

Otomatisasi Tracking Panel Surya Berbasis Arduino Uno dalam Penggunaan Energi Alternatif

Mohammad Fachrurrozy, Abdullah Nur Aziz*, dan Hartono

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jenderal Soedirman
Jalan Dr. Suparno No.61 Karangwangkal Purwokerto, 53123, Jawa Tengah Indonesia
e-mail : abd.nuraziz@gmail.com

Abstrak- Otomatisasi tracking panel surya telah dibuat dengan menggunakan sensor LDR, fotodiode dan fotodiode array. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui sistem dengan sensor mana yang akurat digunakan dalam sistem tracking panel surya. Sistem tracking terdiri dari empat buah sensor yang diletakkan sejajar dengan panel dan penggerak sistem menggunakan motor servo. Sistem pengendalian sensor dan motor servo dilakukan menggunakan mikrokontroler arduino. Berdasarkan hasil penelitian, sistem tracking menggunakan sensor LDR memiliki akurasi sebesar 95,18%, sistem tracking menggunakan sensor fotodiode memiliki akurasi sebesar 90,72%, dan sistem tracking menggunakan sensor fotodiode array memiliki akurasi sebesar 94,51%. Hasil tersebut menunjukkan sistem yang akurat adalah sistem dengan menggunakan sensor LDR. Akan tetapi konsumsi daya pemakaian sistem dengan LDR cukup besar yaitu sebesar 0,7 watt dibandingkan dengan konsumsi daya sistem dengan fotodiode sebesar 0,63 watt dan sistem dengan fotodiode array sebesar 0,59 watt. Sistem yang baik digunakan adalah sistem tracking menggunakan sensor fotodiode array karena memiliki akurasi sedikit lebih rendah dari LDR tetapi memiliki konsumsi daya yang lebih efisien. Penelitian ini juga membandingkan daya keluaran sistem tanpa tracking dan sistem tracking. Penggunaan sistem tracking membuat peningkatan daya keluaran panel sebesar 0,22 watt dibandingkan dengan sistem statis.

Kata Kunci: Sistem tracking, sistem tanpa tracking, akurasi, sensor LDR, sensor fotodiode, sensor fotodiode array

Abstract – Automation of tracking solar panels has been made using LDR sensors, photodiodes and photodiode arrays. This research was conducted to find out which system with sensors used in solar panel tracking systems. The tracking system consists of four sensors that are placed parallel to the panel and drive system using a servo motor. The sensor and servo motor control system is performed using an Arduino microcontroller. Based on the results of the study, tracking systems using LDR sensors have an accuracy of 95.18%, tracking systems using photodiode sensors have an accuracy of 90.72%, and tracking systems using photodiode array sensors have an accuracy of 94.51%. These results indicate an accurate system is a system using the LDR sensor. However, the power consumption of the system with a LDR is quite large, which is 0.7 watts compared to the system power consumption with a photodiode of 0.63 watts and a system with a photodiode array of 0.59 watts. A good system is a tracking system using a photodiode array sensor because it has a slightly lower accuracy than the LDR but has more efficient power consumption. This study also compares the system output power without tracking and tracking systems. The use of tracking systems makes the panel output power increase by 0.22 watts compared to static systems.

Key words: Tracking system, system without tracking, accuracy, LDR sensor, photodiode sensor, photodiode array sensor.

PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan komponen penting dalam menunjang produktivitas manusia. Berdasarkan data dari Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan Kementerian ESDM, konsumsi tenaga listrik dari tahun 2011-2015 terjadi kenaikan sebesar 13,17% dan konsumsi tenaga listrik per kapita terjadi kenaikan sebesar 0,17 [1]. Hal ini menunjukkan bahwa meningkatnya penduduk setiap tahunnya menyebabkan naiknya konsumsi energi listrik.

Kebutuhan akan energi untuk menopang pertumbuhan ekonomi membuat pasokan energi harus bertambah. Energi matahari adalah salah satu sumber energi alternatif yang bisa digunakan sebagai energi listrik [2]. Diperlukan alat untuk mengkonversi energi matahari menjadi energi listrik yaitu panel surya. Panel surya digunakan untuk membangkitkan energi listrik dari energi matahari. Panel surya yang biasa terpasang bersifat statis, berarah pada satu orientasi. Kondisi ini membuat panel surya tidak dapat menangkap pancaran sinar matahari

secara optimal [3]. Tracking panel surya merupakan solusi untuk mengikuti pergerakan matahari.

Tracking panel surya akan menempatkan posisi panel surya agar tegak lurus dengan matahari. Tracking panel surya menggunakan sistem sumbu putar yang mengontrol posisi pergerakan matahari dari timur ke barat. Umumnya penelitian yang sudah dilakukan adalah pengukuran efisiensi panel surya dalam keadaan statis dan dinamis. Pada penelitian [2] efisiensi dari penggunaan sistem tracking sebesar 36%, daya meningkat 0.67 watt dan error maks 9°. Adanya error yang besar dapat menyebabkan penyerapan energi matahari kurang maksimal, sehingga perlu dilakukan kajian lebih lanjut tentang penggunaan sensor yang tepat.

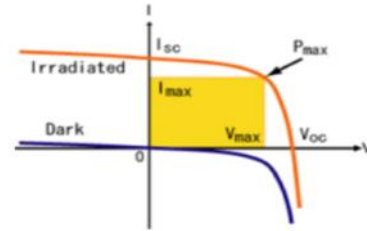
Pada penelitian ini, sistem tracking dibuat menggunakan sensor intensitas cahaya yaitu, LDR, fotodiode, dan fotodiode array. Variasi sensor ini dilakukan untuk mendapatkan sistem tracking yang akurat sehingga error yang dihasilkan kecil. Sistem yang memiliki akurasi paling baik dibandingkan dengan sistem tanpa tracking. Hasil yang didapatkan sistem tracking mampu meningkatkan daya keluaran panel secara maksimal.

TINJAUAN PUSTAKA

A. Pengaruh Iradiasi Matahari terhadap Sel Surya

Istilah iradiasi didefinisikan sebagai ukuran kerapatan energi sinar matahari yang diterima di bumi dan diukur dalam watt per meter persegi. Iradiasi berhubungan dengan komponen sel surya. Karakteristik *I-V* dan *P-V* akan berubah diikuti dengan perubahan iradiasi matahari. Meningkatnya radiasi matahari akan meningkatkan tegangan rangkaian terbuka dan arus hubung singkat, maka daya maksimumnya akan bervariasi [4].

Karakteristik *I-V* adalah kurva antara arus dan tegangan. Kurva menunjukkan hubungan terbalik. Daerah di dalam kurva *I-V* adalah daya maksimum yang akan diproduksi panel pada arus maksimum dan tegangan maksimum. Daerah ini memiliki nilai I_{sc} rendah pada saat V_{oc} maksimum dan memiliki V_{oc} rendah pada saat I_{sc} maksimum. Karena fluktuasi kondisi lingkungan, perubahan suhu dan tingkat iradiasi kurva *I-V* akan berubah sehingga daya maksimum juga akan berubah.

