

Design and Construction of 100 WP Capacity Tracker Solar Panel using VDI 2206 Method

Article History:

Received
13 February 2025
Revised
15 March 2025
Accepted
12 June 2025

HERMAN BUDI HARJA¹, MOHAMMAD YAZID DIRATAMA², FITRIA SURYATINI³ MUHAMMAD FATURROHMAN⁴, PRADIKA NOVIANDANI⁵

^{1,2,4,5}Teknik Manufaktur, Politeknik Manufaktur Bandung), Indonesia

³Teknik Otomasi Manufaktur dan Mekatronika Politeknik Manufaktur Bandung, Indonesia

Email: hermanbuharj@gmail.com

ABSTRAK

Terdapat permasalahan utama dalam optimasi konversi energi panel surya antara lain, yaitu pergerakan posisi matahari dan kemampuan terbaik tangkapan panel surya yang harus tegak lurus terhadap sinar matahari. Tujuan penelitian ini difokuskan untuk melakukan kajian rancang bangun sistem penjejak panel surya dan secara khusus untuk memperoleh nilai efektivitas sistem penjejaknya. Metode VDI 2206 digunakan dalam perancangan yang mengintegrasikan tiga sistem utama yaitu mekanik, elektronik, dan teknologi informasi. Berdasarkan hasil pengujian diperoleh kinerja daya panel surya tracker meningkat sebesar 48,38%. Dengan kebutuhan daya sistem tracking sebesar 5,51%, maka persentase peningkatan perolehan energi solar panel tracker netto adalah sebesar 40,2 % terhadap solar panel statis, oleh karena itu penggunaan perangkat solar panel tracker lebih efektif dan efisien dibanding solar panel statis.

Kata kunci: *daya sistem, efektivitas, solar panel, sistem penjejak, VDI 2206*

ABSTRACT

There are main issues in optimizing the energy conversion of solar panels, including (1) the movement of the sun's position and (ii) the best capability of solar panels to capture sunlight, which must be perpendicular to the sun's rays. The objective of this research is to conduct a study into the design and development of a solar panel tracking system, specifically to obtain the effectiveness value of the tracking system. The VDI 2206 method is used in the design, which integrates three main systems: mechanical, electronic, and information technology. Based on the test results, the performance of the solar panel tracker increased by 48.38%. With a tracking system power requirement of 5.51%, the percentage increase in the net energy gain of the tracker solar panel is 40.2% compared to static solar panels. Therefore, solar panel systems equipped with tracking devices are more effective and efficient compared to static solar panels.

Keyword: *effectiveness, power system, solar panel, tracking system, VDI 2206*

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license



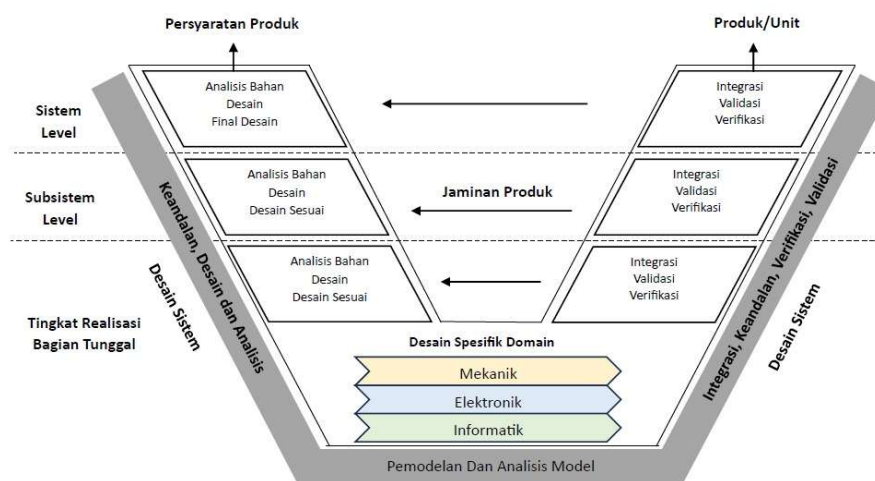
1. PENDAHULUAN

Semakin meningkatnya penggunaan energi fosil akan memberi dampak negatif terhadap lingkungan saat ini dan masa yang akan datang. Hal ini memerlukan adanya solusi ramah lingkungan untuk menanggulangi permasalahan kebutuhan energi. Sumber Energi Baru Terbarukan (EBT) menjadi solusi alternatif untuk dimanfaatkan dalam menanggulangi ketersediaan energi di kemudian hari. Ketersediaan EBT berkelanjutan dengan biaya yang ekonomis menjadikan energi tersebut berdampak baik bagi kehidupan (**Saputra, 2022**). Upaya bauran energi atau bahkan peralihan dari energi fosil menjadi EBT harus mempertimbangkan potensi ketersediaan jenis EBT yang ada di sekitar kita, sehingga peralihan energi menjadi lebih efektif dan efisien. Indonesia memiliki potensi EBT besar dengan ketersediaan melimpah, karena secara geografis strategis berada pada garis khatulistiwa. Indonesia memiliki total potensi EBT mencapai 3.686 GW yang bersumber dari tenaga surya, angin, hidro, panas bumi, bio-energi dan energi laut. Besaran ketersediaan energi terbarukan berupa tenaga air sebesar 95 GW, panas bumi 24 GW, bio-energi 57 GW, surya 3.295 GW, angin 155 GW, energi laut 60 GW (**EBTK, 2023**). Ramli menyatakan potensi energi rata-rata radiasi matahari di Indonesia dapat membangkitkan energi listrik sebesar 1000 W/m² saat tengah hari yang cerah (**Ramli, 2022**). Berdasarkan kajian tersebut energi matahari merupakan salah satu sumber energi efektif berkelanjutan, oleh karena itu kajian optimasi pemanfaatan panel surya perlu dilakukan agar diperoleh efisiensi konversi energi tertinggi.

Terdapat dua kendala utama dalam penggunaan panel surya sebagai perangkat yang dapat mengubah energi matahari menjadi energi listrik, yaitu (i) posisi sumber energi matahari selalu berubah pada pagi hingga sore hari, dan (ii) kinerja tangkapan panel surya terbaik adalah ketika posisinya berada tegak lurus menghadap arah datangnya matahari atau sudut antara bidang horizontal dan garis ke matahari membentuk sudut 90° (**Duffie, 2020**). Salah satu upaya untuk memaksimalkan kinerja dari panel surya tersebut adalah dengan melengkapi sebuah sistem yang mampu menjejak pergerakan matahari. Pergerakan dari sistem penjejak matahari atau *solar tracker* dapat diidentifikasi menggunakan perhitungan gerak matahari berdasarkan pengukuran titik koordinat lokasi (**Al Isbilly, 2019**) maupun data masukan dari *sensing element* berupa *Light Dependent Resistance* (LDR) (**Larico, 2022**) (**Fuentes, dkk, 2020**). Mengacu pada dua kendala tersebut, maka terdapat beberapa rumusan masalah yang menjadi dasar pada penelitian ini, yaitu (i) bagaimana menghasilkan solar panel yang dilengkapi fungsi penjejak pergerakan sinar matahari, dan (ii) bagaimana mengukur kinerja sistem serta memetakan konsumsi daya sistem penjejak dan persentase peningkatan perolehan energi bersih yang dihasilkan *solar panel tracker*. Berdasarkan kajian terhadap beberapa penelitian mengenai peningkatan kinerja panel surya menggunakan sistem penjejak matahari telah banyak dikembangkan di beberapa lingkup. Penelitian-penelitian sebelumnya memiliki kecenderungan berfokus pada pembahasan *fix solar panel*, *solar panel tracker* dan perbandingan kinerjanya (**Ramli, 2022**) (**Fuentes, dkk, 2020**) (**Larico, 2022**) (**Santoso, 2014**) (**Lawles, 2018**). Kajian pada penelitian ini dilakukan mulai dari penentuan konstruksi penjejak serta pengendaliannya, hingga pengukuran konsumsi daya sistem penjejaknya. Secara khusus tujuan penelitian ini adalah memperoleh nilai persentase konsumsi daya sistem penjejak dan efektivitas penggunaan sistem penjejak panel surya. Kontribusi dari penelitian ini adalah memetakan persentase kebutuhan daya sistem penjejak dan persentase peningkatan perolehan daya netto pada *solar panel tracker*. Penelitian ini menggunakan pendekatan perancangan VDI 2206 karena lingkup perancangan pada pendekatan ini sesuai kebutuhan perangkat yang terdiri dari sistem mekanik, elektronik, dan teknologi informasi.

