

Optimalisasi Keluaran Panel Surya Menggunakan *Solar Tracker* Berbasis Kamera Terintegrasi Raspberry Pi

(*Optimization of Solar Panel Output Using a Camera-Based Solar Tracker Raspberry Pi Integrated*)

Agus Suryanto¹, Noor Hudallah², Tatyantoro Andrasto³, Cahyo Fajar Adhiningtyas⁴, Seftriana Anifa Khusniasari⁵

Abstract—One of the factors of the operation of solar cells in order to obtain the maximum value is the position of solar cells to the sun. The solar tracker is a tool to increase the insolation of solar panels by changing the direction of solar panels towards the position of the sun. So far, image-based solar trackers are still using full-size computers which require a lot of energy and space. This study aims to increase the accuracy of the direction of the solar panel and optimize the output of the solar panel by increasing the angle of solar radiation using a solar tracker with camera sensors and a Raspberry Pi mini-computer. The use of cameras is aimed at reducing errors from LDR-based systems. In addition, the use of Raspberry Pi is aimed at replacing full-size computer work. The search for sun orientation employed the highest pixel value intensity method. Based on the analysis of solar panel output, it is proven that it can be optimized with the application of Raspberry Pi integrated camera-based solar tracker. The comparison of the output power between the stationary solar panels and the solar panels installed on the Raspberry Pi integrated camera-based solar tracker was 1:1.389 (21,5487 W:29.8822 W) in no-load test and 1:1.2042 (6.0344 W:7.2671 W) on test 12 V/5 W bulb-load.

Intisari—Salah satu faktor pada pengoperasian sel surya agar didapatkan nilai maksimum adalah posisi sel surya terhadap matahari. *Solar tracker* adalah alat untuk meningkatkan insolasi pada panel surya dengan mengubah arah panel surya menuju posisi matahari. Pada awalnya, *solar tracker* diatur menggunakan LDR. Kemudian, pengaturan berbasis pengolahan citra dapat mengurangi kesalahan pelacakan. *Solar tracker* berbasis citra selama ini masih menggunakan komputer ukuran penuh yang membutuhkan banyak energi dan tempat. Makalah ini bertujuan meningkatkan akurasi arah panel surya dan mengoptimalkan keluaran panel surya dengan meningkatkan sudut penyinaran matahari (insolasi) menggunakan *solar tracker* dengan sensor kamera dan komputer mini Raspberry Pi. Penggunaan kamera ditujukan untuk mengurangi kesalahan sistem berbasis LDR dan penggunaan Raspberry Pi menggantikan kerja komputer ukuran penuh. Pencarian orientasi matahari menggunakan metode intensitas nilai piksel tertinggi. Berdasarkan hasil analisis, keluaran panel surya terbukti dapat dioptimalkan dengan diaplikasikannya *Solar Tracker* Berbasis Kamera Terintegrasi Raspberry Pi. Perbandingan daya keluaran antara panel surya diam dengan

panel surya yang terpasang pada *Solar Tracker* Berbasis Kamera Terintegrasi Raspberry Pi adalah 1:1,389 (21,5487 W:29,8822 W) pada pengujian tanpa beban dan 1:1,2042 (6,0344 W:7,2671 W) pada pengujian dengan beban lampu pijar 12 V/5 W.

Kata Kunci—Raspberry Pi, Solar Cell, Solar Tracker, Kamera.

I. PENDAHULUAN

Pengoperasian sel surya, agar didapatkan nilai yang maksimum, sangat tergantung pada beberapa hal, antara lain temperatur sel surya, radiasi matahari, kecepatan angin, keadaan atmosfer bumi, orientasi sel surya, dan posisi letak sel surya terhadap matahari (*tilt angle*) [1]. *Solar tracker* (penjejak surya) adalah suatu sistem yang mengarahkan orientasi kolektor surya, seperti panel *photovoltaic* datar (*flat PV*), *photovoltaic* terkonsentrasi (*concentrated PV*) atau *Concentrated Solar Thermal* (CSP) secara otomatis ke arah matahari. Sistem tersebut meningkatkan daya yang dihasilkan dengan mengoptimalkan sudut pertemuan antara sinar matahari dengan kolektor surya. Ada beberapa konsep umum dari *solar tracker*. Secara umum, *solar tracker* dibagi dalam dua kategori utama, yaitu *passive tracker* dan *active tracker*. *Passive tracker* adalah *solar tracker* yang sama sekali tidak melibatkan peralatan elektronik untuk mencari posisi matahari, biasanya berbasis pemuai benda terhadap suhu. Sementara itu, *active tracker* adalah *solar tracker* yang berbasis peralatan elektronik. *Solar tracking system* juga dapat dibagi berdasarkan *degrees of freedom* (tingkat kebebasan gerak) sistem mekanisnya. *Solar tracker* dengan satu sumbu gerakan disebut *single axis tracker*, terdiri atas *Horizontal Single Axis Tracker* (HSAT), *Vertical Single Axis Tracker* (VSAT), dan *Tilted Single Axis Tracker* (TSAT). *Solar tracker* dengan dua sumbu gerakan disebut *Dual Axis Tracker*. Sistem yang kedua ini lebih efisien [2].

Dibandingkan dengan panel tetap, panel dengan *solar tracker* dijaga agar tetap berada di bawah insolasi terbaik untuk semua posisi matahari karena cahaya mendekati titik normal geometris. Sistem pelacakan matahari otomatis (menggunakan pengindraan intensitas cahaya) dapat meningkatkan efisiensi konversi panel PV secara konsisten, sehingga menurunkan lebih banyak energi dari matahari [3].

Untuk mendapatkan *solar tracker* yang bekerja secara optimal, pada awalnya arah *solar tracker* diatur menggunakan empat LDR, kemudian pengaturan berbasis pengolahan citra dapat mengurangi kesalahan pelacakan sebanyak mungkin. Dengan kata lain, penambahan kamera dan metode berbasis pengolahan citra sangat mengurangi kesalahan yang ada pada

^{1,2,3,4,5} Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang, Kampus Sekaran Gunungati Kota Semarang 50229 Indonesia (telp: 082136491991; e-mail: ¹agusku2@mail.unnes.ac.id, ²noorhudallah@mail.unnes.ac.id, ³tatyantoro@mail.unnes.ac.id, ⁴cahyof95@gmail.com, ⁵seftrianakhusnia@gmail.com)

metode berbasis LDR. Sistem ini tidak membutuhkan pertimbangan astronomis apa pun dan tidak tergantung pada posisi geografis dan pengaturan awal [4].

Solar tracker berbasis kamera in dikembangkan menggunakan Raspberry Pi sebagai pengganti komputer ukuran penuh dan menggunakan Raspberry Pi Camera Module V2 sebagai sensor utama. Sensor ini dipilih karena sudah didesain khusus untuk berkerja secara optimal pada Raspberry Pi. Raspberry Pi adalah komputer mini yang ukurannya hanya sebesar 85 mm × 56 mm. Raspberry Pi memiliki kemampuan yang sama dengan komputer personal ukuran penuh dengan tambahan fungsi empat puluh pin *General Purpose Input/Output* (GPIO) untuk berkomunikasi dengan peralatan luar komputer, seperti sensor dan aktuator. Raspberry Pi 3 model B ditenagai prosesor *quad core* 1,2 GHz Broadcom BCM2837 64 bit dengan RAM sebesar 1 GB. Raspberry Pi 3 membutuhkan tegangan catu sebesar +5 V melalui soket USB mikro. Besar arus yang dibutuhkan bervariasi, tergantung pada alat yang dipasang pada Raspberry Pi 3 tersebut. Modul kamera Raspberry Pi Camera Module V2 memiliki sensor 8 MP Sony IMX219. Modul kamera ini dapat digunakan untuk menangkap foto dan video HD. Modul ini mudah digunakan oleh pengguna pemula, tetapi juga memberikan banyak penawaran fungsi pada pengguna lanjut. Modul kamera ini sangat populer untuk aplikasi *home-security* dan kamera alam liar [5].

