

Desain Teknologi *Dual-Axis Solar Tracker* Untuk Mengukur Sudut, Torsi dan Daya Motor Worm Gear Pada Panel Surya

Adi Mulyadi**¹, Muhammad Zainal Roisul Amin²

^{1,2} Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas PGRI Banyuwangi, 68418, Indonesia

¹ adimulyadi@unibabwi.ac.id, ² mzainalra@unibabwi.ac.id

**Corresponding Author: * adimulyadi@unibabwi.ac.id

 **Cite This:** <https://jurnal.sekawansiji.org/index.php/jef/>

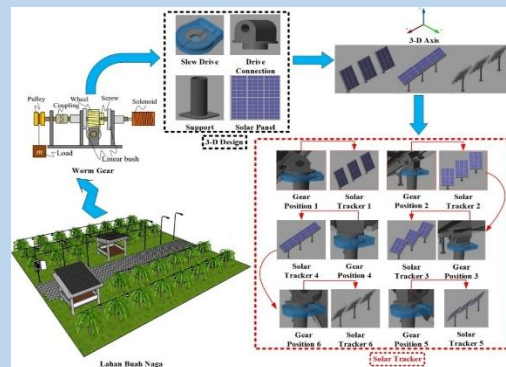
 Read Online

ACCESS

ABSTRACT: This paper discusses the design of dual-axis solar tracker technology to measure the angle, torque and motor power of solar panels in dragon fruit fields in Banyuwangi Regency. The installation of solar panels that have been carried out in static conditions with the charging of solar panel energy produced is not optimal. Therefore, solar tracker technology is proposed to measure the angular velocity, motor torque, and motor power by following the direction of the sun. The dual-axis solar tracker uses a worm gear consisting of a spiral threaded shaft to drive a toothed wheel with a rotation angle of 180°.

The results of the application of the solar tracker show that the angular velocity, torque and power increase significantly. Measurement of the dual-axis solar tracker with a time of 2-30 seconds obtained the angle, torque and power of the worm gear motor at a time of 0 seconds, namely -664.151 deg / s to a time of 30 seconds 621.534 deg / s. While the results of measurements with a time of 30-60 seconds produced an angular velocity of 621.534-2169.744 deg / s. Furthermore, the measurement of the worm gear motor torque at 0-30 seconds obtained 353,712-2286,268 Nm, and the measurement of the motor torque at 30-60 seconds produced a value of 2286,268-7356,913 Nm. The measurement of the worm gear motor power with a time of 2-30 seconds produced an average power of 7,785-46,984 kW, and the measurement of the motor power at 30-60 seconds produced a power of 46,984-101,479 kW.

RECOMENDATION



Keyword: Dual-Axis Solar Tracker, Measurement, Worm Gear Motor, Solar Panels.

Article Info

Recieved
November 10, 2024

Revised
November 28, 2024

Accepted
December 27, 2024

Published
December 30, 2024



1. PENDAHULUAN

Panel surya merupakan energi alternatif dan sebagai pengganti suplai listrik dari Perusahaan Listrik Negara (PLN) [1].

PLN merupakan perusahaan milik negara yang bertanggung jawab terhadap distribusi listrik di seluruh wilayah [2]. Energy Information Administration (EIA) menjelaskan bahwa pemakaian energi sampai 2025 dengan memanfaatkan bahan bakar fosil [3], minyak bumi, gas alam dan batu bara [4]. Berdasarkan data Badan Geologi Kementerian ESDM potensi cadangan batu bara sebesar 186 miliar ton dengan 52% di pulau Sumatera, 47% di Kalimantan, dan 1% di pulau lainnya [5]. Walaupun cadangan batu bara tinggi [6], penggunaan batu bara menghasilkan emisi karbon dioksida dan global warming [7]. Salah satu bentuk energi non-konvensional yaitu pemanfaatan energi matahari. Energi matahari dikonversi menjadi energi listrik dengan memanfaatkan panel surya [8]. Penerapan panel surya umumnya dipasang statis (tetap) pada bangunan, sehingga penyerapan energi matahari tidak maksimal [9]. Penyerapan energi matahari mempengaruhi proses konversi energi listrik yang dihasilkan dengan mengikuti perubahan posisi matahari [10]. Penyerapan energi listrik panel surya dengan posisi dinamis (bergerak) mengikuti cahaya matahari menghasilkan efisiensi daya output 69%, pengisian energi listrik 26% dan rata-rata daya 1.38 watt. Sedangkan panel surya pada posisi diam menghasilkan efisiensi daya output 67%, pengisian energi listrik 25%, dan rata-rata daya 1.34 watt [11]. Pemasangan panel surya dilakukan dengan mengikuti garis lintang matahari dan sudut kemiringan panel. Hasil pengujian menunjukkan bahwa daya output 39.2% watt, penyinaran 949.8 w/m², dan arus 2.6 A [12].