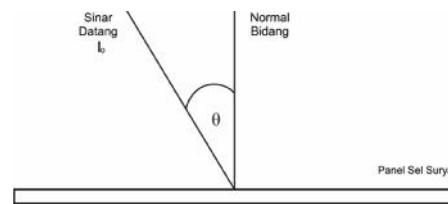


Gambar 1. Kurva I-V pada kondisi teriradiasi dan gelap serta operasi daya maksimum

Gambar 2. 1 menunjukkan dua karakteristik yaitu karakteristik gelap dan teriradiasi. Ketika sel surya diberi cahaya, karakteristik berubah bentuk karena terjadi short circuit current (I_{sc}) dan open circuit voltage (V_{oc}). Daya maksimum didapatkan dengan mendefinisikan tegangan dikalikan dengan arus. Tegangan dan arus yang sesuai adalah tegangan puncak dan arus puncak. Terdapat satu titik kurva yang menghasilkan daya maksimum setiap tingkat iradiasi [4].

B. Pengaruh Sudut Datang Terhadap Radiasi yang Diterima Panel Surya

Besarnya radiasi yang diterima panel sel surya dipengaruhi oleh sudut datang yaitu sudut antara arah sinar datang dengan komponen tegak lurus bidang panel [5]. Panel surya dapat optimal ketika berhadapan langsung dengan pancaran sinar matahari, dalam artian posisi panel surya harus tegak lurus dengan cahaya yang datang. Posisi panel dalam keadaan optimal dapat dilihat pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Posisi Panel Dalam Menerima Arah Sinar Datang

Panel mendapat radiasi matahari maksimum pada saat matahari tegak lurus pada bidang panel. Pada saat arah sinar matahari tidak tegak lurus dengan bidang panel atau membentuk sudut seperti Gambar 2, maka panel akan menerima radiasi lebih kecil dengan faktor \cos . Dari Gambar 2, dapat dirumuskan

$$I = I_0 \cos \theta \tag{1}$$

dimana I adalah radiasi yang diserap panel, I_0 adalah radiasi yang mengenai panel dan

adalah sudut antara sinar datang dengan normal bidang panel.

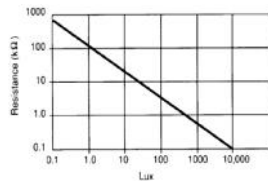
C. Sensor LDR (Light Dependent Resistor)

LDR atau Light Dependent Resistor adalah salah satu jenis resistor yang nilai hambatannya dipengaruhi oleh cahaya yang diterima olehnya. LDR memanfaatkan bahan semikonduktor yang karakteristik listriknya berubah-ubah sesuai dengan cahaya yang diterima.



Gambar 3. Light Dependent Resistor

Besarnya nilai hambatan pada LDR tergantung pada besar kecilnya cahaya yang diterima oleh LDR itu sendiri. Ketika LDR menerima intensitas cahaya yang tinggi, maka elektron dalam bahan semakin banyak dan resistansi bahan menjadi rendah. Sebaliknya, ketika LDR menerima intensitas yang rendah, maka elektron dalam bahan sedikit dan resistansi bahan menjadi besar. Hal tersebut ditunjukkan dalam **Gambar 4**.



Gambar 4. Iluminasi cahaya terhadap resistansi sensor LDR

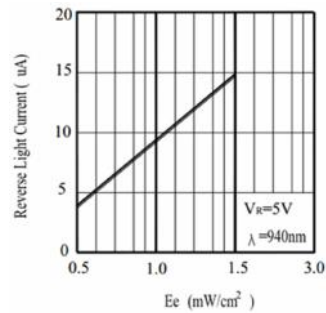
D. Sensor Fotodioda

Sensor fotodioda adalah dioda yang sensitif terhadap cahaya. Fotodioda akan mengubah cahaya menjadi arus listrik [6]. Komponen elektronika ini mampu mendeteksi bermacam-macam jenis cahaya yaitu mulai dari cahaya infra merah, cahaya tampak, ultra violet sampai dengan Sinar- X.



Gambar 5. Sensor fotodioda

Ketika energi cahaya yg memiliki panjang gelombang jatuh pada sambungan fotodioda, arus mengalir dalam sirkuit eksternal. Lalu komponen ini akan bekerja sebagai generator arus, arusnya sebanding dengan intensitas cahaya [7] Cahaya diserap di daerah penyambungan atau daerah intrinsik menimbulkan pasangan elektron-lubang yang mengalami perubahan karakteristik elektris ketika energi cahaya melepaskan pembawa muatan dalam bahan itu, sehingga menyebabkan berubahnya konduktivitas. Hal ini menyebabkan fotodioda dapat menghasilkan tegangan/ arus listrik jika terkena cahaya.



Gambar 6. Iluminasi cahaya terhadap arus balik cahaya sensor fotodioda

Terjadi perbedaan nilai hambatan dan arus pada sensor fotodioda. Menurut hukum ohm beda potensial V sebanding dengan arus dan hambatan. Semakin tinggi hambatan, semakin kecil arus yang mengalir untuk suatu beda potensial V , sehingga dapat didefinisikan hambatan berbanding terbalik dengan arus [8].

E. Sensor Fotodioda Array

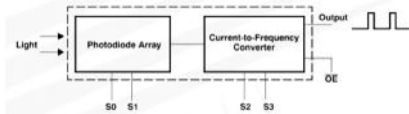
Sensor fotodioda array adalah salah satu sensor fotodioda yang tersusun dalam chip IC. Sensor cahaya berupa IC yang mengkonversi intensitas cahaya ke frekuensi. Outputnya bisa berupa deretan pulsa atau gelombang persegi (50% duty cycle) dengan frekuensi berbanding lurus dengan intensitas cahaya [9].



Gambar 7. Sensor Fotodioda array

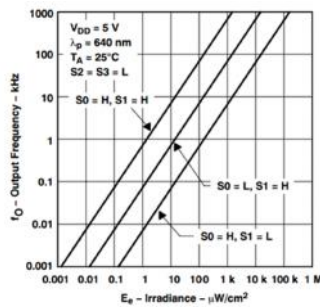
Sensitivitas perangkat dapat dipilih dalam tiga rentang, memberikan penyesuaian selama dua

dekade. Frekuensi output skala penuh dapat diskala oleh satu dari empat nilai preset. Semua input dan outputnya kompatibel dengan TTL, memungkinkan komunikasi dua arah langsung dengan mikrokontroler untuk antarmuka pemrograman dan keluaran.



