakukan atau tidak ketika parameter dari inverter dan grid sama, dan ketika berhasil sinkron maka skema sistem seperti yang ditunjukkan pada gambar 22 dan tampilan LCD seperti gambar 23.

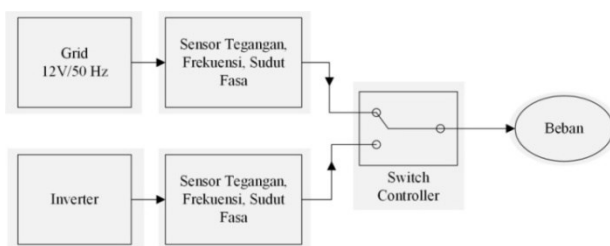


Gambar 22. Skema Sistem Ketika Sinkron

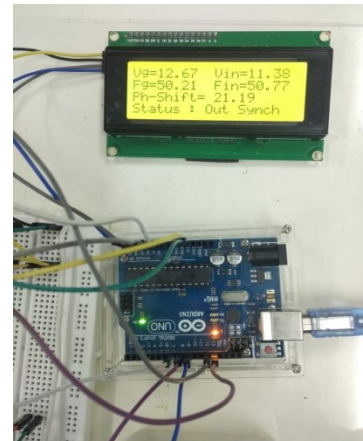


Gambar 23. Tampilan LCD saat sinkron

2) *Grid dan Inverter Tidak Sinkron*: Unjuk kerja alat yang dilakukan selanjutnya adalah melihat kinerja alat ketika parameter sinkronisasinya tidak sama, dan sistem berhasil memutuskan arus. Ketika parameter dari grid tidak sama dengan inverter, sistem akan memutuskan relay grid dan relay inverter secara otomatis dan beban tidak disuplai arus. Begitu juga ketika inverter tidak memenuhi nilai parameter sinkronisasi, maka hubungan dari inverter akan diputuskan oleh relay secara otomatis sehingga beban dilayani oleh grid seperti skema pada gambar 24. Beberapa kondisi tidak sinkron antara inverter dengan grid dapat dilihat pada gambar 25.



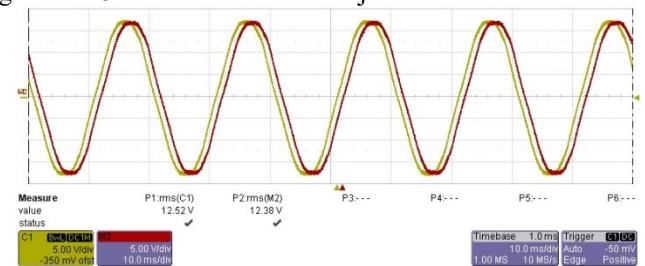
Gambar 24. Skema Sistem Ketika Tidak Sinkron



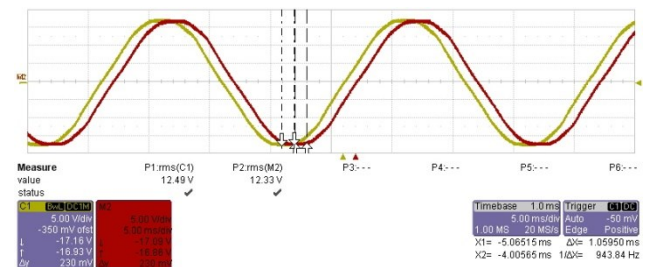
Gambar 25. Tampilan LCD saat tidak sinkron

D. Tegangan Inverter dan Grid

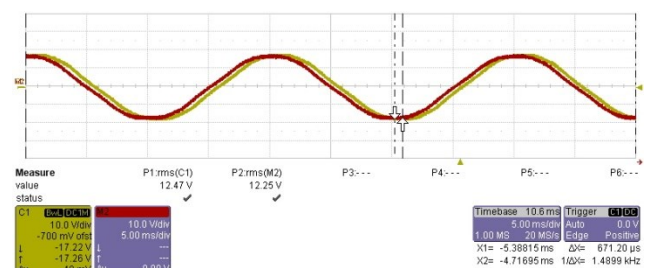
1) *Kondisi Sinkron*: Ketika inverter dan grid dalam kondisi sinkron, maka gelombang tegangan yang dihasilkan seperti ditunjukkan pada gambar 26. Dan pada gambar 27 menunjukkan bahwa time delay (Δx) antara kedua tegangan adalah sekitar 1 ms sehingga didapatkan beda sudut fasa antara tegangan grid dan inverter adalah sebesar 18 derajat. Beda sudut fasa antara tegangan grid dan inverter pada gambar 28 adalah sebesar 12 derajat.