Beberapa tujuan dalam makalah ini adalah untuk membuat sebuah sistem *Solar Tracker* Berbasis Kamera Terintegrasi Raspberry Pi, untuk mengoptimalkan akurasi arah panel surya dengan pengaplikasian *Solar Tracker* Berbasis Kamera Terintegrasi Raspberry Pi, untuk mengoptimalkan keluaran panel surya menggunakan *Solar Tracker* Berbasis Kamera Terintegrasi Raspberry Pi, serta untuk mengetahui perbandingan keluaran panel surya statis dan panel surya dengan *Solar Tracker* Berbasis Kamera Terintegrasi Raspberry Pi.

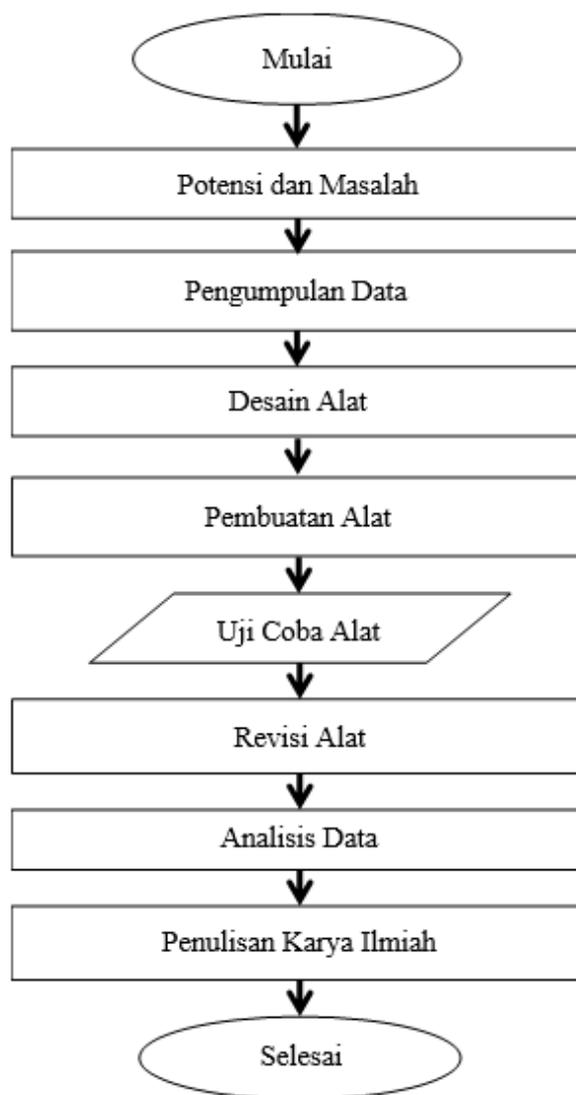
II. METODOLOGI

Makalah ini menggunakan metode *research and development*. Metode ini adalah penelitian yang digunakan untuk menghasilkan produk tertentu dan menguji efektivitas produk tersebut [6]. Metode ini dipilih karena relevan dengan tujuan makalah ini, yaitu untuk menghasilkan produk tertentu. Produk yang dihasilkan dan diuji efektivitasnya berupa alat *Solar Tracker* Berbasis Kamera Terintegrasi Raspberry Pi.

Diagram alir penelitian pada Gbr. 1 menunjukkan langkah-langkah penelitian yang dilakukan. Langkah pertama yaitu menemukan potensi dan masalah, lalu mengumpulkan data, desain alat (mekanis, elektris, dan *software*), pembuatan alat, uji coba alat, revisi alat apabila terdapat permasalahan, kemudian analisis data, dan terakhir adalah penulisan karya ilmiah.

A. Metode Pelacakan

Cara-cara pelacakan posisi matahari sudah banyak dikembangkan, seperti dengan menggunakan dua LDR [7], [8], dan menggunakan empat LDR [9], [10]. Pada makalah



Gbr. 1 Diagram alir penelitian.

ini, metode pelacakan menggunakan kamera untuk melacak posisi matahari. Metode yang digunakan adalah pelacakan titik piksel paling cerah, dengan asumsi di langit pada siang hari tidak ada titik cahaya yang lebih cerah daripada matahari.

Tangkapan gambar yang diambil oleh Raspberry Pi Camera Module yang berformat RAW diubah menjadi *array* RGB berukuran 320 × 240 untuk mempercepat pengolahan. Kemudian, untuk mendapatkan nilai intensitas, nilai tiap ruang warna digabungkan dan dirata-rata sehingga data gambar dari kamera menjadi *array* dua dimensi skala abu-abu.

Untuk menghilangkan *noise*, diaplikasikan tapis *Gaussian blur*. Namun, tapis ini memiliki kelemahan dalam aplikasi pelacakan karena pemilihan nilai deviasi keaburan harus tepat. Apabila nilai tersebut terlalu kecil, *noise* tidak tertapis, sedangkan apabila nilai tersebut terlalu besar, titik yang seharusnya terlacak menjadi tidak terlacak karena terlalu membaur dengan piksel di sekitarnya.

Dalam proses penelitian ini ditemukan bahwa pemilihan nilai deviasi keaburan *Gaussian blur* dapat ditentukan

secara otomatis sesuai dengan keperluan, karena semakin gelap langit, nilai dan jumlah *noise* akan bertambah. Ditemukan bahwa nilai deviasi keburaman *Gaussian blur* maksimal adalah sama dengan jari-jari objek yang hendak dideteksi. Oleh karena itu, dilakukan tapis ambang 77% dari nilai kecerahan maksimal yang terdeteksi. Nilai 77% dipilih karena selama penelitian ditemukan bahwa nilai kecerahan bagian tepi matahari adalah 77% dari nilai kecerahan titik tengah matahari. Dari hasil tapis ambang dapat dihitung luas objek dan jari-jarinya. Perhitungan luas menggunakan rumus luas lingkaran.

$$L = \pi r^2 \quad (1)$$

dengan luas lingkaran L sebesar nilai kuadrat jari-jari r dikalikan dengan π , sehingga nilai jari-jari r adalah akar kuadrat dari luas lingkaran L dibagi dengan π .

$$r = \sqrt{\frac{L}{\pi}} \quad (2)$$

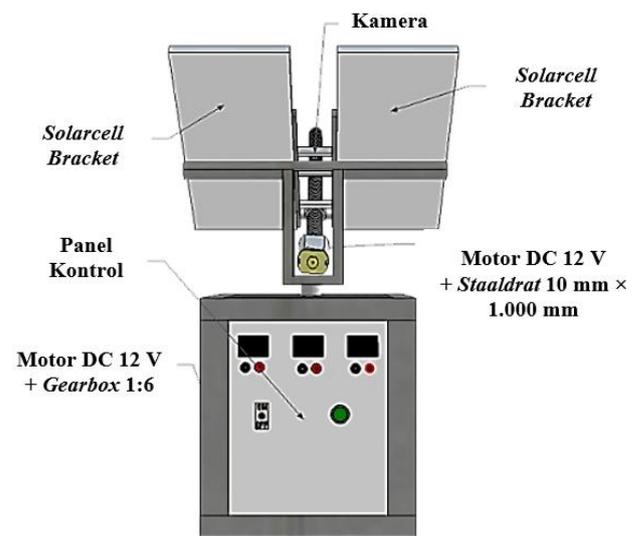
Setelah itu, nilai jari-jari dimasukkan pada variabel deviasi keburaman *Gaussian blur*. Perlu diingat bahwa dalam program Python, nilai deviasi *Gaussian blur* harus ganjil, sehingga jika berjumlah genap harus dikurangi satu agar nilai deviasi tidak melebihi nilai jari-jari deteksi.