Selanjutnya, desain sistem tracking panel surya berbasis mikrokontroler arduino untuk mengikuti arah pergerakan matahari setiap jam. Pergerakan panel surya mengikuti matahari berdasarkan besar sudut 38.50, 540, 68.50, 79.50, 900, 1010, 112.50, 124.50, 140.50, 161.50, dan 1800 [13]. Pelacakan panel surya diatur tegak dengan mengikuti arah matahari untuk mencapai pengisian optimum. Setiap meter persegi luas panel surya yang menghadap matahari menggunakan pergerakan motor, arduino, dan sensor LDR. Hasil pelacakan menunjukkan bahwa tegangan yang dihasilkan 19-17 Volt pada jam 09.00-15.00. Sedangkan pengujian tanpa pelacakan menghasilkan tegangan 15-13 Volt pada jam 09.00-15.00 [14]. Pengaturan pelacakan panel surya dikontrol tegak lurus dengan arah matahari secara otomatis. Sistem pelacakan menggunakan kontrol Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS). Hasil pelacakan menggunakan kontrol ANFIS mendapatkan daya sebesar 51% dari daya output maksimum panel surya 20 watt. Sedangkan pelacakan tanpa kontrol ANFIS menghasilkan daya output sebesar 29.49%. Perbandingan selisih efisiensi daya panel surya menggunakan kontrol pelacakan dan tanpa kontrol adalah 21.51% [15]. Perancangan solar tracker satu sumbu dengan ANFIS diusulkan untuk membaca arah sinar matahari. Perancangan dilengkapi dengan motor dan sensor LDR. Hasil pengujian single axis solar tracker menunjukkan bahwa metode fuzzy menghasilkan nilai tegangan 17.47 volt, dan daya 27.722 watt. Pengujian single axis solar tracker menggunakan ANFIS menghasilkan arus 1.76 A dan fuzzy 1.57 A [16]. Dua panel surya kapasitas 240 WP diterapkan pelacakan tiga posisi dengan pemasangan flat dan tracker. Hasil pengujian meningkatkan rata-rata konversi energi sebesar 0.263 kWh/hari atau 27.9%. Kebutuhan energi aktuator tracker tiga posisi 0.625 Wh/hari dan sistem kontrol tracker 18 Wh/hari [17]. Optimalisasi produksi energi listrik panel surya 200 WP menggunakan Solar Tracker System Dual Axis dan Solar Tracker System Single Axis. Hasil pengujian Solar Tracker System Single Axis menunjukkan bahwa tegangan rata-rata diperoleh 19.72 volt, arus 1.34 A, daya listrik 26.82 watt. Sedangkan Solar Tracker System Dual Axis memperoleh 18.93 Volt, 1.9 A, dan daya listrik 35.76 watt [18].