2. METODE RANCANG BANGUN PANEL SURYA

Perangkat *solar panel tracker* dirancang dengan mengintegrasikan tiga sistem utama yaitu mekanik, elektronik, dan teknologi informasi. Perangkat membutuhkan konstruksi sistem mekanik yang menghasilkan perangkat keras yang sesuai dengan kebutuhan, baik dari sisi desain, ukuran dan penempatan komponen-komponen. Selain itu sistem elektronik ini juga membutuhkan adanya teknologi informasi berupa perangkat lunak yang berisi perintah yang akan diproses oleh kontroler dan perangkat lunak antarmuka pengguna (*user interface*) sebagai alat berinteraksi antara pengguna (*user*) dengan kontroler. Perancangan pada penelitian ini dibutuhkan suatu metode yang dapat melakukan integrasi dan kombinasi terhadap ketiga sistem tersebut. Pada Gambar 1 ditampilkan model perancangan VDI 2206 yang menjadi pedoman dalam mengintegrasikan ketiga kombinasi utama (mekanik, elektronik dan teknologi informasi) menjadi satu kesatuan (**Graessler, 2020**). Metode ini merupakan pedoman dalam perancangan sistem mekatronika yang terdiri dari lima prosedur ,yaitu (i)menjelaskan tugas dan fungsi dari sistem yang digunakan (*Requirements*), (ii)menjelaskan konsep awal gambaran sistem secara umum (*System Design*), (iii)pemilihan berbagai komponen yang akan digunakan pada sistem (*Domain Specific Design*), (iv)melakukan integrasi berbagai komponen dari domain *specific design* (*Modelling and Model Analysis and System Integration*), (v)produk adalah hasil dari implementasi sistem yang telah terintegrasi (*Assurance of Properties*).



Gambar 1. V-Model Perancangan VDI 2206 (Graessler, 2020)

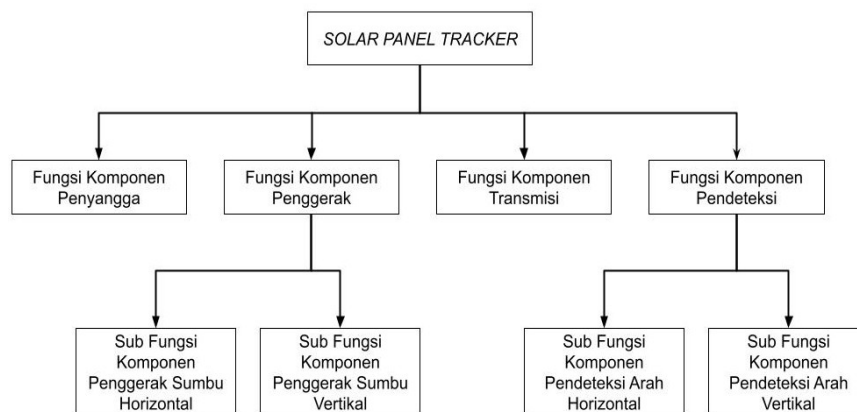
2.1. Kriteria Produk

Pada tahap ini ditentukan sejumlah kriteria penilaian sistem *solar panel tracker* yang bertujuan mempermudah dalam proses desain sistem sehingga hasil perancangan mempertimbangkan aspek keberfungsian, keterbuatan maupun keekonomisan. Berdasarkan hasil kajian diperoleh 5 aspek *product requirements* sistem *solar panel tracker*, yaitu aspek sistem mekanik, aspek sistem elektronik, aspek sistem teknologi informasi, dan aspek sistem proses. (i) aspek sistem mekanik pada *solar panel tracker* yang akan dibuat harus dapat mengarahkan panel surya dengan menggunakan tipe *tracker* dua sumbu kebebasan dan berpenggerak motor DC, besar sudut gerak sumbu elevasi sebesar 45° dan sumbu azimuth sebesar 180° , proses yang mudah dalam pembuatan dan perakitan, konstruksi yang sederhana, ringan dan kuat; (ii) aspek sistem elektronik pada *solar panel tracker* yang akan dibuat harus memiliki komponen elektronik sederhana dan mudah ditemukan di pasaran, mudah dalam instalasi, berbentuk modular, serta efektif dan efisiensi dalam penggunaannya; (iii) aspek teknologi informasi pada

solar panel tracker harus memiliki algoritma program yang mudah dipahami, mudah digunakan, serta memberi respon pada layar tampilan; (iv) aspek fungsi pada *solar panel tracker* harus memiliki sistem yang dapat mengendalikan posisi panel surya dan menampilkan indikator proses pada layar tampilan; dan (v) aspek proses pada *solar panel tracker* harus memiliki sistem yang dapat bekerja dalam mode manual dan otomatis, serta pembacaan data perubahan posisi matahari oleh sensor LDR, pergerakan panel surya oleh aktuator motor DC, dan penampilan indikator sistem pada layar LCD. Pada tahapan perancangan, 5 aspek *product requirements* dijadikan dasar pertimbangan untuk penilaian teknis dan penilaian ekonomis dalam proses penyeleksian desain *solar panel tracker* beserta sistemnya.

2.2. Perancangan Mekanik dan Elektrik

Solar panel tracker dirancang untuk mengoptimalkan efisiensi dan kinerja panel surya dengan melacak pergerakan matahari sepanjang hari. Perangkat ini terdiri dari sistem mekanik, elektronik dan teknologi informasi yang memungkinkannya untuk mengarahkan panel surya agar selalu menghadap ke arah matahari secara otomatis. Perangkat mekanik dirancang memiliki beberapa fungsi seperti fungsi penyangga, penggerak, transmisi, dan pendeteksi. Kontruksi mekanik perangkat *solar panel tracker* dengan tipe *dual axis* mampu melakukan pergerakan dengan dua sumbu kebebasan untuk menjejak pergerakan matahari berdasarkan sudut elevasi dan azimuth (**Susanto, dkk, 2021**). Diagram fungsi perangkat *solar panel tracker* ditunjukkan pada Gambar 2. Pada penelitian ini mempertimbangkan beberapa alternatif pilihan untuk setiap bagian fungsi maupun sub fungsi.