Setelah dilakukan *Gaussian blur*, dapat ditemukan data titik deteksi, yaitu koordinat titik paling terang dan nilai kecerahannya. Dari data titik koordinat inilah dilakukan perbandingan nilai koordinat titik paling terang dengan nilai titik tengah gambar dan dilakukan gerakan motor agar posisi koordinat titik paling terang menjadi sama dengan koordinat titik tengah gambar.

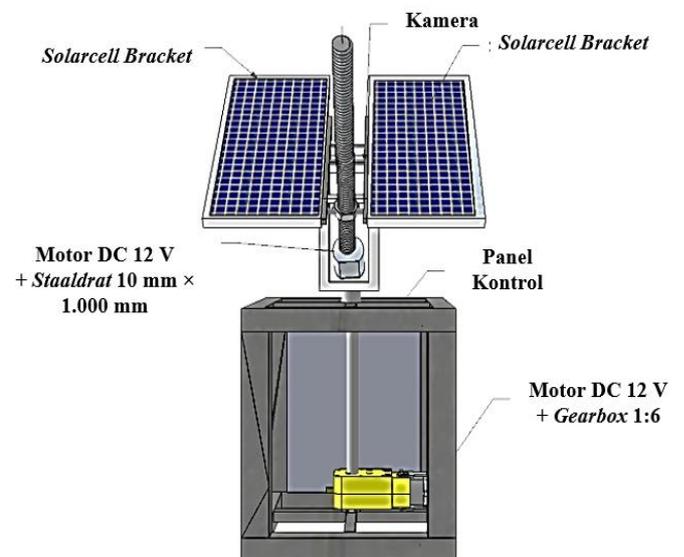
Jika titik paling terang berada di atas titik tengah, motor zenit akan memutar panel ke atas, dan jika titik paling terang berada di bawah titik tengah, maka motor zenit akan memutar panel surya ke bawah. Jika titik paling terang berada di sebelah kanan titik tengah, motor azimut akan memutar panel surya ke kanan, sedangkan jika titik paling terang berada di sebelah kiri titik tengah, motor azimut akan memutar panel surya ke kiri. Prioritas gerakan adalah gerakan vertikal terlebih dahulu. Setelah gerakan vertikal terpenuhi, atau sudah maksimal, baru gerakan horizontal dilaksanakan. Saat dilakukan gerakan vertikal, tidak akan dilakukan gerakan horizontal sampai gerakan vertikal terpenuhi atau sudah maksimal. Sebaliknya, ketika dilakukan gerakan horizontal, tidak akan dilakukan gerakan vertikal sebelum gerakan horizontal terpenuhi atau sudah maksimal. Hal ini dilakukan untuk meningkatkan akurasi dan mengurangi konsumsi daya listrik dan beban *driver motor*.

B. Desain Mekanik

Desain mekanik *Solar Tracker* Berbasis Kamera Terintegrasi Raspberry Pi yang dibuat berupa *solar panel bracket* dengan motor untuk gerakan sudut zenit (sudut terhadap garis tegak ke atas) dan motor gerakan sudut azimut (sudut horizontal terhadap arah utara) serta dilengkapi sebuah kotak panel. Gbr. 2 dan Gbr. 3 mengilustrasikan desain *Solar Tracker* Berbasis Kamera Terintegrasi Raspberry Pi. Pada



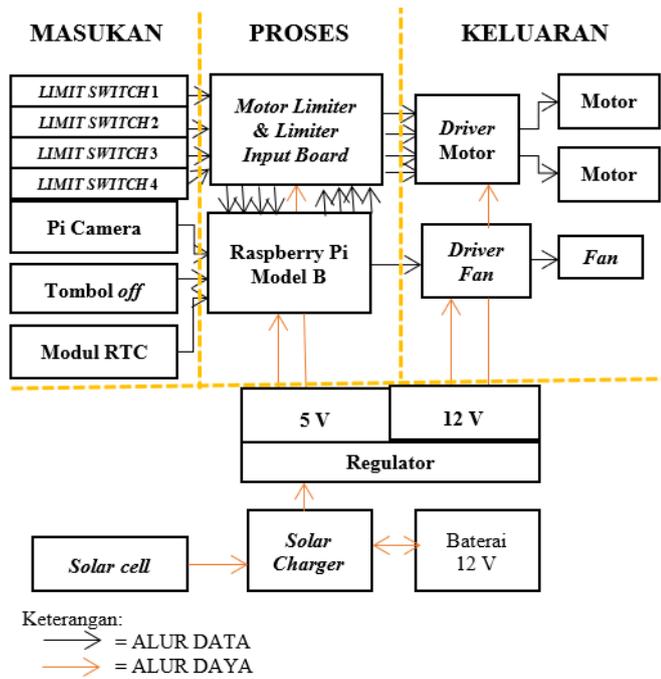
Gbr. 2 Ilustrasi desain tampak depan *Solar Tracker* Berbasis Kamera Terintegrasi Raspberry Pi.



Gbr. 3 Ilustrasi desain tampak belakang *Solar Tracker* Berbasis Kamera Terintegrasi Raspberry Pi.

bagian depan kotak panel terdapat satu buah tombol, satu buah saklar, dan tiga buah voltmeter untuk memonitor tegangan panel surya, baterai dan regulator, dan tiga pasang soket *banana*, yaitu satu pasang untuk pengambilan data panel surya, satu pasang terhubung dengan baterai untuk pengisian baterai dari luar dan keperluan lain, serta satu pasang terhubung ke keluaran regulator untuk keperluan-keperluan lain yang membutuhkan tegangan 5 V.

Di dalam kotak panel terdapat baterai, Raspberry Pi sebagai pengendali utama, rangkaian regulator, dan rangkaian pendukung lainnya. Motor untuk kendali arah zenit diberi *stainless steel* atau besi ulir untuk meningkatkan presisi gerakan dan meningkatkan torsi kerja motor. Motor untuk kendali arah azimut diberi *gearbox* dengan perbandingan rpm 1:6 untuk mengurangi kecepatan motor dan meningkatkan torsi kerja motor.



Gbr. 4 Diagram blok sistem elektronik dari Solar Tracker Berbasis Kamera Terintegrasi Rapsberry Pi.

C. Desain Elektronik

Desain elektronik mencakup blok sistem dan prinsip rangkaian yang digunakan. Gbr. 4 menunjukkan diagram blok sistem elektronik Solar Tracker Berbasis Kamera Terintegrasi Rapsberry Pi. Diagram blok terdiri atas masukan, proses, dan keluaran.

1) *Pi Camera*: Pi Camera atau Raspberry Pi Camera Module berfungsi sebagai sensor utama. Kamera menangkap gambar langit dan menentukan posisi matahari berdasarkan intensitas cahaya tertinggi. Pi Camera mendapatkan daya dari Raspberry Pi. Komunikasi antara Raspberry Pi dengan Pi Camera dilakukan melalui kabel fleksibel FFC 15 pin dengan lebar 16 mm sepanjang 4 m.

2) *Limit Switch*: Limit switch digunakan untuk membatasi gerakan solar tracker. Tujuan dibatasinya gerakan solar tracker ini adalah agar kabel tidak putus, panel surya tidak mengenai rangka, dan motor tidak rusak karena beban tinggi ketika solar panel bracket tertahan oleh rangka.