Gambar 8. Diagram Blok Sensor Fotodiode

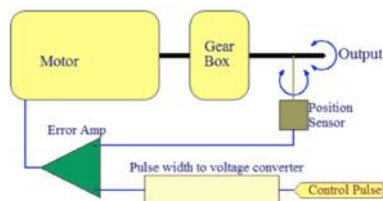
Gambar 8. cahaya datang akan diterima oleh fotodiode array kemudian fotodiode mengeluarkan hasil respon berupa arus. Arus dari fotodiode akan diolah dalam konverter dan diubah menjadi frekuensi. Semakin besar radiasi cahaya yang diterima, maka frekuensi yang dikeluarkan semakin besar. Sebaliknya, semakin kecil radiasi cahaya yang diterima, maka frekuensi yang dikeluarkan semakin kecil. Hal tersebut ditunjukkan dalam grafik dibawah ini



Gambar 9. Grafik Radiasi Cahaya Terhadap Output Frekuensi Sensor Fotodiode Array

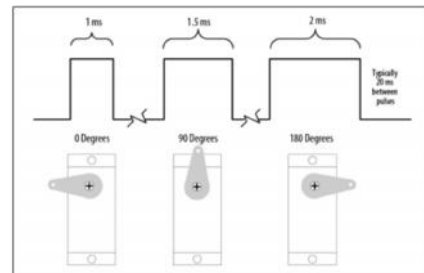
Motor Servo

Motor servo adalah sebuah perangkat atau aktuator putar yang dirancang dengan sistem kontrol umpan balik loop tertutup. Loop tertutup digunakan untuk menentukan dan memastikan posisi sudut dari poros output motor



Gambar 10. Diagram Blok Motor Servo

Prinsip kerja servo diawali dengan adanya dua input sinyal yaitu sinyal eksternal (kontrol sinyal) dan sinyal potensiometer. Pada keadaan awal, potensiometer dalam keadaan tidak ada sinyal. Disaat terdapat sinyal eksternal, sinyal diproses menuju Op Amp. Op Amp hanya menerima sinyal eksternal sehingga menghasilkan sinyal error. Sinyal error ini yang akan bertindak menggerakkan motor. Ketika motor berputar, potensiometer akan bergeser dan menghasilkan sinyal. Perubahan posisi potensiometer membuat sinyal keluaran potensiometer berubah. Perubahan sinyal ini akan memberikan efek umpan balik ke dalam Op Amp. Sistem umpan balik dalam motor servo digunakan untuk mengendalikan gerak dan posisi akhir poros. Motor dikontrol oleh sinyal umpan balik yang dihasilkan dengan membandingkan sinyal output (potensiometer) dan sinyal eksternal (kontrol sinyal). Sinyal input dibandingkan dengan sinyal output dan sinyal ketiga dihasilkan dari sinyal umpan balik. Sinyal umpan balik ini berfungsi untuk mengendalikan poros motor. Jadi, tugas utama sistem motor servo adalah mempertahankan keluaran sistem pada nilai yang diinginkan [10].



Gambar 11. Pulsa kontrol motor servo dan sudut yang dihasilkan

Motor servo memiliki tiga pin masukan yaitu Vcc, ground dan kontrol. Servo bekerja pada tegangan +5V. Pin kontrol digunakan untuk menerima sinyal PWM (Pulse-Width Modulation) yang diberikan dari mikrokontroler. Motor servo bisa memutar 90 derajat dari kedua arah membentuk posisi yang netral. Motor servo memeriksa pengulangan sinyal setiap 20 milidetik (ms) dan panjang pulsa akan menentukan seberapa jauh motor berubah. Misalnya, sinyal pulsa 1,5 ms akan membuat poros motor bergerak ke posisi 90°, pulsa minimum 1 ms posisi poros menjadi 0° dan pada pulsa maksimum 2 ms posisi

poros menjadi 180°. Pernyataan tersebut dapat dilihat pada **Gambar 11**.

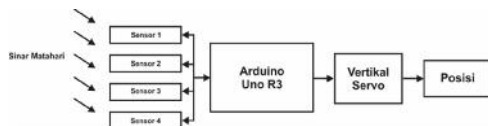
METODE

A. Pengujian Sensor

Pengujian sensor dilakukan untuk mengetahui karakteristik sensor dan fungsi keluaran sensor. Sensor yang digunakan dalam sistem yaitu sensor LDR, sensor fotodiode, dan sensor fotodiode array. Pengujian sensor menggunakan langkah yang sama untuk mengetahui perbandingan keluaran dari ketiga sensor. Pengujian ketiga sensor dilakukan di luar ruangan pada pukul 09.00 hingga pukul 15.00. Pengukuran dilakukan dengan interval waktu satu jam dari pukul 09.00 sampai 15.00. Pengukuran ini dilakukan untuk menentukan intensitas cahaya matahari dan keluaran dari ketiga sensor tersebut pada saat terbit hingga terbenamnya matahari.

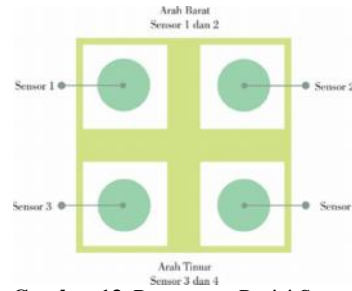
B. Perancangan dan Perangkaian Sistem

Perancangan sistem diawali dengan pembuatan diagram blok sistem. Diagram blok ini bertujuan untuk memudahkan membuat program perintah dalam perangkat lunak, memahami alur kerja sistem, dan memudahkan dalam merancang sistem. Diagram blok sistem dapat dilihat pada **Gambar 12**.



Gambar 12. Diagram Blok Sistem

Pada bagian sensor, digunakan sebanyak empat buah sensor yang digunakan untuk mendapatkan arah posisi mata angin timur ke barat. Keempat sensor diletakkan berdekatan akan dibatasi dengan sekat. Prinsip kerja sensor dilakukan secara berpasangan dimana hasil pembacaan sensor 1 dan 2 digunakan untuk mengubah posisi ke arah barat, sensor 3 dan 4 digunakan untuk mengubah posisi ke arah timur.



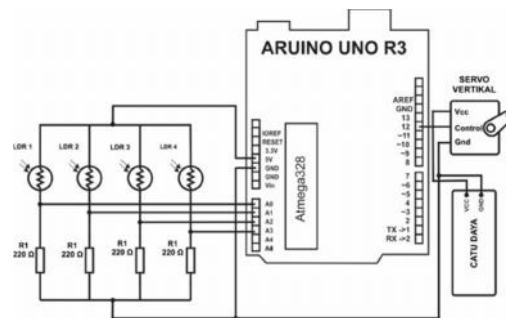
Gambar 13. Rancangan Posisi Sensor

Bagian penggerak sistem menggunakan motor servo. Lengan servo menunjukkan perubahan posisi arah pergerakan matahari dari timur ke barat. Sedangkan sistem penggerak perubahan posisi selatan atau utara dilakukan dengan memiringkan panel sesuai dengan posisi sudut deklinasi matahari dan garis lintang tempat pengujian.