Gambar 26. Vgrid dan Vinverter ketika sinkron

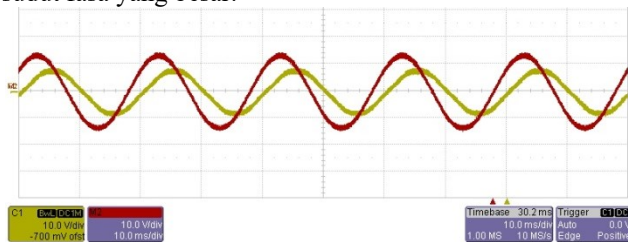


Gambar 27. Beda sudut fasa antara Vgrid dan Vinv ketika beda fasa 1 ms

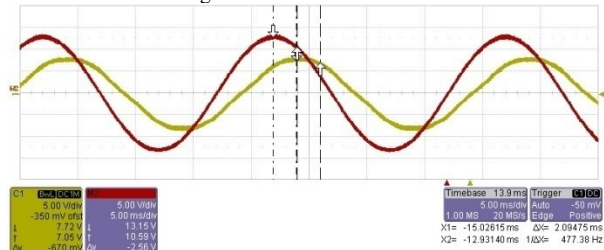


Gambar 28. Beda sudut fasa antara Vgrid dan Vinv ketika beda sudut 671 μs

2) *Kondisi tidak sinkron*: Adapun ketika kondisi tidak sinkron antara tegangan grid dan inverter ditunjukkan pada gambar 29, dengan selisih amplitudo tegangan dan beda sudut fasa yang besar.



Gambar 29. Vgrid dan Vinverter ketika tidak sinkron



Gambar 30. Beda sudut fasa Vgrid dan Vinv ketika tidak sinkron

Kondisi ketika amplitudo dan beda fasa tidak sinkron ditunjukkan pada gambar 30, dimana beda sudut fasa antara tegangan inverter dan grid sangat besar, yaitu sekitar 36 derajat, yang didapatkan berdasarkan waktu *delay* (Δx).

E. Analisis Arus Inverter dan Grid

Untuk dapat memastikan bahwa inverter membantu mensuplai energi listrik ke beban, maka seharusnya dilakukan pengukuran daya dari inverter, grid, dan beban. Berhubung pada pengujian dan proses pengambilan data tegangan dari masing-masing inverter dan grid diturunkan menjadi 12 V, maka wattmeter yang *operating voltage* nya 220/230 V tidak dapat menghitung daya pada 12 V, sehingga pengukuran yang dilakukan adalah arus dari inverter, grid, dan beban menggunakan multimeter. Hasil pengukuran arus ketika telah sinkron antara inverter dan grid disajikan pada tabel V.

TABLE V.

HASIL PENGUKURAN ARUS KETIKA SINKRON

No.	Beban Resistif	Arus Grid	Arus Inverter	Arus Beban
1	8 Ω	0,76 A	0,75 A	1,50 A
2	11,65 Ω	0,77 A	0,25 A	1,03 A
3	13 Ω	0,77 A	0,13 A	0,91 A
4	13,63 Ω	0,73 A	0,14 A	0,88 A

REFERENSI

- [1] DH Saputra and Jumail Soba, "Perancangan Hybrid dan Synchronizer Power Supply Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Surya dan Grid PLN," *Jurnal Teknologi Bahan dan Barang Teknik*, vol. 7, no. 2, pp. 57-62, Desember 2017.
- [2] Mansyur I.J., "Studi Komparatif 2 Model Pembangkit Listrik Sistem Hibrid PLTS dan PLN/Genset," *Prosiding Hasil Penelitian Fakultas Teknik UNHAS*, Juni 2012.
- [3] Sunil P, Prajapti N, and Patel T, "Grid Connected Solar and Wind Hybrid System," *International Journal for Innovative Research in*

Dari data hasil pengukuran arus di atas dapat diamati bahwa arus beban sebagian disuplai dari inverter. Jika dianalisis lebih lanjut untuk mengetahui berapa persentase penggunaan arus dari inverter, maka didapatkan hasil seperti pada tabel VI berikut.