Pelacakan panel surya dengan 2-sumbu berbassis Internet of Things (IoT). Sistem komponen menggunakan empat LDR dengan menyesuaikan empat mata arah angin, dan dua motor servo digunakan sebagai kontrol gerakan sumbu X dan Y. proses pelacakan menggunakan kontroler Arduino Uno dan NodeMCU ESP12 sebagai platform monitoring IoT. Hasil pengujian menunjukkan peningkatan daya output sebesar 15.93%, kemudian monitoring menggunakan ponsel aplikasi Blynk [19]. Sistem monitoring diusulkan untuk melihat kondisi realtime intensitas cahaya, arus, tegangan, suhu, dan daya. Pengujian dilakukan pada panel surya jenis polocrystalline dan monocrystalline. Hasil pengujian pada polocrystalline menghasilkan intensitas cahaya sebesar 21124 lux, tegangan 9.65 volt, arus 0.32 A, daya 3.04 watt, suhu 40.850C. Sedangkan pengujian jenis monocrystalline menghasilkan intensitas cahaya sebesar 21124 lux, tegangan 8.39 volt, arus 0.22 A, daya 1.84 watt, suhu 40.850C [20]. Sistem tracker digunakan untuk meningkatkan produktivitas pengisian panel surya. Sistem tracker menggunakan sensor Arduino Mega, Esp8266-12F, sensor LDR, Motor Servo, dan web digunakan sebagai pengiriman informasi secara realtime [21]. Perancangan tracker menggunakan sudut kemiringan untuk memaksimalkan intensitas matahari yang diterima oleh panel surya. Sudut kemiringan panel surya digunakan untuk meningkatkan output arus dengan regretion quadratic method. Hasil pengukuran dengan sudut kemiringan panel surya 36.70 mendapatkan nilai output arus sebesar 1.99 A. sedangkan pengukuran sudut kemiringan panel surya dengan regretion quadratic method menghasilkan root mean square error (RMSE) 0.27476 [22].

Analisis sudut kemiringan slope dan azimuth pada instalasi panel surya jenis array diterapkan untuk mendapatkan nilai daya maksimal. Radiasi panel surya yang diterima dengan sudut 1800 menghadap utara. Pengaturan sudut panel surya pada musim hujan 10, musim kemarau 240, dan 90 dengan radiasi rata-rata 13.8958 MJ/m²hari [23]. Perbandingan performa sudut Dual Axis Solar Tracker (DAST) dan Static Solar System (SSS) di area Federasi Rusia dilakukan pengujian beberapa sudut seperti zenith, dan kemiringan solar. Hasil yang diperoleh dari penguatan energi dan efesiensi untuk pelacakan panel surya menunjukkan bahwa performa DAST lebih baik dibandingkan dengan SSS [24]. Tracking Dual Axis Technology (TDAT) berbasis mikrokontroler Arduino Atmega 2560 diusulkan untuk mengendalikan Light Dependent Resistor (LDR) sebagai pelacak matahari. Hasil pegujian menunjukkan bahwa tegangan maksimum dengan TDAT 20.99 volt, tegangan minimum 19.75 volt, dan arus maksimum 21.04 mA, arus minimum 14.12 mA. Sedangkan pengujian dengan posisi statis menghasilkan tegangan maksimum 19.99 volt, tegangan minimum 18.3 volt, dan arus maksimum 18.3 mA, arus minimum 13.72 mA [25]. Sistem tracking panel surya dua sumbu diterapkan pada gedung praktik Universitas Negeri Padang. Sistem tracking tetap dan dua sumbu dengan spesifikasi panel surya yang sama. Hasil tracking menunjukkan bahwa tegangan rata-rata menggunakan sistem tracking 19.4 volt, dan tanpa tracking mendapatkan tegangan rata-rata 21.5 volt. Arus yang diperoleh pada sistem tracking 0.58 A dan tanpa tracking 1.05 A. kemudian selisih energi listrik pada sistem tanpa 180.62 Wh dan tracking adalah 361.75 Wh [26].

Dari penelitian yang telah dilakukan diatas menunjukkan bahwa penerapan panel surya yang dipasang secara statis dan dinamis memiliki efesiensi serta pengisian energi listrik yang berbeda. Sehingga pengisian panel surya dapat berubah seiring dengan intesitas cahaya matahari. Pengisian energi listrik panel surya jenis 50 watt-peak (WP) dengan cara dinamis, pengaturan sudut 00 dan waktu pengisian dari jam 09:00-16:00 memiliki rata-rata arus sebesar

0.43 A, tegangan 20.47-20.58 V. Pengisian energi listrik dengan pengaturan sudut 80 mempunyai rata-rata arus yaitu 0.44-0.49 A, tegangan 20.48-20.63 V, dan sudut menggunakan 160 menghasilkan arus listrik sebesar 0.45-0.50 A, dan tegangan 20.53-20.66 V [27]. Dari penerapan panel surya di atas terlihat bahwa pengisian energi listrik yang memiliki arus dan tegangan lebih besar yaitu dengan sudut 160. Namun, sistem pengisian energi listrik yang diterapkan hanya memvariasikan sudut kemiringan dan menggunakan kontroler yang berbeda.