3) *Tombol Off*: Tombol ini digunakan untuk mematikan sistem melalui software dengan memanggil perintah untuk mematikan sistem. Apabila tombol ditekan selama 10 s, sistem akan dimatikan, jika ditekan selama 5 s, sistem akan dimulai ulang, dan jika ditekan selama 3 s akan memicu dilaksanakannya runtutan pencarian titik dengan intensitas tertinggi. Mematikan sistem secara paksa dengan memutuskan suplai tenaga dapat merusak microSD card yang ada pada Raspberry Pi. Tombol Fungsi juga perlu ditekan untuk menyalakan sistem karena ada rangkaian proteksi low voltage pada regulator yang perlu direset secara manual ketika tegangan baterai di bawah batas discharge baterai.

4) *Modul RTC*: Modul ini digunakan untuk memastikan waktu sistem sama dengan waktu dunia nyata. Realtime clock (RTC) bekerja dengan cara mengirimkan data waktu berupa detik, menit, jam, tanggal, bulan, dan tahun ke sistem lain melalui protokol Inter Integrated Circuit (I2C). Kerja RTC tidak terganggu oleh gangguan yang diakibatkan gagalnya catu daya selama baterai RTC dalam kondisi baik.

5) *Motor Limiter & Limiter Input Board*: Bagian ini berfungsi sebagai buffer dan jembatan antara limit switch dengan Raspberry Pi serta sebagai pengaman driver motor dengan memutuskan masukan driver motor ketika gerakan sudah maksimal. Buffer diperlukan untuk memperkuat dan menegaskan sinyal logika dari limit switch ke Raspberry Pi.

6) *Raspberry Pi 3 Model B*: Blok ini berfungsi untuk memproses gambar yang diterima oleh kamera dan menentukan gerakan solar tracker dengan motor berdasarkan hasil pengolahan gambar tersebut. Untuk mempermudah pemasangan peranti masukan dan keluaran, digunakan peranti tambahan bernama Hardware Attached on the Top (HAT). Rangkaian HAT berupa papan rangkaian berisi female header 2 x 20 untuk soket GPIO Raspberry Pi, male header 1 x 4 untuk RTC, male header 1 x 4 untuk keluaran menuju driver motor, rangkaian kendali kipas pendingin, dan terminal blok sekrup untuk masukan limit switch.

7) *Fan & Driver Fan*: Fan (kipas pendingin) 12 V 0,01 A 5 cm x 5 cm digunakan untuk mendinginkan prosesor Raspberry Pi agar tidak terjadi error dan kerusakan akibat suhu berlebih. Fan dikendalikan oleh Raspberry Pi melalui rangkaian kendali kipas pada HAT.

8) *Driver Motor*: Bagian ini berupa dual H-bridge motor driver yang mampu digunakan untuk menggerakkan dua motor sekaligus. Dual H-bridge dibentuk dari empat pasang MOSFET yang terdiri atas empat MOSFET N-Channel IRF3205 dan empat MOSFET P-Channel IRF9540, yang secara teori mampu mengendalikan motor hingga 23 A, tetapi terbatas pada daya 50 W karena batasan fisik dari package TO220 [11]. Driver motor dilengkapi dengan optocoupler PC817 untuk mengisolasi Raspberry Pi dari motor untuk menghindari gangguan yang diakibatkan oleh Electromagnetical Interference (EMI) saat motor bekerja [12].

9) *Motor*: Dua buah motor digunakan untuk menggerakkan solar tracker: satu buah untuk gerakan sudut zenit dan satu buah untuk gerakan sudut azimuth. Pada motor untuk gerakan zenit, untuk meningkatkan torsi kerja motor, meningkatkan presisi gerak, dan mengurangi kecepatan motor, dipasang sebuah stiel drat/besi ulir sebagai wormgear. Pada motor untuk gerakan azimuth, dipasang sebuah gearbox dengan perbandingan kecepatan putar keluaran:masukan sebesar 1:6, dengan tujuan mengurangi kecepatan motor sehingga gerakan menjadi lebih presisi. Motor yang digunakan adalah motor dc brushed 12 V, 3 A, 70 rpm.

10) *Regulator*: Bagian ini digunakan untuk mengatur dan menstabilkan tegangan pada sistem. Kapasitor elektrolit dipasang untuk mengkompensasi drop tegangan baterai ketika

motor mulai bekerja. Untuk mengatur tegangan 5 V, digunakan *buck converter* dengan arus kerja normal 3 A dan mampu memberikan arus 5 A selama beberapa saat, seperti saat alat mulai bekerja. Sebuah rangkaian pengamanan *drop* tegangan diberikan untuk mencegah rusaknya Raspberry Pi karena *flicker* atau kedipan keluaran *solar charger* ketika baterai hampir dalam posisi *discharged*.

11) *Solar Charger*: *Solar charger* digunakan untuk mengatur daya panel surya agar aman digunakan untuk mengisi baterai, memutus pengisian baterai ketika baterai penuh, dan memutus arus keluaran bila baterai dalam kondisi *discharged*.

12) *Baterai*: Baterai berfungsi menyimpan energi listrik yang akan digunakan ketika malam hari dan diisi ketika siang hari. Dalam hal ini, baterai yang digunakan adalah aki 12 V 10 A. Baterai juga digunakan agar sistem mampu bekerja tanpa masukan daya listrik dari luar sistem.

13) *Sel Surya*: Bagian ini digunakan untuk mengisi baterai. Saat proses pengambilan data tegangan dan arus keluarannya dilakukan, hubungannya sel surya dari sistem dilepaskan.

III. HASIL

Makalah ini bertujuan membuat sistem *Solar Tracker* Berbasis Kamera Terintegrasi Raspberry Pi, meningkatkan akurasi arah *solar tracker* dengan mengaplikasikan sistem *Solar Tracker* Berbasis Kamera Terintegrasi Raspberry Pi, mengoptimalkan keluaran panel surya menggunakan *Solar Tracker* Berbasis Kamera Terintegrasi Raspberry Pi, dan untuk mengetahui perbandingan keluaran panel surya statis dan panel surya dengan *Solar Tracker* Berbasis Kamera Terintegrasi Raspberry Pi. Untuk mengetahui sistem ini sudah memenuhi tujuan tersebut atau belum, dilakukan beberapa pengujian kerja, yaitu pengujian kerja tiap komponen dan pengujian kerja menyeluruh.

Sebelum pengujian dilakukan, terlebih dahulu dilakukan realisasi desain sistem *Solar Tracker* Berbasis Kamera Terintegrasi Raspberry Pi. Desain rangka dan mekanik yang menjadi acuan tertuang pada Gbr. 1 sampai Gbr. 3. Berikut adalah hasil sistem *Solar Tracker* Berbasis Kamera Terintegrasi Raspberry Pi yang sudah dibuat.

A. Sistem Mekanik

Sistem mekanik *Solar Tracker* Berbasis Kamera Terintegrasi Raspberry Pi memiliki dua penggerak, yaitu penggerak gerakan sudut zenit dan penggerak gerakan sudut azimut. Penggerak gerakan sudut zenit berupa motor DC 12 V 100 rpm yang dihubungkan dengan *stahl drat* ukuran diameter 10 mm dan panjang 1.000 mm untuk menurunkan kecepatan sudut, memperhalus gerak, dan meningkatkan presisi arah. Penggerak gerakan azimut berupa motor DC 12 V 77 rpm yang dihubungkan pada *gearbox* 6:1 untuk mengurangi kecepatan sudut motor dan meningkatkan torsi motor. Sistem *Solar Tracker* Berbasis Kamera Terintegrasi Raspberry Pi ditopang oleh rangka utama yang didesain agar berat bertumpu pada titik tengah dan berada di bawah rangka. Agar mampu menahan berat sistem *Solar Tracker* Berbasis Kamera



Ket.:

A = Bracket panel surya

B = Motor zenit + *stahl drat*

C = Kotak panel kendali

Gbr. 5 Tampak depan *Solar Tracker* Berbasis Kamera Terintegrasi Raspberry Pi

Terintegrasi Raspberry Pi, rangka dibuat dari besi *hollow* 20 mm × 20 mm dengan tebal 1 mm. Rangka *bracket* panel surya dibuat dari besi *plat strip* 1 mm karena lebih ringan dari besi *hollow*, tetapi lebih kuat dari aluminium. Gbr. 5 memperlihatkan *Solar Tracker* Berbasis Kamera Terintegrasi Raspberry Pi tampak depan.