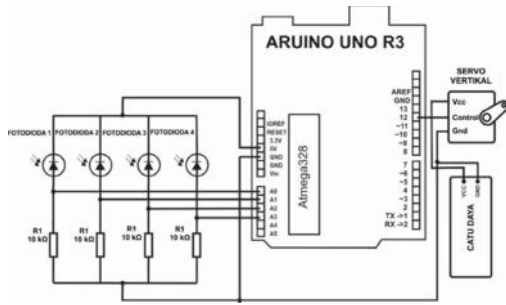


Gambar 14. Rancangan Pergerakan Motor Servo

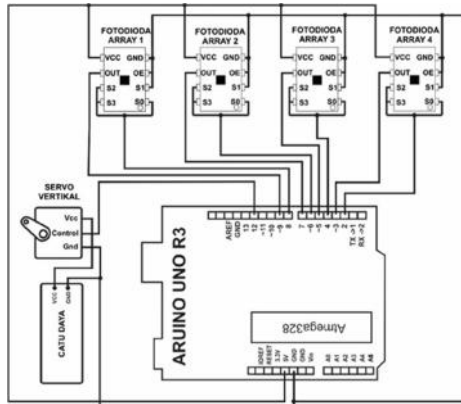
Bagian terakhir adalah perangkaian sistem tracking panel surya dimana arduino menjadi pengendali dari sistem ini. Berikut ini adalah skema rangkaian dari tiga sensor yang berbeda.



Gambar 15. Skema Rangkaian dengan Sensor LDR



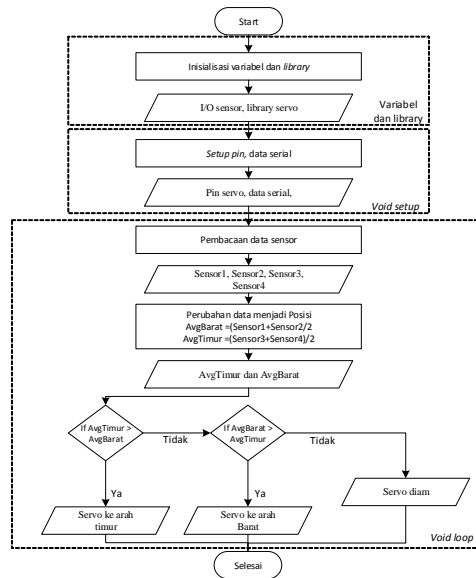
Gambar 16. Skema Rangkaian dengan Sensor fotodioda



Gambar 17. Skema Rangkaian dengan Sensor Fotodioda array

C. Pembuatan Program Arduino

Program Arduino dibuat menggunakan Arduino IDE. Arduino IDE adalah sebuah editor yang digunakan untuk menulis program, compile, dan mengunggah ke mikrokontroler arduino uno. Program yang dibuat di dalam arduino memiliki tiga fungsi utama sebagai pengendali sistem yaitu, pembacaan hasil pengukuran masing- masing sensor terhadap intensitas cahaya, mengolah data sensor menjadi posisi terhadap arah mata angin timur ke barat, dan mengendalikan aktuator sesuai dengan hasil pengolahan data sensor. Adapun diagram alir program dapat dilihat pada **Gambar 18**.



Gambar 18. Diagram Alir Program

D. Pengujian Sistem

1. Pengujian Akurasi Sistem Tracking

Tahap ini akurasi sistem tracking diuji menggunakan sensor LDR, fotodioda, dan fotodioda array. Pengujian ini dilakukan untuk menentukan sistem tracking dengan sensor mana yang memiliki akurasi paling baik. Pengujian sistem tracking dilakukan secara langsung terhadap matahari.

Sistem tracking diuji dalam ruangan terbuka yang cukup terkena sinar matahari dari pukul 09.00-15.00 WIB. Dalam pengujian, pengukuran yang dilakukan adalah pengukuran sudut yang dihasilkan pergerakan panel, pengukuran bayangan benda tegak lurus, dan pengukuran intensitas cahaya matahari. Pengukuran dilakukan dengan interval waktu satu jam. Sebelum melakukan pengukuran, tahap awal yang dilakukan adalah mengetahui deklinasi matahari dan posisi garis lintang tempat pengujian. Hal ini dilakukan untuk menentukan kemiringan sistem tracking dan kemiringan benda tegak lurus. Hasil pengukuran sudut panel dan sudut matahari akan diolah untuk mencari nilai akurasi dan error. Nilai akurasi suatu sistem didapatkan dari perhitungan nilai bias dan standar deviasi. Bias dan standar deviasi dapat dilihat dalam persamaan berikut.

$$Bias = |x_{benar} - \bar{x}| \tag{1}$$

$$\dagger = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (2)$$

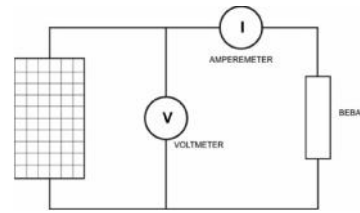
dimana x_{benar} merupakan nilai sudut matahari dan \bar{x} merupakan rata-rata data pengukuran. Nilai x_i merupakan data ke- i dan N adalah jumlah pengambilan data. Menentukan besarnya akurasi dan error dapat dilihat pada persamaan berikut.

$$Akurasi = \left(1 - \frac{bias + 3\dagger}{x_{benar}}\right) \times 100\% \quad (3)$$

$$error = \left(\frac{bias + 3\dagger}{x_{benar}}\right) \times 100\% \quad (4)$$

2. Pengujian Perubahan Daya Panel Tanpa Tracking dan Tracking Panel

Pada tahap kedua, pengujian perubahan daya dilakukan dalam dua keadaan yaitu keadaan panel tanpa *tracking* dan panel dengan *tracking*. Sebelum dilakukan pengujian, masing-masing sistem *tracking* diukur konsumsi daya pemakaiannya. Sistem *tracking* yang digunakan merupakan sistem yang memiliki akurasi dan konsumsi daya yang efisien. Sistem yang memiliki akurasi baik dan konsumsi daya efisien digunakan dalam pengujian perubahan daya panel. Skema pengujian perubahan daya panel surya dapat dilihat pada **Gambar 19**. Beban yang digunakan adalah variasi resistor. Pengujian dilakukan dengan meletakkan sistem panel tanpa *tracking* dan sistem *tracking* secara sejajar. Panel tanpa *tracking* diletakkan tegak lurus ke arah jam optimal penyinaran yaitu jam 12.00. Sistem *tracking* panel diletakkan menghadap timur dan barat untuk mengikuti arah matahari. Sistem *tracking* dimiringkan pada sudut tertentu sesuai dengan sudut deklinasi matahari dan sudut lintang tempat pengujian. Pengujian dilakukan dari jam 09.00-15.00 WIB dengan variasi pengukuran satu jam. Setiap satu jam nilai tegangan, arus dan intensitas matahari dicatat. Hasil dari pengukuran nantinya membandingkan hasil keluaran panel tanpa *tracking* dan keluaran panel dengan *tracking* yang sudah dikurangi konsumsi daya pemakaiannya.