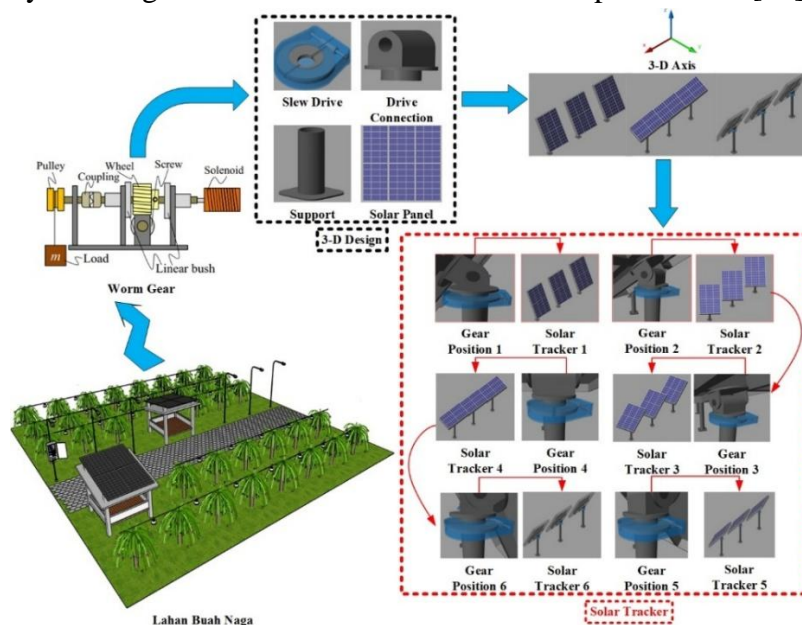
Oleh sebab itu, penelitian ini dilakukan dengan eksperimen teknologi dual-axis untuk mengukur sudut, torsi dan daya motor pada solar tracker. Penerapan solar tracker di area Desa Wiringipitu, Kecamatan Tegaldlimo Kabupaten Banyuwangi pada lahan buah naga. Instalasi panel surya yang sudah dilakukan dengan kondisi statis dengan pengisian energi panel surya yang dihasilkan tidak maksimal. Perancangan teknologi dual-axis solar tracker diusulkan untuk mengukur sudut, torsi dan daya motor pada solar tracker. Pengukuran sudut kemiringan, torsi, dan daya motor dihitung berdasarkan penyerapan energi panel surya yang mengikuti arah matahari [28]. Sistem tracker digunakan untuk meningkatkan energi efisiensi solar panel [29]. Sistem dirancang dengan menggunakan dua sumbu, di mana dua pergerakan sumbu dikendalikan oleh putaran aktuator yang dihubungkan dengan worm gears untuk blok sistem dalam posisi stationer. Gerakan ditransmisikan dari poros keluaran motor dengan menggunakan roda worm gear ini adalah transmisi tidak dapat diubah dan memastikan pemblokiran sistem pada posisi stasioner antara penggerak. Ketika motor dihentikan, maka tidak ada konsumsi energi motor pada posisi stasioner [30]. Tracker dual-axis memiliki dua derajat kebebasan yang berfungsi sebagai sumbu rotasi. Sumbu ini biasanya ortogonal satu sama lain. Sumbu primer adalah sumbu yang tetap terhadap tanah. Sumbu sekunder adalah sumbu yang mengacu pada sumbu primer. Tujuan penerapan teknologi dual-axis tracker digunakan untuk mengukur sudut, torsi dan daya motor pada solar tracker. Pengukuran sudut kemiringan panel surya mengikuti arah matahari [31] dengan simulasi Matlab seperti pelat sel surya, dudukan, roda gigi, motor [32].