Gambar 2. Diagram Fungsi Perangkat *Solar Panel Tracker*

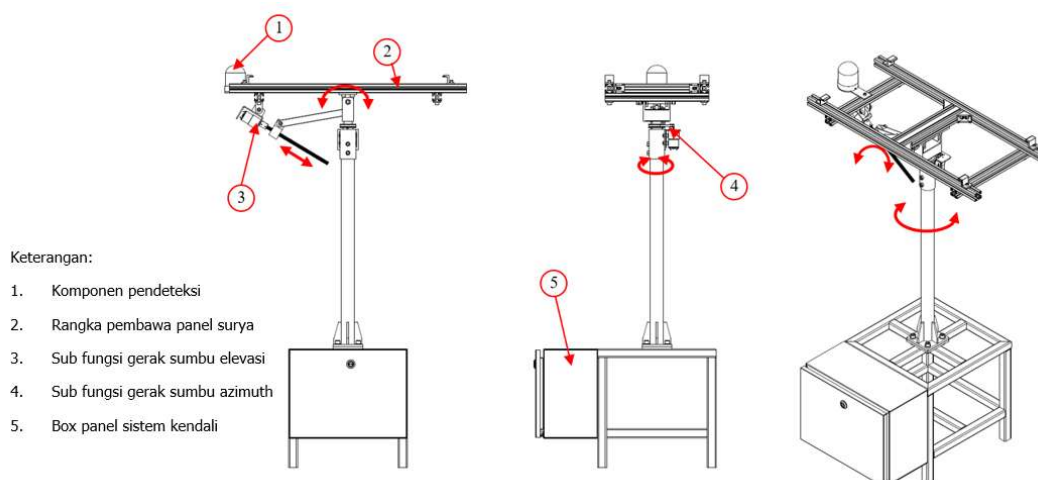
Tabel 1. Kotak Morfologi Pemilihan AFK

Fungsi atau Sub fungsi Bagian		Alternatif Fungsi Bagian		
		Alternatif 1	Alternatif 2	Alternatif 3
A	Fungsi penyangga (kontruksi)	A1	A2	
B	Fungsi penggerak			
	Sudut Elevasi	B1	B2	B3
	Sudut Azimuth	B1	B2	B3
C1	Fungsi transmisi rotasi			
	Sudut Elevasi	C1.1	C1.2	C1.3
	Sudut Azimuth	C1.1	C1.2	C1.3
C2	Fungsi transmisi translasi			
	Sudut Elevasi	C2.1	C2.2	C2.3
	Sudut Azimuth	C2.1	C2.2	C2.3
D	Fungsi pendeteksi	D1	D2	
	Alternatif Fungsi Kombinasi	AFK1	AFK2	

Pada Tabel 1 ditampilkan kotak morfologi pemilihan Alternatif Fungsi Kombinasi (AFK) yang merupakan hasil pemilihan alternatif fungsi dan dihasilkan 2 AFK. AFK1 adalah A1-B3-C1.3-C2.1-D1 dan AFK2 adalah A2-B3-C1.3-C2.1-D1. Setiap AFK diberi penilaian berdasarkan aspek teknis dan ekonomi dengan rentang nilai 1 sampai dengan 4, dimana semakin besar nilainya menunjukkan semakin baik. Pada Tabel 2 ditampilkan Penilaian aspek teknis dan aspek ekonomi. Berdasarkan hasil penilaian diperoleh AFK2 sebagai alternatif terpilih dengan nilai 300 untuk kriteria aspek teknis walaupun nilai yang sama dengan AFK1 yaitu sebesar 305 untuk aspek ekonomis. Sehingga hasil penilaian desain diperoleh rancangan konstruksi mekanik *solar panel tracker* AFK2 sistem yang terpilih dan ditampilkan pada Gambar 3.

Tabel 2. Penilaian Aspek Teknis dan Aspek Ekonomis

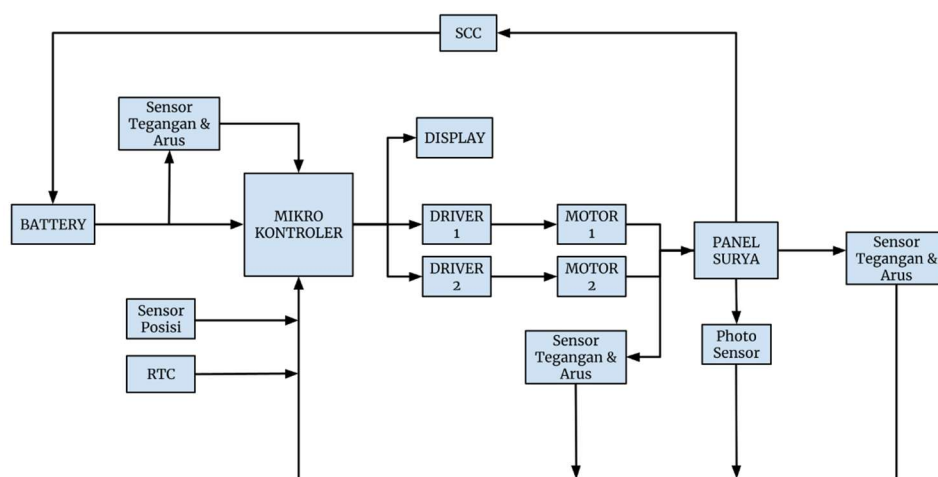
Kriteria Penilaian	BOBOT (%)	AFK1		AFK2		Nilai Optimal
Penilaian aspek teknis						
Pencapaian fungsi	30	4	120	4	120	120
Konstruksi rancangan	20	4	80	2	40	80
Berat rancangan	20	1	20	3	60	80
Kemudahan pembuatan	10	2	20	3	30	40
Kemudahan perakitan	10	4	40	4	40	40
Kemudahan perawatan	10	1	10	1	10	40
Nilai	100	16	290	17	300	400
Persentase		73%		75%		
Penilaian aspek ekonomis						
Biaya pembuatan	45	3	135	3	135	180
Biaya perawatan	30	4	120	4	120	120
Penggunaan komponen standar	25	2	50		50	
Nilai	100	9	305	9	305	400
Persentase		76%		76%		



Gambar 3. Rancangan *Solar Panel Tracker* Terpilih

Bagian sistem kendali perangkat *solar panel tracker* terdiri dari komponen input, pemroses, dan output. Komponen input berfungsi sebagai komponen pendeteksi lingkungan sehingga data tersebut digunakan sistem dalam mengambil keputusan. Komponen input terdiri dari tiga item yaitu sensor LDR sebagai pendeteksi perubahan intensitas cahaya matahari, sensor INA219 sebagai pembaca besaran listrik, dan sensor RTC DS3231 sebagai pembaca waktu.

Komponen pemroses berupa Arduino Mega sebagai komponen yang bertanggung jawab untuk memproses informasi dari sensor dan menginstruksikan aktuator motor DC untuk menggerakkan sistem mekanik (**Elektronika, 2017**). Komponen output berfungsi sebagai penggerak atau pengontrol suatu mekanisme tertentu, selain itu juga berfungsi sebagai komponen yang menampilkan visual sistem. Komponen output perangkat *solar panel tracker* adalah berupa aktuator motor DC penggerak utama aksis, dan aktuator *interface* (**Wendryanto, dkk, 2019**). Keseluruhan perangkat menggunakan *supply* tegangan yang berasal dari pengisian baterai oleh panel surya dengan prinsip *photovoltaic* (**Tiyas, 2020**). Diagram blok rancangan sistem kendali *solar panel tracker* ditunjukkan pada Gambar 4.