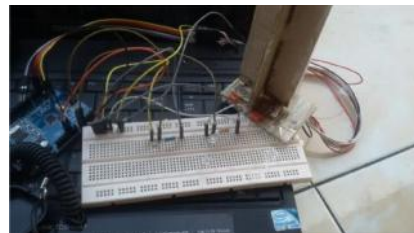


Gambar 19. Skema Pengujian Efisiensi Panel Surya

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengujian Sensor LDR, Fotodiode, dan Fotodiode Array

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui respon keluaran dari ketiga sensor. Respon keluaran sensor LDR dan fotodiode berupa hambatan dan fotodiode array berupa sinyal digital frekuensi. Sebelum dilakukan pengukuran, sensor LDR dan fotodiode dihubungkan dengan rangkaian pembagi tegangan sehingga keluaran sensor menjadi tegangan. Sedangkan sensor fotodiode array diatur sensitivitas sebesar 1x dan skala keluaran 100x. Kaki sensitivitas S0 dan kaki skala frekuensi S2 dan S3 dihubungkan secara paralel, sedangkan sensitivitas S1 dihubungkan ke ground. Rangkaian pengujian yang dibuat dapat dilihat pada **Gambar 20**.

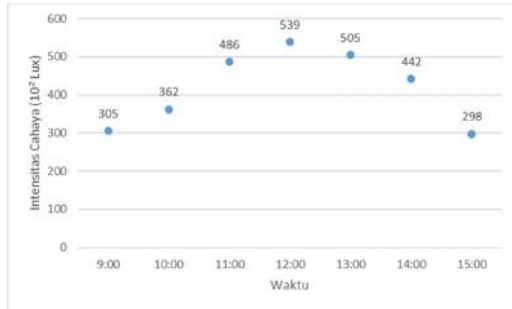


Gambar 20. Hasil Rangkaian Pengujian Sensor

Berikut ini adalah tabel dan grafik hasil pengujian sensor LDR, fotodiode, dan fotodiode array.

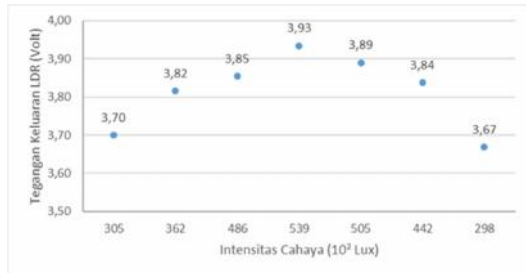
Tabel 2. Hasil Pengujian Respon Sensor

NO	JAM	Keluaran LDR (Volt)	Keluaran Fotodiode (Volt)	Keluaran Fotodiode Array (KHz)	Intensitas Cahaya (10 ² Lux)
1	9:00	3,70	4,87	4,87	305,4
2	10:00	3,82	4,76	4,86	361,8
3	11:00	3,85	4,86	4,86	486,4
4	12:00	3,93	4,74	4,88	539,0
5	13:00	3,89	4,76	4,86	504,6
6	14:00	3,84	4,84	4,84	441,6
7	15:00	3,67	4,84	4,84	297,8



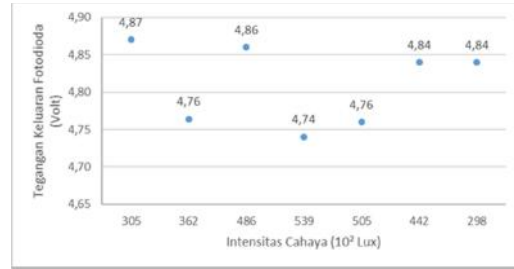
Gambar 21. Perubahan intensitas Cahaya terhadap Waktu

Hasil pengujian intensitas cahaya terhadap waktu pada **Gambar 21** menunjukkan nilai keluaran intensitas bergantung waktu dan sudut yang dihasilkan. Nilai intensitas maksimal pada jam 12.00 WIB sebesar 539×10^2 Lux karena pada jam tersebut intensitas cahaya matahari jatuh tepat tegak lurus dengan Luxmeter. Semakin mendekati arah tegak lurus luxmeter maka nilai intensitas cahaya matahari semakin besar.



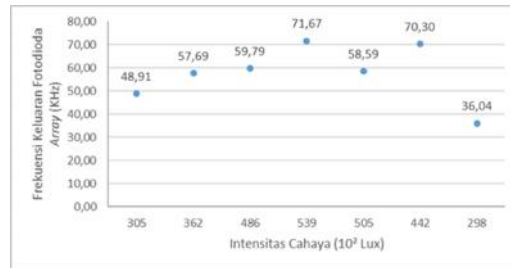
Gambar 22. Keluaran Sensor LDR

Hasil pengujian sensor LDR yang terdapat pada **Gambar 22**. menunjukkan keluaran sensor LDR bergantung pada intensitas yang diterimanya. Pengukuran pertama nilai intensitas kecil sebesar 169×10^2 Lux, keluaran LDR sebesar 3,4 V. Keluaran LDR cenderung meningkat sampai intensitas tertinggi sebesar 549×10^2 Lux, keluaran LDR sebesar 3,93 V. Hasil ini cukup linier karena nilai tegangan sangat bergantung pada intensitas yang diterimanya.



Gambar 23. Hasil Keluaran Sensor Fotodioda

Hasil pengujian sensor fotodioda menunjukkan nilai keluaran fotodioda cenderung fluktuatif. Pengukuran awal dengan intensitas 169×10^2 Lux nilai fotodioda mencapai 4,86 V. Nilai keluaran tertinggi fotodioda terdapat pada intensitas 539×10^2 Lux mencapai 4,88 V. Sedangkan nilai terendah terdapat pada intensitas $441,6 \times 10^2$ Lux dan 297×10^2 Lux yaitu sebesar 4,84 V. Nilai yang cukup tinggi ini dikarenakan fotodioda dilapisi oleh lensa fresnel. Lensa ini akan menyerap intensitas cahaya di segala arah kemudian masuk ke dalam sensor fotodioda. Hal ini menyebabkan perbedaan intensitas cahaya tidak terlalu berpengaruh, karena penyerapan fotodioda yang menggunakan lensa fresnel.



Gambar 24. Hasil Keluaran Sensor Fotodioda array

Hasil pengujian sensor fotodioda array menunjukkan meningkatnya nilai intensitas cahaya diikuti dengan meningkatnya nilai keluaran sensor fotodioda array. Nilai keluaran fotodioda array terkecil adalah 13,22 KHz pada intensitas $169,2 \times 10^2$ Lux dan cenderung naik sampai 71,67 KHz pada intensitas 539×10^2 Lux. Kemudian nilai kembali turun pada 58,59 KHz pada intensitas $504,6 \times 10^2$ Lux dan kembali naik ke 70,30 KHz pada intensitas $441,6 \times 10^2$ Lux. Nilai keluaran kembali turun sampai 12,91 KHz pada intensitas 181×10^2 Lux. Dari hasil data grafik, nilai keluaran sensor fotodioda array dominan meningkat diikuti dengan peningkatan nilai intensitas cahaya matahari.