2. METODE

Metode penelitian menggunakan eksperimen dengan perancangan dan simulasi menggunakan software Matlab. Perancangan terdiri dari worm gear poros berulir spiral yang menggerakkan roda bergigi. Gerakan rotasi berubah 00, 450, 900, 1800 menyesuaikan perubahan sumbu x dan y secara ortogonal [33]. Gesekan dihasilkan saat roda gigi yang berputar sehingga gaya gesek akan menimbulkan panas. Worm gear digunakan untuk mengurangi kecepatan karena memiliki tingkat torsi yang rendah dan tinggi, sehingga worm gear mengendalikan solar tracker berdasarkan arah matahari. Worm gear digunakan karena memberikan perkalian torsi tinggi dan pengurangan kecepatan tinggi [34]. Jika koefisien gesekan antara gear dan worm lebih signifikan daripada tangen sudut dan worm gear mengunci sendiri [35]. Worm gear dirancang menggunakan rasio untuk mencapai torsi tinggi dan kecepatan rendah. Roda gigi heliks memiliki rasio roda gigi kurang dari 10:1, sedangkan worm dan set roda gigi memiliki rasio mulai dari 10:1 hingga 500:1. Hal ini untuk mencegah aksi geser yang signifikan dan menghasilkan efisiensi yang rendah [36].

Penentuan gaya yang dihasilkan antara worm wheel dan worm screw adalah permukaan roda gigi cenderung sudut awal dan sudut tekanan [37]. Penyederhanaan analisis mempertimbangkan sudut yang memiliki pengaruh signifikan terhadap gesekan roda gigi [38]. Jika torsi diterapkan pada poros roda, maka gaya dorong F dihasilkan pada gigi roda

menjadi gaya yang diterapkan ke titik kontak oleh worm gear [39], [40]. Oleh karena itu, titik kontak gigi gir diterapkan baik gaya maupun F [41]. Worm gear mechanism mengatur gerakan dari sudut X dan Y secara bertahap untuk mencapai kesetabilan sudut 00 sampai 900 [42]. Kemudian body frame mengendalikan left and right frame berdasarkan pengaturan gerakan yang diinginkan [43]. Pada kondisi ini, gerakan body frame mempengaruhi penyerapan energi matahari yang dihasilkan pada panel surya [44]. Sehingga dual axis solar tracker berkerja pada sudut pitch dan yaw mengikuti arah matahari dari timur sampai ke barat [45], [46].



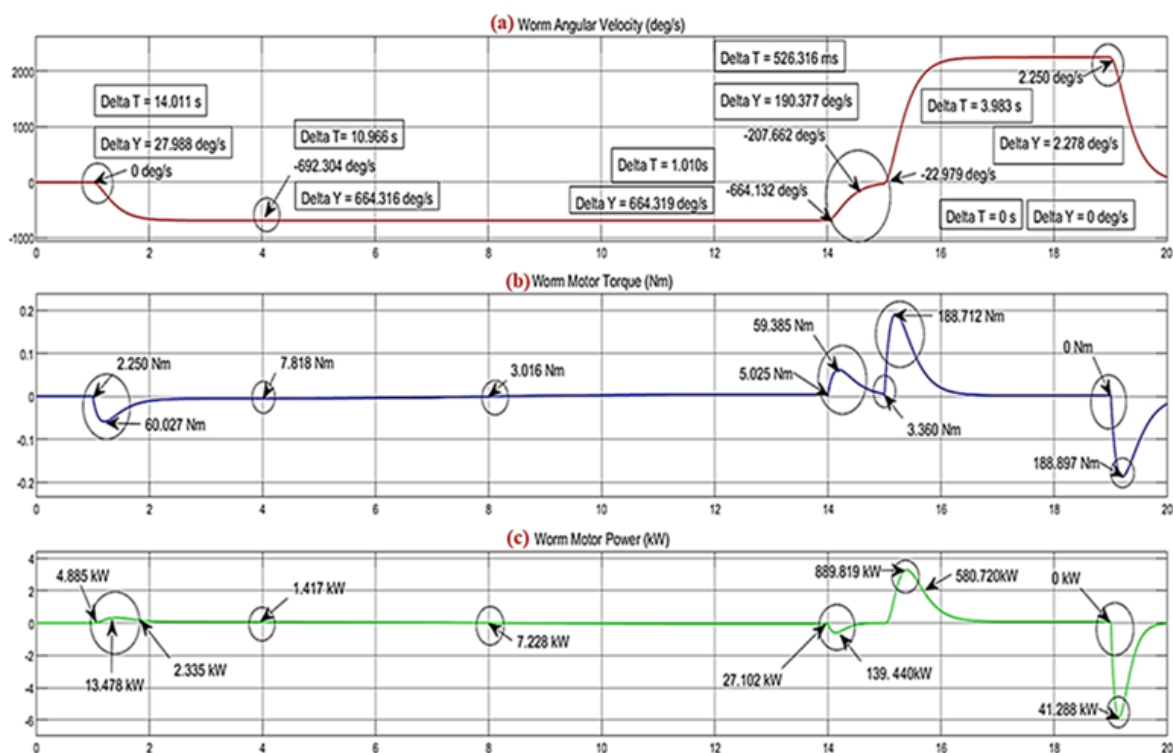
Gambar 1. Dual-Axis Solar Tracker Pada Lahan Buah Naga