B. Sistem Elektronik

Sistem elektronik *Solar Tracker* Berbasis Kamera Terintegrasi Raspberry Pi terfokus pada kotak panel ukuran 70 cm × 40 cm. Modul kamera berada di luar panel, yaitu terdapat pada *bracket* panel surya yang dihubungkan dengan Raspberry Pi melalui kabel FFC 16 pin 15 mm. Motor dan *limit switch* juga berada di luar panel dan dihubungkan dengan sistem dalam panel menggunakan kabel tipe *head stereo* dengan lapisan *skerm* (*coaxial*). Kabel dengan lapisan *skerm* digunakan untuk mencegah interferensi elektromagnetik pada kabel kamera saat motor bekerja atau saat *limit switch* melakukan proses *switching*. Di dalam panel terdapat baterai yang dihubungkan dengan *solar charger*. *Solar charger* terhubung dengan panel surya yang diamankan dengan MCB 4 A. MCB juga berfungsi untuk memutus kontak antara panel surya dengan *solar charger* ketika akan dilakukan *maintenance*, seperti penggantian baterai atau untuk uji keluaran panel surya. Keluaran *solar charger* terhubung dengan rangkaian regulator yang akan mengatur keluaran untuk seluruh sistem: keluaran 12 V untuk kipas pendingin dan *driver* motor, sedangkan keluaran 5 V untuk Raspberry Pi dan rangkaian *limiter*.

C. Sistem Perangkat Lunak

Perangkat lunak dalam sistem *Solar Tracker* Berbasis Kamera Terintegrasi Raspberry Pi terdiri atas beberapa bagian, yaitu sistem operasi, Python dengan *library* Astral dan OpenCV, dan program yang akan dijalankan.

Sistem Operasi menggunakan Raspbian Jessie, sistem operasi berbasis kernel Linux yang didesain untuk bekerja pada Raspberry Pi versi 1, 2, maupun 3. Sementara itu, Python yang digunakan adalah Python versi 3.

Program yang dijalankan ditulis dalam bahasa pemrograman Python dan terdapat beberapa bagian program yang menjadi sorotan, yaitu deret perintah penggunaan Astral, deret perintah kamera, deret perintah pemroses waktu, deret perintah pengolahan gambar, deret perintah penerima masukan, dan deret perintah aktuasi keluaran.

Deret program penggunaan Astral diawali dengan melakukan *import library* Astral, dilanjutkan dengan memasukkan data koordinat lokasi dan zona waktu dalam variabel lokasi. Dari variabel lokasi dimasukkan ke dalam perintah pengolahan waktu matahari yang akan disimpan dalam variabel matahari.

Dalam deret perintah kamera, ditentukan kamera yang digunakan dan konfigurasi dari kamera tersebut. Dalam makalah ini, konfigurasi yang optimal untuk *Solar Tracker* Berbasis Kamera Terintegrasi Raspberry Pi adalah 0 untuk nilai ISO, eksposur otomatis, dan *frame rate* 15 fps. Kemudian, tangkapan berformat RAW dari kamera diubah dalam format *array* RGB dan dimasukkan ke dalam variabel *raw capture*.

Deret perintah pengolahan waktu berfungsi mengolah dan memasukkan nilai waktu ke dalam variabel-variabel yang akan digunakan selama sistem *Solar Tracker* Berbasis Kamera Terintegrasi Raspberry Pi bekerja, termasuk ekstraksi data waktu dari Astral. Waktu sistem yang akan diolah adalah waktu saat ini dalam jam dan dalam menit, sedangkan data waktu yang diambil dan diolah dari Astral adalah data waktu matahari terbit, tenggelam, dan juga tengah siang. Dari data tersebut dapat ditentukan waktu sistem mulai bekerja dan waktu sistem mulai masuk ke dalam mode siaga.

Deret perintah pengolahan gambar akan menghasilkan nilai koordinat titik paling terang beserta intensitas dan radiusnya, diawali dengan memutar gambar menggunakan metode transformasi geometrik agar tidak terjadi distorsi pada dimensi gambar hasil setelah dirotasi. Kemudian, dilakukan penggabungan intensitas R, G, dan B menggunakan metode pengubahan ke dalam skala abu-abu. Selanjutnya, dilakukan penapisan menggunakan *Gaussian blur* untuk menghilangkan *noise* dari gambar kamera. Dalam pengaplikasian tapis *Gaussian blur*, ketika nilai deviasi terlalu kecil, *noise* tidak akan tertapis. Namun, nilai deviasi yang terlalu besar akan mengacaukan hasil deteksi karena cahaya yang terdeteksi akan melebur dengan piksel di sekitarnya. Dalam makalah ini, menurut rujukan yang dijadikan sebagai referensi, tidak ada nilai pasti dalam memasukkan nilai deviasi *Gaussian blur* dan hal tersebut menyebabkan kekacauan pada ketepatan arah, kecuali nilainya diubah secara manual sesuai dengan kebutuhan. Dalam makalah ini ditemukan bahwa penyesuaian

nilai deviasi *Gaussian blur* dapat dilakukan secara otomatis. Ditemukan bahwa nilai deviasi yang dibutuhkan yaitu: maksimal sesuai dengan radius hasil deteksi, sedangkan minimal sama dengan radius *noise*. Dalam hal ini, radius ditentukan menggunakan metode perhitungan jari-jari dari *area contour* hasil *thresholding*. Karena nilai deviasi harus ganjil, nilai radius dikurangi 1 ketika bernilai genap. Ditemukan bahwa *noise* paling besar yang didapat dalam tangkapan kamera memiliki radius sebesar 5 piksel, sehingga nilai minimal deviasi *Gaussian blur* dibuat dengan nilai 7. Setelah ditapis menggunakan tapis *Gaussian blur*, akan diperhitungkan nilai koordinat dan nilai intensitas hasil deteksi menggunakan metode *minMaxLoc*, dengan data deteksi intensitas tertinggi dimasukkan ke dalam variabel *MaxLoc* untuk koordinat dan *MaxVal* untuk nilai intensitasnya.

Deret perintah masukan adalah sekumpulan perintah yang akan mengolah data dari tombol dan *limit switch*. Perintah ini diawali dengan inialisasi lokasi *pin* GPIO yang akan digunakan sebagai masukan dan tipe masukan yang akan digunakan. Lokasi tombol berada pada GPIO 17, *limit switch* 1 pada GPIO 8, *limit switch* 2 pada GPIO 7, *limit switch* 3 pada GPIO 12, *limit switch* 4 pada GPIO 16, dan tipe masukan semua masukan dibuat dalam mode *input Pull Up*, yaitu diaktifkan *internal resistor* menuju jalur *high* dan masukan dianggap aktif ketika diberi sinyal *Low* atau 0 V. kemudian, perintah dilanjutkan dengan penghentian gerakan motor ketika *limit switch* yang bersangkutan telah aktif, lalu pada tombol fungsi program utama akan tertahan selama tombol ditekan menggunakan perintah "*GPIO.wait_for_edge*" yang akan melanjutkan program ketika masukan sinyal *Low* berubah menjadi *High (rising)*, kemudian akan menghitung lama waktu tombol ditekan dan memanggil perintah sesuai dengan lama tombol yang ditekan.