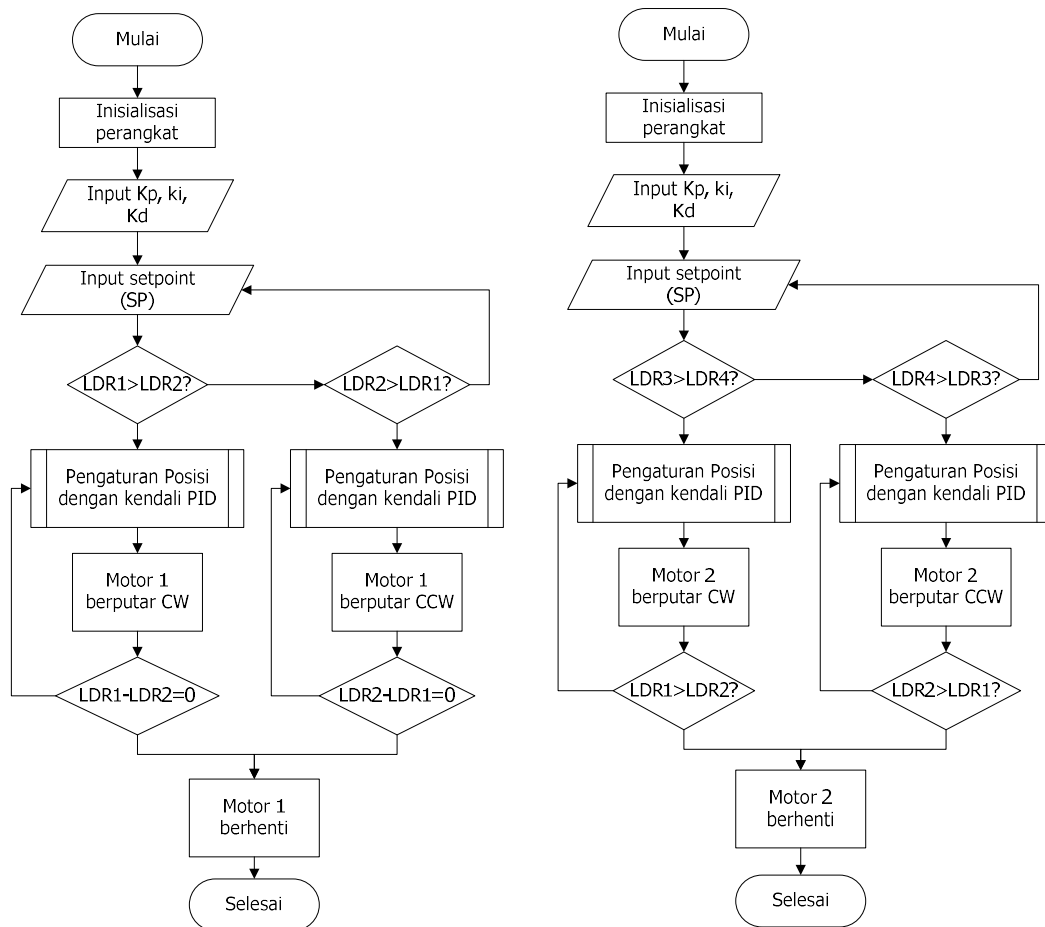
Gambar 4. Diagram Blok Rancangan Sistem Kendali

2.3. Perancangan Sistem Informasi

Perancangan sistem informasi terdiri dari tahap inisiasi, desain, implementasi, integrasi dan pengetesan. Tahap inisiasi pada sensor dan aktuator sebagai hasil dari analisis definisi dan persyaratan sistem. Pada perangkat *solar panel tracker* terdapat *user* yang dapat mengontrol dan memonitoring sistem melalui sebuah layar tampilan. Selain itu, pada sistem terdapat diagram alir pembuatan program utama yang dikendalikan antara lain pengendalian posisi, penampilan indikator dan kendali besaran listrik. Gambar 5 mengilustrasikan urutan sistem kerja program dalam mengendalikan perangkat *solar panel tracker*.

Pendekatan pengendalian PID menggunakan metode Ziegler-Nichols, dimana sistem kendali diwakili dengan sebuah persamaan fungsi transfer linear seperti Persamaan (1). Parameter K_p , K_i , dan K_d adalah konstanta *proportional*, *integral*, dan *derivative*. Parameter $e(t)$ adalah kesalahan yang mendefinisikan kesenjangan antara nilai yang diinginkan dengan nilai yang terjadi pada sistem selama pengendalian (**Ogata, 2010**). Terdapat beberapa metode untuk menentukan parameter PID yang sesuai untuk sistem kendali atau biasa disebut metode tuning. Metode Ziegler-Nichols menjadi salah satu metode dalam proses tuning parameter PID (**Ogata, 2010**). Metode Ziegler-Nichols dengan struktur kendali close loop digunakan metode kedua. Pengendali pada metode ini hanya pengendali *proportional*. Hasil perhitungan dengan penguatan akhir K_{cr} dan periode akhir P_{cr} sebagai penggerak atau pengontrol suatu mekanisme tertentu. Selain itu juga sebagai komponen yang menampilkan visual sistem. Pada penelitian ini nilai parameter K_p , K_i dan K_d akan dicari untuk memperoleh respon waktu terbaik untuk kendali pergerakan sumbu elevasi dan sumbu azimuth

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$



Gambar 5. Diagram Alir Teknologi Informasi

2.4. Integration Validation Verification

Pada tahapan ini dilakukan penggabungan elemen mekanik, elektronik, dan sistem informasi diintegrasikan sesuai hasil rancangan produk *solar panel tracker*, sehingga diperoleh keseluruhan sistem *solar panel tracker* yang terintegrasi dan memenuhi persyaratan kriteria aspek mekanik, aspek elektronik maupun aspek sistem informasi. Kemudian dilakukan proses verifikasi keberfungsian sistem yaitu (i) fungsi konversi energi sinar matahari menjadi energi listrik oleh perangkat panel surya, dan (ii) fungsi *tracking* posisi sinar matahari agar permukaan panel surya selalu tegak lurus terhadap posisi matahari.

2.5. Perolehan Energi Solar Panel Tracker dan Statis

Untuk menentukan besarnya peningkatan konversi energi pada panel surya yang menggunakan *tracker*, maka digunakanlah Persamaan (2), (3), dan (4) (Yandi, dkk, 2017).

$$P = V * I \quad (2)$$

$$W = V * I * t \text{ atau } P * t \quad (3)$$

$$W_{total} = \Sigma W \quad (4)$$

$$\eta = E_{out}/E_{in} \times 100\% \quad (5)$$

Dimana, P adalah Daya, I ialah Arus, W merupakan Energi, t adalah Waktu, dan Wtotal ialah Total Energi. Persamaan (2), (3), dan (4) digunakan untuk melakukan perhitungan data kedua

buah panel yang akan dibandingkan. Total energi pada sistem penggerak pada solar panel *tracker* dapat dihitung dengan Persamaan (5). Setelah data energi total didapat, maka nilai selisih dan persentase peningkatan nilai konversi energi *solar panel tracker* terhadap solar panel statis dapat diperoleh menggunakan Persamaan (6) dan (7).

$$\text{Selisih Energi} = \Sigma W \text{ tracker} - \Sigma W \text{ statis} \quad (6)$$

$$\% \text{ Energi} = \text{Selisih Energi} / \Sigma W \text{ statis} \quad (7)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