Tahapan pengujian pada gambar 1 dilakukan dengan time solar tracker (waktu pengujian), angular velocity (kecepatan sudut), worm motor torque (torsis motor), worm motor power (daya motor). Waktu pengujian dilakukan dengan variasi waktu 0 detik sampai 60 detik. Hal ini bertujuan untuk mengetahui waktu sudut kemiringan dan panel surya mengikuti arah matahari. Kecepatan sudut diukur berdasarkan deg/sec, torsis motor Nm, dan daya motor yang dihasilkan selama berputar mengikuti arah matahari kW.

3. HASIL

Hasil penerapan solar tracker pada lahan buah naga dengan metode dual-axis ditunjukkan pada gambar 2. Simulasi solar tracker dengan worm dan gear menunjukkan bahwa worm angular velocity (WAV) sebesar 0 deg/s dengan $\Delta T = 14.011 \text{ s}$ dan $\Delta Y = 27.988 \text{ deg/s}$. Pada waktu 4 s WAV menurun -692.304 deg/s yang diikuti oleh $\Delta T = 10.966 \text{ s}$ dan $\Delta Y = 664.316 \text{ deg/s}$. Kemudian waktu 14 s WAV menurun -664.132 deg/s , $\Delta T = 1.010 \text{ s}$ dan $\Delta Y = 664.319 \text{ deg/s}$. Sedangkan pada waktu 14.5 s WAV menjadi -207.662 deg/s dengan $\Delta T = 526.316 \text{ ms}$ dan $\Delta Y = 190.377 \text{ deg/s}$. WAV pada waktu 15.5 s mendapatkan -22.979 deg/s , $\Delta T = 0 \text{ s}$ dan $\Delta Y = 0 \text{ deg/s}$. WAV pada waktu 15 second (s) meningkat 2.250 deg/s , $\Delta T = 3.983 \text{ s}$ dan $\Delta Y = 2.278 \text{ deg/s}$. Percepatan sudut WAV dipengaruhi oleh torsis motor (Nm) dan daya worm gear (kW) setiap gerakan sudut yang dihasilkan oleh solar tracker pada slew rate. Torsi worm gear bergerak menyesuaikan sudut solar tracker 2.250 Nm menjadi 60.027 Nm . Pada waktu 4 sampai 8 mengalami penurunan sebesar 7.818 Nm menjadi 3.016 Nm .

Hal ini disebabkan oleh panel surya bergerak searah jarum jam dan tidak ada daya yang disuplai pada worm gear. Sedangkan waktu 14-14.2 s torsi motor meningkat dari 5.025 Nm menjadi 59.385 Nm. Namun pada waktu 15 s torsi gear menurun sebesar 3.360 Nm dan mengalami overshoot di waktu 15.5 s yaitu 188.712 Nm sampai mencapai kondisi nol dalam waktu 19 s. Walaupun torsi gear yang dihasilkan sebesar nol pada waktu 19 s, pada waktu 19.5 s torsi gear deg/s meningkat 188.897 s yang disebabkan undershoot dan worm gear terkunci [47]. Daya yang dihasilkan pada solar tracker pada kondisi sebelum mengikuti matahari sebesar 4.885 kW dan daya meningkat seiring panel surya bergerak mengikuti matahari menjadi 13.478 kW di waktu 2 s. pada waktu 2 s pengisian daya menjadi 1.417 kW kemudian meningkat secara bersamaan sebesar 7.228 kW sampai waktu 14 s yaitu 27.102 kW dan 889.819 kW. Kondisi daya maksimum terjadi pada waktu 16 s sehingga menurun 580.720 kW. Jika pengisian daya melewati pengisian daya maksimum, solar tracker akan kembali kepada sudut 0 deg/s, undershoot terjadi pada waktu 19 s dengan daya 0 kW menjadi 41.288 kW.