Pada program aktuasi keluaran, digunakan data suhu, data waktu, dan data koordinat lokasi. Dilakukan inialisasi GPIO sebagai keluaran, yaitu GPIO 27 untuk kipas pendingin, GPIO 14 dan 15 untuk motor 1, serta GPIO 18 dan 23 untuk motor 2. Kipas akan dinyalakan ketika suhu prosesor Raspberry Pi mencapai 55 °C dan berhenti ketika suhu kurang dari 41 °C. Suhu prosesor yang terlalu tinggi menyebabkan Raspberry Pi mengalami penurunan kinerja (*throttling*) dan bila kinerja terlalu rendah, akan timbul titik-titik air yang dapat menyebabkan hubung singkat. Ketika koordinat deteksi berada di titik yang lokasi vertikalnya kurang dari 158, GPIO 14 akan mengeluarkan sinyal *High* dan motor 1 berputar *reverse*, panel akan bergerak naik, lalu berhenti ketika koordinat vertikalnya sudah mencapai titik antara 158-162 atau ketika *limit switch* 1 aktif. Ketika koordinat deteksi berada di titik yang lokasi vertikalnya lebih dari 162, GPIO 15 akan mengeluarkan sinyal *High* dan motor 1 berputar *forward*, panel akan bergerak turun, lalu berhenti ketika koordinat vertikalnya sudah mencapai titik antara 158-162 atau ketika *limit switch* 2 aktif. Ketika koordinat deteksi berada di titik yang lokasi horizontalnya lebih dari 123, GPIO 18 akan mengeluarkan sinyal *High* dan motor 2 berputar *forward*, panel akan bergerak ke kanan, lalu berhenti ketika koordinat

TABEL I
HASIL PENGUJIAN KETEPATAN ARAH DILIHAT DARI FISIK ARAH PANEL SURYA

No.	Kemiringan Lampu		Kemiringan Solar Tracker		Kesalahan	
	Zenit	Azimut	Zenit	Azimut	Zenit	Azimut
1	+90	+90	+80	+90	10 (11%)	0
2	+90	+45	+80	+45	10 (11%)	0
3	+90	0	+80	0	10 (11%)	0
4	+90	-45	+80	-45	10 (11%)	0
5	+90	-90	+80	-90	10 (11%)	0
6	+45	+90	+45	+90	0	0
7	+45	+45	+45	+45	0	0
8	+45	0	+45	0	0	0
9	+45	-45	+45	-45	0	0
10	+45	-90	+45	-90	0	0
11	0	0	0	0	0	0
12	-45	+90	-45	+90	0	0
13	-45	+45	-45	+45	0	0
14	-45	0	-45	0	0	0
15	-45	-45	-45	-45	0	0
16	-45	-90	-45	-90	0	0
17	-90	+90	-75	+90	15 (16%)	0
18	-90	+45	-75	+45	15 (16%)	0
29	-90	0	-75	0	15 (16%)	0
20	-90	-45	-75	-45	15 (16%)	0
21	-90	-90	-75	-90	15 (16%)	0

horizontalnya sudah mencapai titik antara 117-123 atau ketika *limit switch* 4 aktif. Ketika koordinat deteksi berada di titik yang lokasi horizontalnya kurang dari 117, GPIO 24 akan mengeluarkan sinyal *High* dan motor 2 berputar *reverse*, panel akan bergerak ke kiri, lalu berhenti ketika koordinat horizontalnya sudah mencapai titik antara 117-123 atau ketika *limit switch* 3 aktif.

D. Pengujian Ketepatan Arah

Pengujian ketepatan arah akan menghasilkan data akurasi sistem *Solar Tracker* Berbasis Kamera Terintegrasi Raspberry Pi yang sudah dibuat. Seluruh sistem perlu terpasang dengan benar dan bekerja dengan baik untuk bisa mengarahkan panel surya ke arah yang benar. Pengujian ini akan menentukan keberhasilan tujuan makalah ini, yaitu mampu meningkatkan akurasi arah *solar tracker* dengan mengaplikasikan sistem *Solar Tracker* Berbasis Kamera Terintegrasi Raspberry Pi. Terdapat dua cara pengujian ketepatan arah, yaitu pengujian fisik dilihat dari arah panel surya dan pengujian dilihat dari piksel tangkapan kamera. Hasil pengujian ketepatan arah dijelaskan sebagai berikut.

Pada Tabel I, ditemukan bahwa rata-rata kesalahan azimut adalah 0%, sedangkan rata-rata kesalahan arah zenit adalah 6,43%, dengan kesalahan tertinggi sebesar 16%. Sementara itu, pada Tabel II, tampak bahwa rata-rata kesalahan azimut yang terproyeksi dalam koordinat X kamera sebesar 2,6 piksel atau 2,16% dan rata-rata kesalahan arah zenit sebesar 30,67 piksel (17,35%), dengan kesalahan terbesar mencapai 89 piksel (55,6%). Terdapat perbedaan antara nilai ketepatan fisik dengan nilai ketepatan kamera karena kamera menggunakan lensa cembung dengan sudut lebar dan dilapisi

TABEL II
HASIL PENGUJIAN KETEPATAN ARAH DALAM PIKSEL KAMERA

No.	Kemiringan Lampu		Ketepatan Titik Piksel		Kesalahan	
	Zenit	Azimut	X	Y	X	Y
1	+90	+90	113	219	7 PX (5,8%)	39 PX (24,3%)
2	+90	+45	120	219	0 PX (0%)	39 PX (24,3%)
3	+90	0	117	219	3 PX (2,5%)	39 PX (24,3%)
4	+90	-45	117	219	3 PX (2,5%)	39 PX (24,3%)
5	+90	-90	117	219	3 PX (2,5%)	39 PX (24,3%)
6	+45	+90	119	159	1 PX (0,8%)	1 PX (0,6%)
7	+45	+45	119	159	1 PX (0,8%)	1 PX (0,6%)
8	+45	0	122	161	2 PX (1,7%)	1 PX (0,6%)
9	+45	-45	123	162	3 PX (2,5%)	2 PX (1,25%)
10	+45	-90	123	162	3 PX (2,5%)	2 PX (1,25%)
11	0	0	121	161	1 PX (0,8%)	1 PX (0,6%)
12	-45	+90	123	160	3 PX (2,5%)	0 PX (0%)
13	-45	+45	123	160	3 PX (2,5%)	0 PX (0%)
14	-45	0	123	160	3 PX (2,5%)	0 PX (0%)
15	-45	-45	123	160	3 PX (2,5%)	0 PX (0%)
16	-45	-90	123	160	3 PX (2,5%)	0 PX (0%)
17	-90	+90	121	71	1 PX (0,8%)	89 PX (55,6%)
18	-90	+45	123	72	3 PX (2,5%)	88 PX (55%)
29	-90	0	123	72	3 PX (2,5%)	88 PX (55%)
20	-90	-45	123	72	3 PX (2,5%)	88 PX (55%)
21	-90	-90	123	72	3 PX (2,5%)	88 PX (55%)

kembali dengan filter datar, yang mengakibatkan distorsi, sehingga piksel pada bagian tengah memiliki jarak fisik lebih sedikit dibandingkan piksel bagian tepi. Dengan jarak fisik bagian tengah lebih sedikit, maka akurasi arah fisik lebih tinggi, dengan kesalahan 2,5% pembacaan piksel pada bagian tengah akan sama dengan 0% pada arah fisik. Kesalahan terbesar terjadi pada pengujian sudut zenit $\pm 90^\circ$. Hal ini dikarenakan terdapat pembatas (*limiter*) gerakan yang mencegah arah zenit mencapai 90° karena akan terjadi kerusakan pada kabel, rangka, dan motor jika arah zenit mencapai 90° akibat terbatasnya konstruksi mekanik dari *Solar Tracker* Berbasis Kamera Terintegrasi Raspberry Pi.