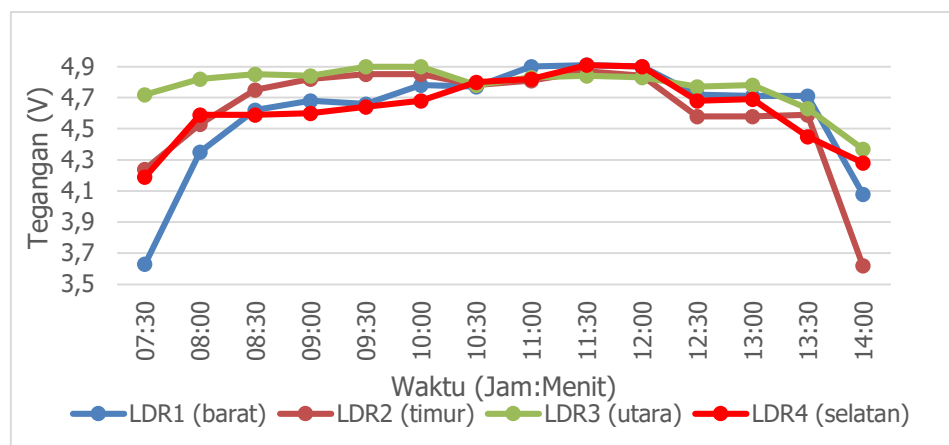
Hasil perangkat *solar panel tracker* yang telah diperoleh, kemudian dibuat dan selanjutnya dilakukan pengujian meliputi pengujian respons sensor pendeteksi, *tuning* parameter kendali PID dan spesifikasi respons waktu serta luaran tegangan dan arus panel surya statis dan menggunakan perangkat. Pada Gambar 7(a) ditampilkan rangkaian kendali dan *interface* pada sistem *solar panel tracker*, dan pada Gambar 7(b) ditampilkan perangkat *solar panel tracker*. Sistem penjejak perangkat *solar panel* mampu memposisikan panel surya untuk mengikuti pergerakan matahari melalui identifikasi nilai sensor dan mikrokontroler untuk memberikan perintah pada aktuator.



Gambar 6. Rangkaian Kendali dan *Interface* pada Sistem *solar panel tracker*

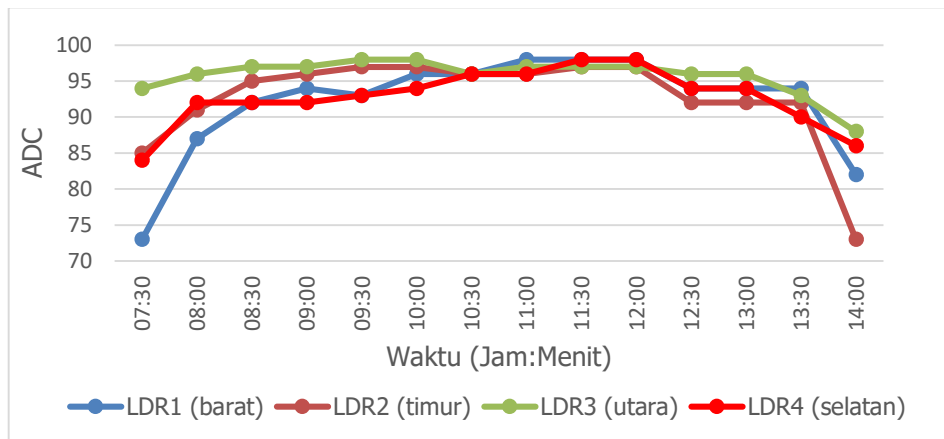
3.1. Pengujian Respon Sensor LDR

Pengujian dilakukan dengan mengukur karakteristik respons LDR yang posisinya mewakili data intensitas cahaya pada 4 arah mata angin yaitu barat, timur, utara, dan selatan. Respon dari sensor berupa data pembacaan nilai tegangan rangkaian terukur dan nilai ADC (*Analog to Digital Converter*) yang terbaca oleh serial monitor Arduino. Nilai tegangan terukur antara 0-5 volt dan pembacaan nilai ADC antara 0-100 seperti yang ditampilkan pada Gambar 7 dan 8.



Gambar 7. Grafik Respon Tegangan

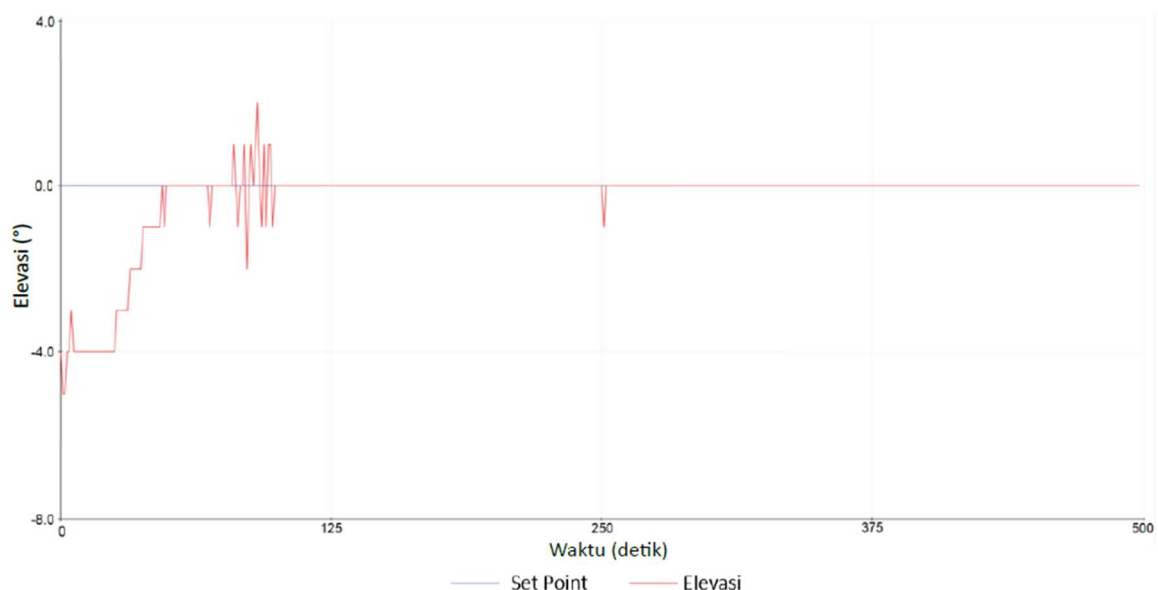
Gambar 7 dan 8 merupakan grafik respon tegangan dan grafik respon ADC. Respon sensor LDR menunjukkan bahwa pemosisian sensor mampu mengidentifikasi perubahan sumber cahaya matahari dari timur hingga barat dan utara hingga selatan. Kurva respon mengilustrasikan bahwa rentang perbedaan respon keempat sensor LDR tersebut tidak terlalu jauh berbeda antara satu dengan yang lainnya. Adapun perbedaan nilai respon ADC dan tegangan sensor LDR terjadi saat matahari terbit dan terbenam antara LDR1 Barat dan LDR3 Utara. Hal ini dikarenakan oleh pergerakan bumi yang berotasi dari barat ke timur, sehingga dalam menerima intensitas cahaya sudut datang matahari pada sensor LDR1 Barat nilainya lebih kecil dibandingkan LDR3 utara saat terbit matahari dan terbenam.



Gambar 8. Grafik Respon ADC

3.2. Pengujian Metode Karvonen

Penggunaan PID pada algoritma sistem kendali adalah menggunakan parameter P, I, dan D pada perhitungan langkah instruksi. Berdasarkan pengujian langsung pada perangkat dengan metode ke-2 Ziegler-Nichols dan *trial and error*, diperoleh nilai parameter $K_p=10,7$; $K_i=0,2$; dan $K_d=0,9$ untuk sumbu elevasinya.