Gambar 2. (a) *Worm Gear Velocity* (b) *Worm Motor Torque* (c) *Worm Motor Power*

Gambar 2 menunjukkan perubahan sudut, kecepatan sudut motor dan daya worm gear pada panel surya dengan sudut WAV, torsi motor dan daya motor pada worm gear. Perubahan sudut yang maksimal ditunjukkan pada waktu 14 detik yaitu 798.761 kW. Namun pada waktu 2 detik sampai 14 detik daya motor worm gear meningkat dari 9.834 kW sampai 44.218 kW. Sedangkan pada waktu 18 detik daya yang diperoleh adalah 30.186 kW menurun sebesar 6.819 kW. Hal ini disebabkan oleh penyerapan sinar matahari yang diterima oleh panel surya tidak maksimal dan kondisi mendung. Tabel 1 menjelaskan solar tracker berdasarkan worm gear velocity, torque dan daya.

4. PEMBAHASAN

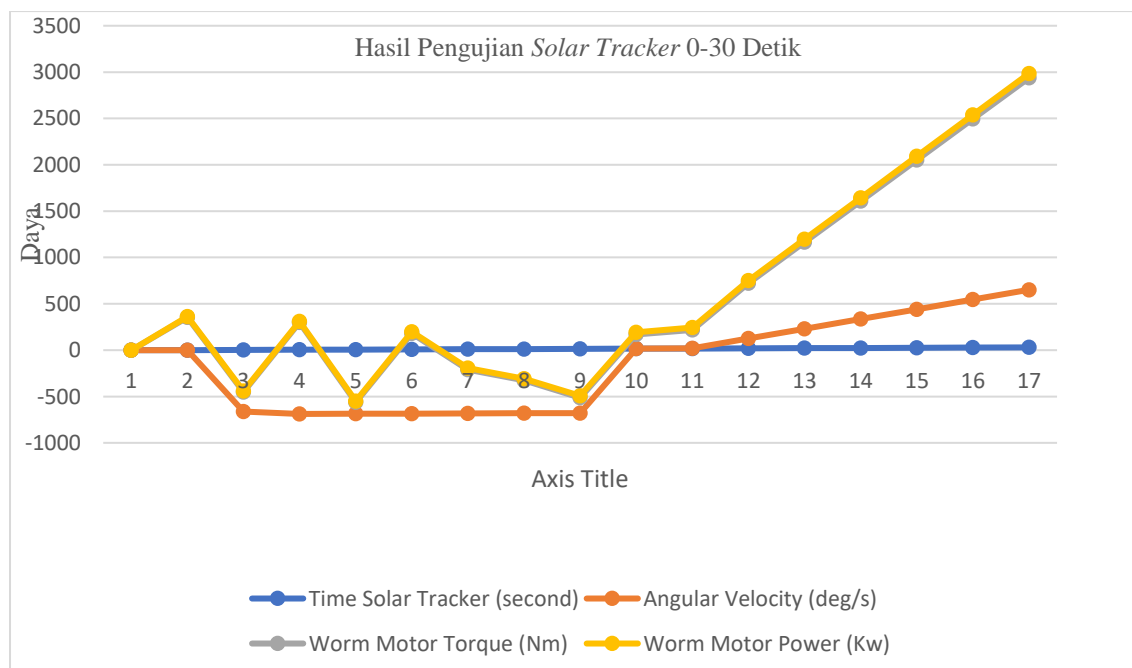
Tabel 1 percepatan sudut solar tracker berdasarkan velocity, torsi motor worm, dan daya motor worm. Waktu yang dibutuhkan oleh panel surya untuk menghasilkan torsi dan daya