TABEL III
HASIL PENGUJIAN KELUARAN PANEL SURYA

Waktu	Solar Tracker					Panel Diam					Ket
	Open	Short	Berbeban		Lux	Open	Short	Berbeban		Lux	
			V	I				V	I		
Sabtu, 28 September 2019											
Terbit	9,95 V	0,1 A	53 mV	0,1 A	560	9,00 V	0,1 A	50 mV	0,1 A	500	05.24
06.00	19,73 V	0,4 A	7,83 V	0,2 A	> 3.000	18,00 V	0,1 A	0,50 V	0,1 A	2550	
07.00	20,38 V	1,4 A	19,60 V	0,6 A	> 3.000	19,80 V	0,2 A	13,20 V	0,5 A	> 3.000	
08.00	20,38 V	1,7 A	19,60 V	0,6 A	> 3.000	20,11 V	1,0 A	19,36 V	0,3 A	> 3.000	
09.00	20,11 V	2,0 A	19,55 V	0,8 A	> 3.000	19,88 V	1,6 A	19,42 V	0,5 A	> 3.000	
10.00	19,90 V	2,2 A	19,40 V	0,4 A	> 3.000	19,48 V	2,0 A	19,07 V	0,4 A	> 3.000	
11.00	19,78 V	2,5 A	19,25 V	0,4 A	> 3.000	19,50 V	2,4 A	19,00 V	0,5 A	> 3.000	
12.00	19,30 V	1,9 A	18,14 V	0,5 A	> 3.000	19,30 V	1,9 A	18,03 V	0,5 A	> 3.000	
13.00	19,82 V	2,6 A	19,44 V	0,5 A	> 3.000	19,54 V	2,3 A	19,10 V	0,5 A	> 3.000	
14.00	20,28 V	2,1 A	19,50 V	0,4 A	> 3.000	19,75 V	1,2 A	19,10 V	0,4 A	> 3.000	
15.00	20,26 V	1,4 A	19,56 V	0,5 A	> 3.000	19,90 V	0,8 A	19,25 V	0,4 A	> 3.000	
16.00	19,89 V	0,8 A	19,01 V	0,5 A	> 3.000	19,46 V	0,5 A	17,16 V	0,4 A	> 3.000	
17.00	18,35 V	0,2 A	1,70 V	0,1 A	> 3.000	18,03 V	0,1 A	1,22 V	0,1 A	> 3.000	
Terbenam	15,46 V	0,1 A	101 mV	0,1 A	630	14,05 V	0,1 A	28 mV	0,1 A	400	17.34
Minggu, 29 September 2019											
Terbit	16,18 V	0,1 A	72,5 mV	0,1 A	460	15,48 V	0,1 A	48,7 mV	0,1 A	310	05.24
06.00	19,78 V	0,5 A	12,30 V	0,5 A	> 3.000	19,20 V	0,1 A	4,01 V	0,1 A	> 3.000	
07.00	20,19 V	0,9 A	19,80 V	0,3 A	> 3.000	19,69 V	0,4 A	16,00 V	0,4 A	> 3.000	
08.00	20,00 V	2,1 A	19,50 V	0,5 A	> 3.000	19,95 V	1,2 A	19,14 V	0,5 A	> 3.000	
09.00	20,00 V	2,0 A	19,55 V	0,5 A	> 3.000	19,78 V	1,6 A	19,22 V	0,5 A	> 3.000	
10.00	19,62 V	2,5 A	19,20 V	0,6 A	> 3.000	19,42 V	2,0 A	19,00 V	0,5 A	> 3.000	
11.00	20,18 V	2,4 A	19,69 V	0,5 A	> 3.000	19,65 V	2,3 A	19,27 V	0,5 A	> 3.000	
12.00	19,88 V	2,3 A	19,46 V	0,4 A	> 3.000	19,35 V	2,2 A	18,88 V	0,3 A	> 3.000	
13.00	20,00 V	2,3 A	19,46 V	0,5 A	> 3.000	19,53 V	2,1 A	19,10 V	0,5 A	> 3.000	
14.00	20,15 V	2,1 A	19,60 V	0,5 A	> 3.000	19,55 V	1,8 A	19,15 V	0,5 A	> 3.000	
15.00	20,16 V	1,8 A	19,60 V	0,5 A	> 3.000	19,79 V	1,3 A	19,12 V	0,5 A	> 3.000	
16.00	20,15 V	1,2 A	19,33 V	0,5 A	> 3.000	19,50 V	0,5 A	17,86 V	0,5 A	> 3.000	
17.00	18,25 V	0,2 A	1,31 V	0,2 A	2.950	17,82 V	0,1 A	0,94 V	0,1 A	2.700	
Terbenam	12,55 V	0,0 A	11 mV	0,0 A	125	12,80 V	0,0 A	14,3 mV	0,0 A	150	17.34
Minggu, 30 September 2019											
Terbit	16,35 V	0,1 A	75 mV	0,0 A	800	13,95 V	0,1 A	26 mV	0,0 A	250	05.24
06.00	20,67 V	1,0 A	19,92 V	0,5 A	> 3.000	18,72 V	0,2 A	1,30 V	0,1 A	2.900	
07.00	20,50 V	1,6 A	19,92 V	0,5 A	> 3.000	20,08 V	0,6 A	18,40 V	0,4 A	> 3.000	
08.00	19,90 V	2,2 A	19,30 V	0,5 A	> 3.000	19,97 V	1,2 A	19,20 V	0,4 A	> 3.000	
09.00	19,71 V	2,4 A	19,28 V	0,5 A	> 3.000	19,69 V	1,8 A	19,13 V	0,5 A	> 3.000	
10.00	19,73 V	2,4 A	19,21 V	0,5 A	> 3.000	19,48 V	2,1 A	19,00 V	0,5 A	> 3.000	
11.00	19,75 V	2,3 A	19,14 V	0,4 A	> 3.000	19,28 V	2,3 A	18,85 V	0,4 A	> 3.000	
12.00	19,61 V	2,6 A	19,19 V	0,5 A	> 3.000	19,31 V	2,4 A	18,87 V	0,5 A	> 3.000	
13.00	19,68 V	2,1 A	19,16 V	0,4 A	> 3.000	19,23 V	1,9 A	18,87 V	0,4 A	> 3.000	
14.00	19,60 V	2,4 A	19,08 V	0,5 A	> 3.000	19,19 V	1,9 A	18,87 V	0,4 A	> 3.000	
15.00	20,05 V	2,1 A	19,65 V	0,5 A	> 3.000	19,71 V	1,2 A	18,95 V	0,5 A	> 3.000	
16.00	20,28 V	1,3 A	19,53 V	0,5 A	> 3.000	19,46 V	0,6 A	17,60 V	0,5 A	> 3.000	
17.00	18,80 V	0,1 A	3,40 V	0,1 A	> 3.000	18,05 V	0,1 A	1,40 V	0,1 A	2.550	
Terbenam	11,40 V	0,1 A	8 mV	0,0 A	80	11,27 V	0,1 A	9,6 mV	0,0 A	130	17.34

E. Pengujian Keluaran Panel Surya

Pengujian keluaran panel surya dilakukan dalam tiga hari. Sampel diambil tiap jam dari matahari terbit hingga matahari terbenam. Data pengujian ini menentukan penelitian ini sudah mampu mengoptimalkan keluaran panel surya menggunakan Solar Tracker Berbasis Kamera Terintegrasi Raspberry Pi atau belum, dengan cara membandingkan keluaran panel surya statis dan panel surya dengan Solar Tracker Berbasis

Kamera Terintegrasi Raspberry Pi. Pengujian ini memiliki beberapa parameter, yaitu pengujian tegangan tanpa beban, pengujian arus hubung singkat, serta pengujian tegangan dan arus dengan beban lampu pijar 5 W, 12 V. Data hasil pengujian keluaran panel surya ditunjukkan pada Tabel III.