Gambar 9. Spesifikasi Response Waktu Sistem Sumbu Elevasi

Gambar 9 menunjukkan spesifikasi response waktu sistem sumbu elevasi. Dimana secara

detail beberapa respon waktu yang diperoleh adalah waktu menuju kestabilan (*settling time*) sebesar 70,95 detik, waktu respon naik dari 0%-100% (*rise time*) sebesar 33,64 detik, waktu respon mencapai puncak *overshoot* (*peak time*) sebesar 65,105 detik, dan waktu respon mencapai setengah nilai final untuk pertama kali (*delay time*) adalah sebesar 22,569 detik.



Gambar 10. Spesifikasi *Response Waktu* Sistem Sumbu Azimuth

Selain itu berdasarkan hasil pengujian langsung pada perangkat dengan metode ke-2 Ziegler-Nichols dan *trial and error*, diperoleh nilai parameter untuk sumbu azimuth yaitu $K_p=15,4$; $K_i=2,7$; dan $K_d=1,2$. Gambar 10 menunjukkan spesifikasi respon waktu sistem sumbu azimuth. Dimana secara detail beberapa respon waktu yang diperoleh adalah waktu menuju kestabilan (*settling time*) sebesar 65,887 detik, waktu respon naik dari 0%-100% (*rise time*) sebesar 1,073 detik, waktu respon mencapai puncak *overshoot* (*peak time*) sebesar 27,892 detik, dan waktu respon mencapai setengah nilai final untuk pertama kali (*delay time*) adalah sebesar 1,978 detik.

3.3. Hasil Pengukuran Panel Surya Statis

Untuk mengetahui perbedaan kinerja *solar panel tracker* terhadap kinerja panel surya statis maka dilakukan pengujian pengukuran beberapa parameter kinerja panel surya statis. Beberapa parameter terukur antara lain tegangan dan arus. Perhitungan daya dan total daya diperoleh menggunakan formulasi nomor (1), (2), dan (3). Pada Tabel 3 ditampilkan hasil pengukuran dan perhitungan kinerja panel surya statis pada rentang waktu pengukuran pukul 8:30 WIB sampai dengan 15:00 WIB.

Tabel 3 menunjukkan hasil pengukuran panel surya yang diposisikan statis secara horizontal (mendatar), dimana memiliki rerata tegangan (V) sebesar 13,00 V, arus (I) sebesar 0,501 A, daya (P) 6,629 W, energi (Wstatis) sebesar 3,314 Wh dan total energi perolehan statis (ΣW_{statis}) 46,401 Wh. Nilai maksimum daya didapat pada pukul 11:30 WIB sebesar 9,759 W. Penggunaan panel surya dengan posisi statis hanya memperoleh nilai konversi energi maksimum pada saat posisi tegak lurus terhadap permukaan panel surya yaitu pukul 11:30, artinya selain waktu tersebut maka nilai efisiensi konversi tidak optimum.

Tabel 3. Hasil Pengukuran Panel Surya Statis

Waktu	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	Energi (Wh)	Total Energi (Wh)
08:30	11,95	0,457	5,462	2,731	
09:00	12,35	0,470	5,802	2,901	5,632
09:30	14,89	0,476	7,094	3,547	9,179
10:00	15,96	0,478	7,636	3,818	12,997
10:30	14,34	0,536	7,685	3,843	16,840
11:00	14,50	0,581	8,421	4,211	21,050
11:30	14,51	0,673	9,759	4,880	25,930
12:00	14,51	0,666	9,659	4,830	30,759
12:30	13,45	0,567	7,630	3,815	34,574
13:00	12,63	0,546	6,895	3,448	38,022
13:30	10,45	0,433	4,520	2,260	40,282
14:00	10,34	0,391	4,047	2,024	42,305
14:30	11,25	0,369	4,151	2,076	44,381
15:00	10,90	0,371	4,041	2,021	46,401
Rerata	13,00	0,501	6,629	3,314	

3.4. Hasil Pengukuran *Solar Panel Tracker*

Berdasarkan hasil pengujian pada rentang waktu pukul 08:30 hingga pukul 15:00 diperoleh data hasil pengukuran sejumlah parameter yaitu tegangan dan arus, kemudian dihitung nilai daya, energi, dan total energi seperti yang ditampilkan pada Tabel 4. Tabel 4 menunjukkan hasil pengukuran panel surya yang telah dilengkapi sistem *tracking*, diperoleh nilai rerata tegangan (V) sebesar 15,89 V, arus (I) sebesar 0,620 A, daya (P) 9,836 W, Energi ($W_{tracker}$) 4,918 Wh, dan total energi perolehan *Tracker* ($\Sigma W_{tracker}$) 68,855 Wh. Nilai maksimum daya didapat pada pukul 13:00 WIB sebesar 12,500 W.

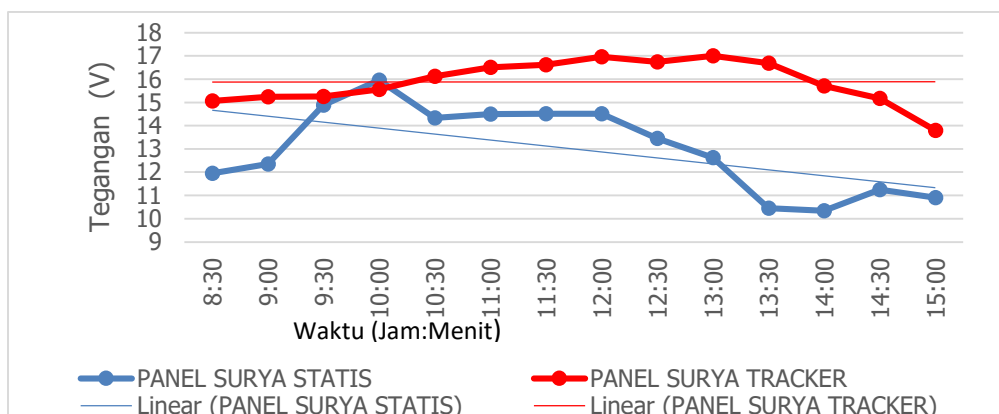
Tabel 4. Hasil Pengukuran *Solar Panel Tracker*

Waktu	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	Energi (Wh)	Total Energi (Wh)
08:30	15,06	0,5234	7,750	3,875	
09:00	15,25	0,5377	8,200	4,100	7,975
09:30	15,26	0,5328	8,050	4,025	12,000
10:00	15,56	0,544	8,350	4,175	16,175
10:30	16,12	0,5815	9,400	4,700	20,875
11:00	16,51	0,6245	10,320	5,160	26,035
11:30	16,62	0,6602	10,850	5,425	31,460
12:00	16,97	0,6665	11,300	5,650	37,110
12:30	16,74	0,7163	11,900	5,950	43,060
13:00	17,01	0,7367	12,500	6,250	49,310
13:30	16,69	0,6914	11,480	5,740	55,050
14:00	15,71	0,6689	10,450	5,225	60,275
14:30	15,17	0,6435	9,600	4,800	65,075
15:00	13,80	0,5491	7,560	3,780	68,855
Rerata	15,89	0,620	9,836	4,918	