Berdasarkan hasil pengujian sensor, sensor yang memiliki respon baik terhadap intensitas adalah LDR. Hal ini dikarenakan hasil respon LDR cukup linier antara keluaran sensor dan intensitas cahaya. Sensor kedua adalah sensor fotodiode array. Sensor ini secara dominan cukup linier dan hanya terdapat satu error respon keluaran sensor. Sensor ketiga adalah sensor fotodiode. Sensor ini tidak terlalu direkomendasikan karena memiliki respon yang fluktuatif dibandingkan sensor LDR dan sensor fotodiode *array*.

B. Perancangan dan Perangkaian Sistem

Perancangan dan perangkaian sistem terdiri dari bagian sensor, bagian penggerak sistem dan perangkaian sistem. Sistem dibuat menggunakan bahan plat besi. Berikut ini adalah sistem tracking panel surya yang telah dibuat.



Gambar 25. Sistem Tracking Panel Surya

1. Pembuatan Program Arduino

Program sistem tracking dibuat menggunakan program Arduino IDE, selanjutnya diunggah dari *personal computer* ke *board* Arduino Uno. Program yang diunggah ini terdiri dari tiga bagian perintah yaitu, bagian inisiasi variabel dan *library*, inisiasi *setup* dan inisiasi *loop*. Program yang dibuat disesuaikan dengan ketiga sensor.

```
#include <Servo.h>
Servo servoverti;
int servov = 90;
int servovLimitHigh = 150;
int servovLimitLow = 30;
int Foto1 = A3;
int Foto2 = A2;
int Foto3 = A0;
int Foto4 = A1;

#include <Servo.h>
Servo servoverti;
int servov = 90;
int servovLimitHigh = 150;
int servovLimitLow = 30;
int ldr1 = A3;
int ldr2 = A2;
int ldr3 = A0;
int ldr4 = A1;
```

(a)

(b)

```
#include <Servo.h>
Servo servoverti;
int servov = 90;
int servovLimitHigh = 150;
int servovLimitLow = 30;
int TSL230_Pin1 = 9;
int TSL230_S01 = 8;
int TSL230_Pin2 = 7;
int TSL230_S02 = 6;
int TSL230_Pin3 = 5;
int TSL230_S03 = 4;
int TSL230_Pin4 = 3;
int TSL230_S04 = 2;
int TSL230_samples = 10;
```

(c)

Gambar 26. (a) inisiasi variabel dan library Fotodiode, (b) inisiasi variabel dan library LDR, (c) inisiasi variabel dan library Fotodiode Array

Bagian inisiasi variabel dan library ini adalah pendefinisian motor servo dan pembacaan input output sensor.

```
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  setupTSL2301();
  setupTSL2302();
  setupTSL2303();
  setupTSL2304();
  servoverti.attach(12);
}

void setupTSL2301() {
  pinMode(TSL230_Pin1, INPUT);
  pinMode(TSL230_S01, OUTPUT);
  digitalWrite(TSL230_S01, HIGH);
}

void setup() {
  servoverti.attach(12);
  delay(500);
}
```

(a)

(b)

Gambar 27. (a) Bagian Setup LDR dan Fotodiode, (b) Bagian Setup Fotodiode Array

Bagian setup merupakan bagian yang di eksekusi sekali pada awal program berjalan.

```
void loop() {
  servov = servoverti.read();
  int ldr1 = analogRead(ldr1);
  int ldr2 = analogRead(ldr2);
  int ldr3 = analogRead(ldr3);
  int ldr4 = analogRead(ldr4);
  int avgbot = (ldr1 + ldr2) / 2;
  int avgtop = (ldr3 + ldr4) / 2;
  if (avgtop > avgbot) {
    servoverti.write(servov + 1);
    if (servov > servovLimitHigh) {
      servov = servovLimitHigh;
    }
    delay(500);
  }
  else if (avgbot > avgtop) {
    servoverti.write(servov - 1);
    if (servov < servovLimitLow) {
      servov = servovLimitLow;
    }
    delay(500);
  }
  else {
    servoverti.write(servov);
  }
}

void loop() {
  servov = servoverti.read();
  int foto1 = analogRead(Foto1);
  int foto2 = analogRead(Foto2);
  int foto3 = analogRead(Foto3);
  int foto4 = analogRead(Foto4);
  int avgtop = (foto1 + foto2) / 2;
  int avgbot = (foto3 + foto4) / 2;
  if (avgtop > avgbot) {
    servoverti.write(servov + 1);
    if (servov > servovLimitHigh) {
      servov = servovLimitHigh;
    }
    delay(500);
  }
  else if (avgbot > avgtop) {
    servoverti.write(servov - 1);
    if (servov < servovLimitLow) {
      servov = servovLimitLow;
    }
    delay(500);
  }
  else {
    servoverti.write(servov);
  }
}

void loop() {
  servov = servoverti.read();
  int TSL1 = readTSL2301(samples)/100;
  int TSL2 = readTSL2302(samples)/100;
  int TSL3 = readTSL2303(samples)/100;
  int TSL4 = readTSL2304(samples)/100;
  int avgtop = (TSL1 + TSL2) / 2;
  int avgbot = (TSL3 + TSL4) / 2;
  if (avgtop > avgbot) {
    servoverti.write(servov + 1);
    if (servov > servovLimitHigh) {
      servov = servovLimitHigh;
    }
    delay(500);
  }
  else if (avgbot > avgtop) {
    servoverti.write(servov - 1);
    if (servov < servovLimitLow) {
      servov = servovLimitLow;
    }
    delay(500);
  }
  else {
    servoverti.write(servov);
  }
  float readTSL(int ampIn);
  float start = millis();
  int readings = 0;
  while (readings < samples) {
    pinMode(TSLPin, INPUT);
    readings++;
  }
  float length = millis() - start;
  float avg = (100000/(length*samples))*100;
  return avg;
}
```

(a)

(b)

(c)

Gambar 28. (a) inisiasi loop LDR, (b) inisiasi loop Fotodiode, (c) inisiasi loop Fotodiode array

Bagian inisiasi *loop* merupakan bagian yang akan diulang terus menerus selama program bekerja. Fungsi utama sistem tracking berada pada inisiasi *loop*. Fungsi utama sistem *tracking* adalah membaca hasil pengukuran masing-masing sensor terhadap intensitas cahaya, mengolah data sensor menjadi posisi terhadap arah mata angin timur ke barat, dan

mengendalikan aktuator sesuai dengan hasil pengolahan data sensor.

2. Pengujian Sistem

Pengujian Sistem Tracking Menggunakan Sensor LDR

Pengujian dilakukan pada tanggal 7 Juli 2018 pada sudut deklinasi matahari sebesar 22,59° dan sudut garis lintang selatan sebesar 7,4° sehingga kemiringan total 29,99°. Sistem tracking dan benda dimiringkan pada sudut 29,99° menghadap utara. Setiap jam nilai sudut pada sistem tracking, intensitas cahaya dan panjang bayangan benda dicatat. Hasil dari pengukuran yang dilakukan digunakan untuk memperoleh sudut matahari, bias, error dan akurasi. Berikut hasil pengujian sistem tracking panel menggunakan sensor LDR.