Berdasarkan tabel VI, tampak bahwa persentase arus yang disuplai dari inverter tidak konstan, hal ini dikarenakan inverter hanya mensuplai arus untuk mendukung grid dalam melayani beban yang sama atau disebut dengan *load sharing*, yaitu keadaan dua generator atau lebih beroperasi secara paralel untuk menyuplai daya pada beban yang sama.

TABLE VI.
PERSENTASE ARUS DARI SISI GRID DAN INVERTER

No.	Beban Resistif	Arus Grid (%)	Arus Inverter (%)	Arus Beban (A)
1	8 Ω	50 %	50 %	1,50 A
2	11,65 Ω	75,72 %	24,27 %	1,03 A
3	13 Ω	85,71 %	14,28 %	0,91 A
4	13,63 Ω	84 %	15,90 %	0,88 A

V. KESIMPULAN

Kesimpulan yang didapatkan pada penelitian ini adalah *voltage detector*, *frequency detector* dan *phase angle detector* berhasil bekerja dengan baik. Pengukuran beda fase pada penelitian ini menggunakan metode *zero crossing detection* dan gerbang *exclusive or* (XOR). Pengujian prototipe dilakukan dengan menurunkan rating tegangan menjadi 12V, hal ini untuk mengurangi risiko kerusakan komponen ketika kegagalan pengujian. Berdasarkan hasil pengujian, sistem berhasil melakukan sinkronisasi antara PLTS dan grid. Keberhasilan sinkronisasi dapat diamati dengan PLTS dan grid dapat mensuplai arus ke beban secara bersamaan walaupun arus yang disuplai dari inverter/PLTS ke beban besarnya tidak konstan atau berubah bergantung besarnya beban yang digunakan.

Proses sinkronisasi dikontrol oleh mikrokontroler atau arduino uno, sehingga sinkronisasi yang dilakukan berdasarkan hasil pembacaan tegangan, frekuensi, dan beda sudut fasa yang diterima oleh arduino. Nilai tegangan, frekuensi, dan beda sudut fasa yang digunakan mengikuti standar dari PT. PLN (Persero).

Science & Technology, vol. II, no. 12, pp. 300-307, 2013.

- [4] B.Naga Sarvani, B.Vineela Thulasi, K.Rahul, K.Satish Kumar, and V.D.Sekhara Varma, "Detection Of Power Grid Synchronization Failure On Sensing," *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 04, no. 07, pp. 1995-1958, Juli 2017.
- [5] Neeraj Tiwari, Balveer Singh, Abhay Nath Dubey, and Tanveer Singh, "Detecting Power Grid Synchronization Failure by Sensing Voltage and," *International Journal on Future Revolution in Computer Science & Communication Engineering*, vol. III, no. 12, pp. 33-35, Desember 2017.
- [6] K. N. Dinesh Babu, R. Ramaprabha, V. Rajini, and Kamal Bansal,

- "Auto Synchronization Of Photovoltaic Fed Grid," *International Conference on Electrical Energy Systems*, pp. 207-214, 2016.
- [7] N. Jaalam, N.A. Rahim, A.H.A. Bakar, ChiaKwang Tan, and Ahmed M.A. Haidar, "A comprehensive review of synchronization methods," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 59 (2016), pp. 1471-1481, Februari 2016.
- [8] PT. PLN (Persero), "Pedoman Penyambungan Pembangkit Listrik Energi Terbarukan Ke Sistem Distribusi PLN," PT. PLN (Persero), Jakarta, Pedoman 2014.
- [9] Azrik M, Ahmed K.H, Finney S.J, and William B.W., "Voltage Synchronization Scheme Based on Zero Crossing Detection for Parallel Connected Inverter in AC Microgrids," *IEEE*, p. 590, 2012.
- [10] Tarun Agarwal. (2019, Juli) Elprocus. [Online].
<https://www.elprocus.com>
- [11] Salaideva Thirumani, "Measuring AC voltages through Arduino," Tenet Technetronics, Bangalore, Application Notes 2016.
- [12] SlyRemarks (github). (2013, April) Learn OpenEnergyMonitor. [Online]. <https://learn.openenergymonitor.org/>
- [13] Anonim. (2017, December) Simple Project. [Online]. <https://www.mousa-simple-projects.com>
- [14] Nabin1994. (2016, Mei) Forum Arduino. [Online]. <https://forum.arduino.cc>