3.5. Total Daya Luaran Panel Surya Statis dan Panel Surya *Tracker*

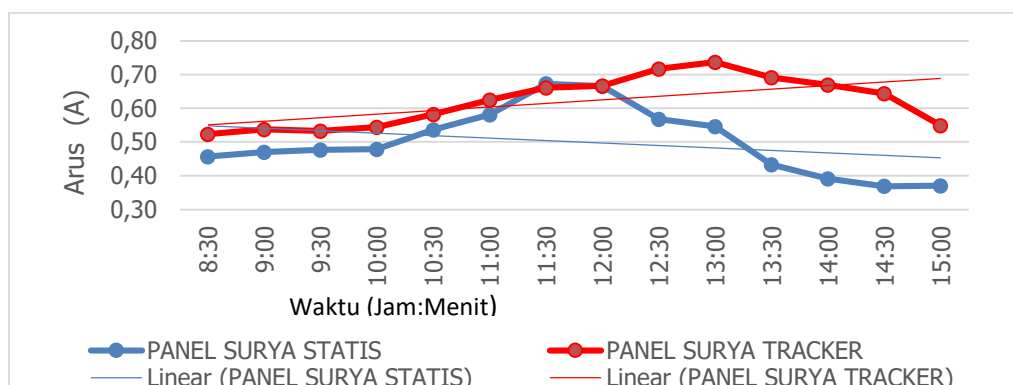
Berdasarkan hasil pengujian dan pengukuran terhadap parameter luaran panel surya diperoleh bahwa output panel surya *tracker* lebih besar dibandingkan panel surya statis, sehingga penambahan perangkat sistem *tracking* mampu meningkatkan kinerja panel surya. Ilustrasi perbedaan perolehan tegangan dan arus antara panel surya statis dengan panel surya *tracker* ditunjukkan pada Gambar 11 dan 12. Pada Gambar 13 ditampilkan grafik perbandingan daya hasil perhitungan yang dihasilkan panel surya statis dan panel surya *tracker*.

Harja, dkk

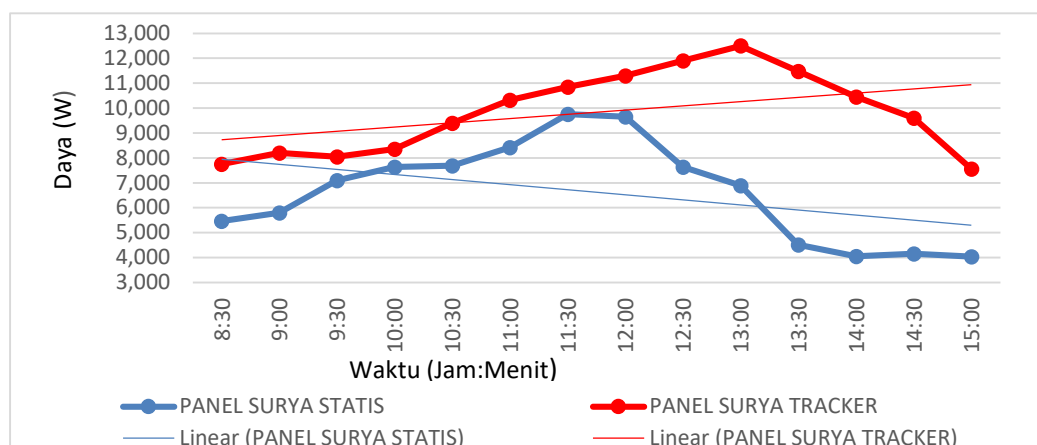


Gambar 11. Grafik Perbandingan Tegangan

Pada Gambar 11 ditampilkan grafik perbandingan tegangan. Nilai tegangan yang dihasilkan oleh solar panel statis pada pukul 08:30 adalah sebesar 12 volt dan meningkat hingga nilai tegangan maksimum sebesar 16 volt pada pukul 10:00, tetapi kemudian memiliki kecenderungan terus menurun hingga pukul 15:00. Nilai perolehan tegangan solar panel tracker memiliki kecenderungan meningkat hingga melampaui nilai tegangan maksimum luaran solar panel statis hingga 17 volt dan memiliki kecenderungan tetap serta baru luaran tegangannya menurun perlahan. Sehingga hasil perhitungan akumulasi perolehan tegangan luaran *solar panel tracker* lebih besar dari solar panel statis.



Gambar 12. Grafik Perbandingan Arus

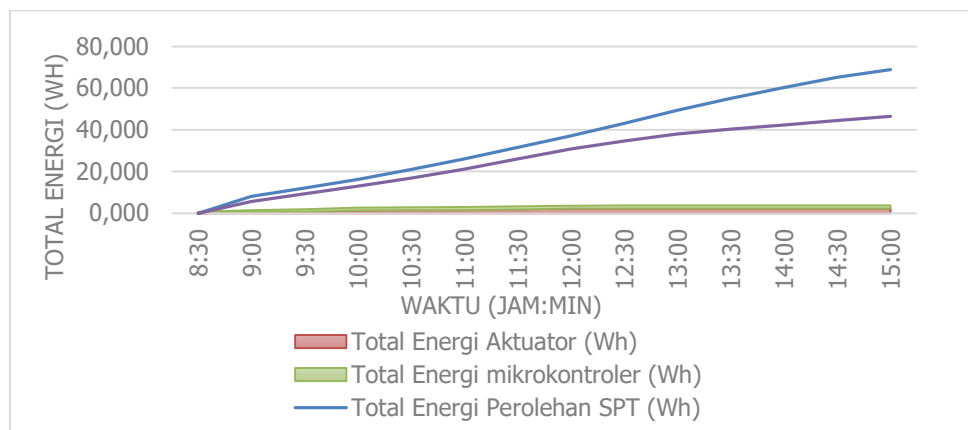


Gambar 13. Grafik Perbandingan Daya

Perbandingan perolehan nilai arus antara solar panel statis dengan *solar panel tracker* ditampilkan pada Gambar 12, dimana sepanjang waktu pengujian yaitu sejak pukul 08:00 hingga 15:00 nilai luaran arus *solar panel tracker* memiliki kecenderungan selalu diatas nilai luaran arus solar panel statis, kecuali saat kondisi posisi matahari tegak lurus terhadap permukaan panel surya atau pukul 11:00 hingga 12:00. Peningkatan nilai daya panel *tracker* terhadap panel surya statis dapat dicari menggunakan Persamaan (2). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa rerata peningkatan daya panel surya *tracker* yang diperoleh adalah sebesar 48,38%.

3.6. Total Energi Netto Solar Panel Tracker

Mengacu pada data Tabel 3 dan Tabel 4 hasil pengukuran panel surya statis dan panel surya *tracker* saat pengujian, total energi perolehan panel surya dihitung menggunakan Persamaan (4) dan ditampilkan pada Gambar 14. Total energi perolehan panel surya *tracker* ($\Sigma W_{tracker}$) adalah sebesar 68,855 Wh dan total energi perolehan panel surya statis (ΣW_{statis}) adalah sebesar 46,601 Wh, serta konsumsi pemakaian total energi oleh aktuator dan kontroler sistem pada panel surya *tracker*.



Gambar 14. Total Energi Solar Panel

Konsumsi kebutuhan total energi sistem penggerak panel surya *tracker* selama 8 jam pada aktuator sebesar 2,2 Wh dan pada mikrokontroler sebesar 1,6 Wh, sehingga total energi kebutuhan sistem panel surya *tracker* adalah sebesar 3,8 Wh. Oleh karena itu persentase energi yang digunakan oleh sistem dan penggerak $[\eta]$ dapat dihitung menggunakan Persamaan (5). Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh bahwa persentase total kebutuhan energi sistem penjejak atau nilai $[\eta]$ adalah hanya sebesar 5,51%.