Tabel 3. Hasil Pengujian Sistem Tracking Panel Menggunakan Sensor LDR

Jam	Intensitas Cahaya Matahari (10 ² Lux)	Sudut Panel (°)	Sudut Elevasi Matahari (°)	Bias (°)	Error (%)	Akurasi (%)
9:00	429	50,00	51,41	1,41	8,57	91,43
10:00	546	64,00	65,22	1,22	5,12	94,88
11:00	708	76,80	78,18	1,38	4,97	95,03
12:00	724	92,40	91,82	0,58	4,36	95,64
14:00	640	120,40	119,44	0,96	3,05	96,95
15:00	370	133,60	131,48	2,12	2,86	97,14
Rata-rata				1,28	4,82	95,18

Berdasarkan hasil pengujian, sistem tracking menggunakan sensor LDR bekerja dengan baik. Sistem tracking dapat mengikuti pergerakan matahari dari jam 09.00-15.00 WIB. Sistem tracking dapat bekerja dengan baik sehingga menghasilkan nilai bias sebesar 1,28°. Nilai bias merupakan nilai perbandingan nilai sudut panel dengan sudut elevasi matahari. Sistem tracking dengan sensor LDR ini memiliki akurasi yang cukup baik yaitu 95,18% dan nilai error sebesar 4,82%.

Pengujian Sistem Tracking Menggunakan Sensor Fotodiode

Pengujian sistem tracking sensor fotodiode diawali dengan memberikan penutup pada

kepala fotodiode hingga hanya puncak kepala fotodiode yang dapat menerima sinar. Hal ini dilakukan untuk mengurangi terjadinya bias pada sensor.

Pengujian dilakukan pada tanggal 6 Juli 2018 pada sudut deklinasi 22,7° dan sudut garis lintang selatan 7,4° sehingga kemiringan total 30,1°. Sistem tracking dan benda dibuat miring pada sudut 30,1° menghadap utara. Setiap jam nilai sudut pada sistem tracking, intensitas cahaya dan panjang bayangan benda dicatat. Hasil dari pengukuran yang dilakukan digunakan untuk memperoleh sudut matahari, bias, error dan akurasi. Berikut hasil pengujian sistem tracking panel menggunakan sensor fotodiode.

Tabel 4. Hasil Pengujian Sistem Tracking Panel Menggunakan Sensor Fotodiode

Jam	Intensitas Cahaya Matahari (10 ² Lux)	Sudut Panel (°)	Sudut Elevasi Matahari (°)	Bias (°)	Error (%)	Akurasi (%)
9:00	525	42,20	51,54	9,34	22,99	77,01
10:00	591	65,00	62,80	2,20	8,29	91,71
11:00	676	76,80	75,54	1,26	6,85	93,15
12:00	718	96,00	89,89	6,11	6,79	93,21
14:00	183	121,80	117,88	3,92	6,12	93,88
15:00	401	127,60	132,08	4,48	4,63	95,37
Rata-rata				4,55	9,28	90,72

Berdasarkan hasil pengujian, sistem tracking menggunakan sensor fotodiode bekerja dengan cukup baik. Terdapat nilai error yang cukup besar yaitu 22,99% pada pengukuran jam 09.00 dimana sudut panel yang terukur sebesar 42,20° sedangkan sudut matahari sebesar 51,54°. Sistem masih dapat membaca pergerakan matahari dengan baik pada intensitas 183x10² Lux dengan akurasi sensor sebesar 93,88%. Sistem memiliki akurasi sebesar 90,72% dan error sebesar 9,28%. Nilai akurasi ini lebih kecil dari sistem tracking menggunakan sensor LDR.

Pengujian Sistem Tracking Menggunakan Sensor Fotodiode Array Merk TSL230R

Pengujian sistem tracking menggunakan sensor fotodiode array dilakukan pada tanggal 22 Juli 2018 dengan sudut deklinasi matahari sebesar 20,24° dan sudut garis lintang selatan sebesar 7,4° sehingga sudut total menjadi 27,64°. Sistem

tracking dibuat miring pada sudut 27,64° menghadap utara. Setiap jam nilai sudut pada sistem tracking, intensitas cahaya dan panjang bayangan benda dicatat. Hasil dari pengukuran yang dilakukan digunakan untuk memperoleh sudut matahari, bias, error dan akurasi. Berikut hasil pengujian sistem tracking panel menggunakan sensor fotodiode *array*.

Tabel 5. Hasil Pengujian Sistem Tracking Panel Menggunakan Sensor Fotodiode *Array*

Jam	Intensitas Cahaya Matahari (10 ² Lux)	Sudut Panel (°)	Sudut Elevasi Matahari (°)	Bias (°)	Error (%)	Akurasi (%)
9:00	436,2	50,40	49,74	0,66	9,41	90,59
10:00	588,2	64,00	64,69	0,69	8,40	91,60
11:00	672,8	76,20	75,84	0,36	3,79	96,21
12:00	724,2	89,20	90,00	0,80	5,23	94,77
14:00	416,6	117,40	117,88	0,48	3,31	96,69
15:00	479	128,60	129,56	0,96	2,81	97,19
Rata-rata				0,66	5,49	94,51

Berdasarkan hasil pengujian, sistem *tracking* menggunakan sensor fotodiode *array* bekerja dengan baik. Terlihat pada **Tabel 5.** nilai sudut panel sangat mendekati nilai sudut matahari sehingga nilai bias nya hanya sebesar 0,66°. Nilai rata-rata akurasi sistem tracking dengan sensor fotodiode array sebesar 94,51% dan error sebesar 5,49%.

Pengujian Perubahan Daya Sistem Panel Tanpa Tracking dan Sistem Panel dengan Tracking

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui perbedaan keluaran daya pada panel keadaan tanpa tracking dan panel keadaan tracking. Sistem tracking yang digunakan dalam pengujian ini adalah sistem tracking yang memiliki akurasi yang baik dan konsumsi daya yang efisien. Masing-masing sistem tracking diukur nilai pemakaian konsumsi dayanya. Berikut hasil pengukuran konsumsi daya masing-masing sistem

Tabel 6. Hasil Pengujian Konsumsi Daya Masing-masing Sistem Tracking

	V (volt)	I (mA)	Konsumsi Servo		Konsumsi Total		Daya Total (watt)
			V (volt)	I (mA)	V (volt)	I (mA)	
Konsumsi Arduino LDR	4,82	60,8	4,97	81,43	4,90	142,23	0,70
Konsumsi Arduino Fotodiode	4,88	46,36	4,97	81,43	4,93	127,79	0,63
Konsumsi Arduino Fotodiode Array	4,92	38,2	4,97	81,43	4,95	119,63	0,59

Berdasarkan **Tabel 6.** konsumsi daya masing-masing sistem yaitu, daya sistem tracking menggunakan sensor LDR sebesar 0.7 watt, daya sistem tracking menggunakan sensor fotodiode sebesar 0.63 watt dan daya sistem tracking menggunakan sensor fotodiode array sebesar 0.59 watt. Dari hasil ini nilai sistem tracking menggunakan sensor fotodiode array memiliki nilai yang lebih efisien dibandingkan sistem tracking dengan sensor LDR dan fotodiode. Dalam pengujian akurasi, sistem tracking dengan sensor LDR memiliki akurasi sebesar 95,18%, sistem tracking dengan sensor fotodiode memiliki akurasi sebesar 90,72%, dan sistem tracking dengan sensor fotodiode array memiliki akurasi sebesar 94,51%. Berdasarkan hasil data, sistem tracking dengan sensor fotodiode array memiliki akurasi yang cukup baik dan konsumsi daya yang efisien sehingga sistem ini digunakan dalam pengujian efisiensi sistem panel statis dan sistem tracking panel.