Analisis data keluaran panel surya dilakukan menggunakan perangkat lunak IBM SPSS versi 22. Setelah memasukkan data pengujian, perlu dihitung daya keluaran masing masing pengujian, yaitu daya keluaran panel surya dengan solar

TABEL IV
HASIL PERHITUNGAN DAYA KELUARAN PANEL SURYA

Waktu	Solar Tracker		Tanpa Tracker	
	Daya Tanpa Beban (W)	Daya Berbeban (W)	Daya Tanpa Beban (W)	Daya Berbeban (W)
SAB 05:24	1,00	0,01	0,90	0,01
SAB 06:00	1,97	1,57	1,80	,05
SAB 07:00	34,65	11,76	3,96	6,60
SAB 08:00	34,65	11,76	20,11	5,81
SAB 09:00	40,22	15,64	3,81	9,71
SAB 10:00	55,72	7,76	38,96	7,63
SAB 11:00	49,45	7,70	46,80	9,50
SAB 12:00	36,67	9,07	36,67	9,02
SAB 13:00	49,55	9,72	44,94	9,55
SAB 14:00	42,59	7,86	23,70	7,64
SAB 15:00	28,36	9,78	15,92	7,70
SAB 16:00	15,91	9,51	9,73	6,86
SAB 17:00	3,67	0,17	1,80	0,12
SAB 17:34	1,55	0,01	1,51	0,00
MIN 05:24	1,62	0,01	1,54	0,00
MIN 06:00	9,89	6,15	1,92	0,40
MIN 07:00	18,17	5,75	7,88	6,40
MIN 08:00	42,00	9,75	23,94	9,57
MIN 09:00	40,00	9,78	31,65	9,61
MIN 10:00	49,05	11,52	38,84	9,50
MIN 11:00	48,43	9,85	45,19	9,64
MIN 12:00	45,72	7,78	42,57	5,66
MIN 13:00	46,00	9,73	41,01	9,55
MIN 14:00	42,32	9,80	35,19	9,58
MIN 15:00	36,29	9,80	25,73	9,56
MIN 16:00	24,18	9,67	9,75	7,14
MIN 17:00	3,65	0,26	1,78	0,09
MIN 17:34	0,00	0,00	0,00	0,00
SEN 05:24	1,64	0,00	1,40	0,00
SEN 06:00	20,67	9,85	3,74	0,13
SEN 07:00	32,80	9,96	12,05	7,36
SEN 08:00	43,78	9,65	23,96	7,68
SEN 09:00	47,30	9,64	35,44	9,57
SEN 10:00	47,35	9,61	40,91	9,50
SEN 11:00	47,40	7,66	44,34	7,54
SEN 12:00	50,99	9,58	46,34	9,44
SEN 13:00	41,33	7,66	36,54	7,55
SEN 14:00	47,04	9,54	36,46	9,37
SEN 15:00	42,11	9,83	23,65	9,48
SEN 16:00	26,36	9,77	11,68	8,80
SEN 17:00	1,88	0,34	1,81	0,14
SEN 17:34	1,14	0,00	1,13	0,00

tracker tanpa beban dan berbeban serta daya keluaran panel surya tanpa solar tracker tanpa beban dan berbeban. Data variabel daya setelah dikomputasi menggunakan perangkat lunak SPSS adalah seperti disajikan dalam Tabel IV.

Dari data pada Tabel IV diketahui bahwa perbandingan rerata daya keluaran antara panel surya diam dengan panel surya yang terpasang pada Solar Tracker Berbasis Kamera

Terintegrasi Raspberry Pi untuk pengujian tanpa beban adalah 1:1,389 atau 21,5487 W:29,8822 W, sedangkan untuk pengujian dengan beban lampu pijar 12 V/5 W adalah 1:1,2042 atau 6,0344 W:7,2671 W.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan pembahasan, dapat diambil kesimpulan bahwa untuk meniadakan noise pada data gambar tangkapan kamera, diaplikasikan tapis Gaussian blur dengan pemilihan nilai deviasi otomatis. Solar Tracker Berbasis Kamera Terintegrasi Raspberry Pi dapat berfungsi dengan baik, dibuktikan dengan hasil pengujian. Akurasi arah Solar Tracker Berbasis Kamera Terintegrasi Raspberry Pi sudah optimal, dibuktikan dengan pengujian ketepatan arah. Selain itu, keluaran panel surya terbukti dapat ditingkatkan secara signifikan dengan diaplikasikannya Solar Tracker Berbasis Kamera Terintegrasi Raspberry Pi, dibuktikan dengan data pengujian keluaran dan terdapat peningkatan signifikan secara statistik pada uji komparasi. Selanjutnya, perbandingan daya keluaran antara panel surya diam dengan panel surya yang terpasang pada Solar Tracker Berbasis Kamera Terintegrasi Raspberry Pi adalah 1:1,389 (21,5487 W:29,8822W) untuk pengujian tanpa beban dan 1:1,2042 (6,0344 W:7,2671W) untuk pengujian dengan beban lampu pijar 12 V/5 W.

REFERENSI

- [1] C. Philibert, *Solar Energy Perspective*, Paris: International Energy Agency, 2011.
- [2] Z. El Kadmiri, O. El Kadmiri, L. Masmoudi, dan M.N. Bargach, "A Novel Solar Tracker Based on Omnidirectional Computer Vision," *Journal of Solar Energy*, Vol. 2015, hal. 1-6, 2015.
- [3] T. Tudorache dan L. Kreindler, "Design of a Solar Tracker System for PV Power Plants," *Acta Polytechnica Hungarica*, Vol. 7, No. 1, hal. 23-39, 2015.
- [4] K. Azizi dan A. Ghaffari, "Design and Manufacturing of a High-Precision Sun Tracking System Based on Image Processing," *International Journal of Photoenergy*, Vol. 2013, hal. 1-7, 2013.
- [5] (2020) Raspberry Pi Foundation, [Online], <https://www.raspberrypi.org/>, tanggal akses 2-jan-2021.
- [6] Sugiyono, *Metode Penelitian Kuantitatif Kualitatif dan R&D*, Bandung, Indonesia: Alfabeta, 2017.
- [7] M.K. Iqbal, T. Islam, M. Chowdhury, dan A. Imteaj, "Construction of Single Axis Automatic Solar Tracking System," *International Journal of u- and e- Service, Science and Technology*, Vol. 8, No. 1, hal. 389-400, 2015.
- [8] P.M. Kannan, Raja TE, dan R. Gowtham, "Real-time Solar Energy Optimization Systems," *Open Access Scientific Reports*, Vol 2, No. 4, hal. 712-714, 2013.
- [9] W. Purwanto, "Rancang Bangun Penggerak Panel Surya Dual Axis Berbasis Mikrokontroler Atmega 328," Skripsi, Universitas Negeri Semarang, Semarang, Indonesia, 2017.
- [10] J.-M. Wang dan C.-L. Lu, "Design and Implementation of a Sun Tracker with a Dual-Axis Single Motor for an Optical Sensor-Based Photovoltaic System," *Sensors*, Vol. 13, No. 3, pp. 3157-3168, 2013.
- [11] "IRF3205 datasheet," International Rectifier, California, USA.
- [12] "IRF9540N datasheet," International Rectifier, California, USA.