Hasil total energi perolehan panel surya *tracker* akan dikurangi dengan total kebutuhan konsumsi energi sistem *tracking*, sehingga total energi yang diperoleh merupakan total energi netto yang dihasilkan panel surya *tracker*. Selisih total energi dapat dihitung menggunakan Persamaan (6) dan (7). Total energi netto panel surya *tracker* ($\Sigma W_{netto tracker}$) setelah dikurangi dengan total energi kebutuhan sistem penjejak diperoleh sebesar 65,055 Wh. Hal ini menunjukkan bahwa nilai energi netto solar panel *tracker* masih bernilai besar walaupun telah dikurangi oleh nilai konsumsi energi sistem penjejak. Dari hasil total energi netto panel surya *tracker*, dapat dihitung selisih perolehan energi dan persentase energi yang dihasilkan antara panel surya *tracker* dengan solar panel statis. Selisih energi diperoleh sebesar 18.654 Wh, artinya penggunaan sistem *tracker* ($\% Energi$) pada solar panel berdampak positif meningkatkan perolehan energi sebesar 40, 2%.

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis data perolehan energi listrik yang dihasilkan oleh

obyek uji perangkat panel surya, bahwa solar panel yang dilengkapi sistem penjejak mampu menghasilkan kinerja perolehan konversi energi matahari sebesar 40,20% terhadap perolehan panel surya energi statis. Besar kebutuhan konsumsi energi sistem penjejak adalah sebesar 5,51 % dari perolehan total energi panel surya *tracker*. Artinya penyematan sistem penjejak secara efektif mampu meningkatkan kinerja dengan konsumsi energi sistem yang kecil dan hampir dapat diabaikan.

3. KESIMPULAN

Rancang bangun perangkat solar panel *tracker* telah berhasil dilakukan menggunakan metoda 2206 V-model untuk perancangan sistemnya, dan pendekatan metode Ziegler-Nichols untuk penentuan nilai PID optimum saat verifikasi kinerja sistem. Beberapa nilai parameter kendali sistem telah diperoleh, dimana untuk parameter untuk sumbu elevasi yaitu $K_p=10,7$; $K_i=0,2$; dan $K_d=0,9$ dengan *response settling time* 70,951 detik, dan untuk sumbu azimuth yaitu $K_p=15,4$; $K_i=2,7$; dan $K_d=1,2$ dengan *response settling time* 65,887 detik. Hasil penelitian diperoleh bahwa sistem *tracker* mampu meningkatkan perolehan tegangan, arus dan daya panel surya. Total energi luaran solar panel yang dilengkapi sistem *tracking* menghasilkan 68,855 Wh dengan konsumsi energi sistem *tracking*-nya sendiri adalah sebesar 3,8 Wh. Sehingga dapat disimpulkan bahwa penggunaan sistem *tracking* mampu meningkatkan total perolehan energi sebesar 48,38% jika dibandingkan dengan solar panel statis. Dan dengan kebutuhan daya sistem *tracking* sebesar 5,51%, maka persentase energi netto yang dihasilkan solar panel *tracker* adalah sebesar 40,2 %. Oleh karena itu penggunaan perangkat *Solar Panel Tracker* lebih efektif dan efisien dibanding panel surya statis.

DAFTAR RUJUKAN

- Al Isbilly, H., Fahmi, T., & Siswanto, M. (2019). Optimasi Dual Axis Tracking Untuk Solar Cell Berbasis Imperialis Competitive Algorithm (ICA). *Jurnal Intek*, 10(1), 48-51.
- Chairuzzaini dkk., (2024, Mei 20). Pengenalan Metode Ziegler-Nichols pada Perancangan Kontroler PID. Retrieved from <http://www.elektroindonesia.com/elektro/tutor12.html>> ,
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., & Blair, N. (2020). *Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- EBTK. (2024, Juni 24). Miliki Potensi EBT 3.686 GW, Sekjen Rida: Modal Utama Jalankan Transisi Energi Indonesia. Retrieved from <https://www.esdm.go.id>.
- Elektronika, L. (2024, Februari 13). Arduino Mega 2560 Mikrokontroler ATmega2560. Retrieved from <http://www.labelektronika.com>.
- Fuentes, M., R. F., Diaz, P., A., Peña, C., M. I., Rodrigo, P. M., Valentín, C., L. M., Martell, C., F., & Pineda, A., C. A. (2020). Control Algorithms Applied to Active Solar Tracking Systems: A Review. *Solar Energy*, 212, 203-219.
- Gunawan, I. (2019). *Perancangan Pompa Air Aquarium Menggunakan Panel Surya*, Doctoral Dissertation, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
- Larico, E. R. A., & Gutierrez, A. C. (2022). Solar Tracking System with Photovoltaic Cells:

- Experimental Analysis At High Altitudes. *International Journal of Renewable Energy Development*, 11(3), 630-639.
- Lawles, C., & Karrfelt, E. (2018). *Sun Following Solar Panel: Using Light Sensors to Implement Solar Tracking*. Dissertation., KTH Royal Institute of Technology School of Industrial Engineering and Management.
- Ogata, K. (2020). *Modern Control Engineering*, 6th ed. New Jersey: Prentice Hall.
- Pramagusta, A. P., & Prakoso, B. (2018). Sistem Penjejak Matahari Menggunakan Metode Pengukuran Titik Koordinat Lokasi untuk Optimalisasi Perolehan Data Pengukuran oleh Sunphotometer. *In Prosiding Seminar Nasional Instrumentasi, Kontrol dan Otomasi*, (pp. 19-23).
- Ramli, I., Samman, F. A., & Said, S. M. (2022). Panel Surya dengan Sistem Pelacakan Arah Sinar Matahari. *Jurnal Eksitasi*, 1(1).
- Santoso, H. E., & Rahmadiansah, A. (2014). *Rancang Bangun Solar Tracking System Menggunakan Kontrol PID pada Sumbu Azimuth*. Final project, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia.
- Saputra, G. (2024). Kekurangan Listrik Energi Fosil Dibanding Listrik dari Panel Surya. Retrieved from <https://www.solopos.com>.
- Susanto, B., Herlambang, Y. D., Bono, B., Alfauzi, A. S., & Munawwaroh, D. A. (2021). Optimalisasi Arah Sudut Tilt dan Sudut Azimuth dari Alat Pemanen Energi Radiasi Matahari di Semarang, Jawa Tengah. *Eksergi*, 17(2), 145-154.
- Tiyas, P. K., & Widyartono, M. (2020). Pengaruh Efek Suhu Terhadap Kinerja Panel Surya. *Jurnal Teknik Elektro*, 9(1).
- Graessler, I., & Hentze, J. (2020). The new V-Model of VDI 2206 and its validation. *Automatisierungstechnik*, 68(5): p. 103-108.
- Wendryanto, W., Widayana, G., & Sutaya, I. W. (2017). Pengembangan penggerak solar panel dua sumbu untuk meningkatkan daya pada solar panel tipe polikristal. *Jurnal Pendidikan Teknik Mesin Undiksha*, 5(3).
- Wendryanto, W., Widayana, G., & Sutaya, I. W. (2019). Pengembangan Penggerak Solar Panel Dua Sumbu untuk Meningkatkan Daya Pada Solar Panel Tipe Polikristal. *Jurnal Pendidikan Teknik Mesin Undiksha*, 5(3).
- Yandi, W., S. Syafii, and A.B. Pulungan, (2017). Tracker Tiga Posisi Panel Surya untuk Peningkatan Konversi Energi dengan Catu Daya Rendah. *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, 6(3), 159-167.