Pengujian dilakukan dengan meletakkan sistem panel tanpa tracking dan sistem tracking secara sejajar. Panel tanpa tracking diletakkan tegak lurus ke arah jam optimal penyinaran yaitu jam 12.00. Sedangkan sistem tracking panel diletakkan menghadap timur dan barat untuk mengikuti arah matahari. Sistem tracking dimiringkan pada sudut tertentu sesuai dengan sudut deklinasi matahari dan sudut lintang tempat pengujian. Pengujian dilakukan dari jam 09.00-15.00 dengan variasi pengukuran satu jam. Setiap satu jam nilai tegangan, arus dan intensitas matahari dicatat. Pengujian yang dilakukan menggunakan variasi beban resistor dari 47, 56, 68, 82, dan 103 . Hasil dari pengukuran nantinya membandingkan hasil keluaran panel tanpa tracking dan keluaran sistem *tracking* yang sudah dikurangi konsumsi daya pemakaiannya. Berikut ini adalah hasil

pengukuran sistem panel surya tanpa *tracking* dan sistem *tracking* panel.

Tabel 7. Hasil pengukuran keluaran sistem panel tanpa *tracking* dan sistem *tracking* panel

Jam	Intensitas Cahaya Matahari	Beban 47					
		Sistem <i>Tracking</i>			Sistem Statis		
		V (volt)	I (A)	Daya (watt)	V (volt)	I (A)	Daya (watt)
9:00	455	17,58	0,37	6,51	15,56	0,33	5,13
10:00	581	17,62	0,37	6,52	16,83	0,35	5,92
11:00	651	17,70	0,37	6,55	17,08	0,36	6,15
12:00	768	17,47	0,38	6,64	17,36	0,36	6,25
13:00	750	17,74	0,38	6,74	17,48	0,36	6,26
14:00	651	17,34	0,38	6,52	16,64	0,34	5,72
15:00	451	17,73	0,38	6,77	15,57	0,33	5,14
Rata-rata		17,60	0,38	6,61	16,64	0,35	5,80

Berdasarkan pengukuran yang dilakukan, nilai keluaran panel surya optimal pada beban 47 . Dapat dilihat dari tabel, daya keluaran panel sistem *tracking* pada pagi dan sore hari memiliki selisih yang cukup besar dibandingkan dengan keluaran sistem statis panel. Hal ini dikarenakan perbedaan sudut datang yang diterima sistem *tracking* panel dan sistem statis panel. Daya keluaran rata-rata sistem *tracking* panel sebesar 6,61 watt dan daya keluaran rata-rata sistem tanpa *tracking* panel sebesar 5,8 watt. Daya keluaran rata-rata sistem *tracking* panel perlu dikurangi dengan konsumsi daya pemakaian yaitu 0,59 watt sehingga daya keluaran sistem *tracking* panel menjadi 6,02 watt. Selisih dari daya keluaran sistem *tracking* dengan sistem tanpa *tracking* adalah 0,22 watt. Hasil ini menunjukkan penggunaan panel sistem *tracking* lebih baik karena terjadi peningkatan daya sebesar 0,22 watt.

KESIMPULAN

Sistem *tracking* telah dibuat menggunakan sensor LDR, fotodiode, dan fotodiode array. Sistem *tracking* dengan sensor LDR memiliki nilai akurasi sebesar 95,18%, sistem dengan sensor fotodiode memiliki nilai akurasi sebesar 90,72%, Sistem *tracking* dengan sensor fotodiode array memiliki nilai akurasi sebesar 94,51%. Sistem dengan menggunakan sensor LDR memiliki akurasi yang paling bagus daripada sistem dengan sensor fotodiode dan fotodiode array. Penggunaan

sistem *tracking* panel surya membuat peningkatan daya keluaran panel sebesar 0,22 watt dibandingkan dengan sistem tanpa *tracking*.

DAFTAR PUSTAKA

[1] ESDM, Statistik Ketenagalistrikan 2014 Edisi No. 28 Tahun Anggaran 2015. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2015).

[2] Hardianto, H. E., & Rinaldi, R. S., Perancangan Prototype Penjejak Cahaya Matahari Pada Aplikasi Pembangkit Listrik, 2(2), 208–215 (2012).

[3] Tamimi, S., Indrasari, W., & Iswanto, B. H., Optimasi Sudut Kemiringan Panel Surya Pada Prototipe Sistem Penjejak Matahari Aktif, E-Journal Seminar Nasional Fisika 2016, V, 53–56 (2016).

[4] Arjyadhara, P., Ali, S. M., & Chitralekha, J., Analysis of Solar PV cell Performance with Changing Irradiance and Temperature. International Journal Of Engineering And Computer Science, 2(1), 214–220 (2013).

[5] Yuwono, B., Optimalisasi Panel Sel Surya dengan Menggunakan Sistem Pelacak Berbasis Mikrokontroler AT89C51. Surakarta: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam UNS Surakarta, (2005).

[6] Wiranatha, Y., Kusuma, J., Soedjarwanto, N., Trisanto, A., & Despa, D., Rancang Bangun Penggerak Otomatis Panel Surya Menggunakan Sensor Photodiode Berbasis Mikrokontroler Atmega 16. Jurnal Rekayasa Dan Teknologi Elektro, Vol.9 No.1, 11–20 (2015).

[7] Pandiangan, J., Perancangan dan Penggunaan Photodiode Sebagai Sensor Penghindar Dinding pada Robot Forklift. Medan: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Univesitas Sumatera Utara (2007).

[8] Giancoli, D. C., Fisika Edisi Kelima Jilid 2. Jakarta: Erlangga. (2001).

[9] TAOS. TSL230R–LF, TSL230AR–LF, TSL230BR–LF Programmable light-to-frequency converters. Plano: TAOS Inc. (2006).

[10] Haidar, A. M. A., Benachaiba, C., & Zahir, M., Software interfacing of servo motor with microcontroller. Journal of Electrical Systems, 9(1), 84–99 (2013).

[11] Everlight. 3mm Photodiode PD204-6C/L3. Everlight. (2010).