pengisian yang maksimal diperoleh dengan sudut Worm Angular Velocity (WAV) sebesar 0 deg/s dengan delta T = 14.011 s dan delta Y 27.988 deg/s. Pengisian daya maksimal panel surya disebabkan oleh torsi worm gear bergerak menyesuaikan sudut solar tracker 00 deg/s sampai 180 deg/s dengan torsi minimal 353.721 Nm dan torsi maksimal 2286.268 Nm. Walaupun torsi worm gear yang dihasilkan sebesar 150.805 detik pada waktu 16 detik, pada waktu 18 detik torsi gear meningkat 198.013 s yang disebabkan undershoot dan worm gear terkunci. Kondisi daya maksimum terjadi pada waktu 16 s sehingga menurun 23.761 kW. Jika pengisian daya melewati pengisian daya maksimum, maka worm gear pada kondisi terkunci.

Tabel 1. Hasil Pengujian Solar Tracker 0-20 Detik

Solar Tracker (sec)	Angular Velocity (deg/s)	Worm Motor Torque (Nm)	Worm Motor Power (kW)
0	0	353.712	7.785
2	-664.151	211.239	9.834
4	-692.304	987.757	11.348
6	-692.308	123.407	13.854
8	-692.308	866.625	15.672
10	-692.308	470.938	17.578
12	-692.308	353.421	19.196
14	-692.308	165.374	21.218
16	2.151	150.805	23.761
18	2.253	198.013	25.186
20	105.464	596.053	28.819
22	208.678	934.096	32.452
24	311.892	1272.139	36.085
26	415.106	1610.182	39.718
28	518.32	1948.225	43.351
30	621.534	2286.268	46.984

Gambar 4 menunjukkan bahwa hasil pengujian solar tracker dengan waktu 0-30 detik. Pengujian dilakukan untuk mengidentifikasi perubahan sudut kemiringan, kecepatan perubahan sudut, torsi dan daya motor pada worm gear. Kecepatan sudut, torsi motor, dan daya motor mengalami penurunan dan peningkatan yang fluktuatif seiring dengan energi matahari yang diserap oleh panel surya. Penurunan kecepatan sudut (angular velocity) terlihat pada waktu 2 detik yaitu -664.151 deg/s sampai waktu 10 detik -692.308 deg/s. Hal ini berbeda dengan torsi dan daya motor worm gear yang mengalami peningkatan waktu 2 detik sebesar 211.239 Nm dan 9.834 kW. Peningkatan dan penurunan torsi dan daya motor worm gear terjadi sampai waktu 10 detik (211.239-470.938) Nm.



Gambar 4. Hasil Pengujian Solar Tracker 0-30 Detik

Namun, kecepatan sudut, torsi motor dan daya motor worm gear mengalami peningkatan pada waktu pengujian yaitu 10-20 detik. Peningkatan masing-masing sebesar (2.151-621.534) deg/s, (470.938-2286.268) Nm, dan daya motor (23.761-46.984) kW. Hal ini disebabkan oleh worm gear berputar sebesar 1800 dengan mengikuti arah matahari dan penyesuaian energi cahaya matahari pada panel surya semakin intens. Sehingga perubahan sudut, torsi dan daya motor meningkat. Selain itu, peningkatan disebabkan oleh torsi selalu berbading lurus dengan daya yang dihasilkan oleh motor worm gear. Perubahan arah gerakan worm gear sudut sebesar 900 mengikuti perubahan torsi.

Tabel 2 menjelaskan hasil pengujian solar tracker 30-60 detik dengan percepatan sudut solar tracker berdasarkan velocity, torsi motor worm, dan daya motor worm. Waktu yang dibutuhkan oleh panel surya untuk menghasilkan torsi dan daya yang maksimal diperoleh dengan sudut Worm Angular Velocity (WAV) sebesar 30 deg/s dengan delta T = 14.011 s dan delta Y 27.988 deg/s. Sedangkan waktu untuk mencapai kecepatan sudut, torsi motor, dan daya motor worm gear pada panel surya adalah 60 detik. Kecepatan sudut, torsi dan daya motor meningkat seiring waktu solar tracker mengikuti arah matahari. Hal ini disebabkan oleh torsi worm gear bergerak menyesuaikan sudut solar tracker 00 deg/s sampai 1800 deg/s dengan torsi 2286.268 Nm dan torsi maksimal 7356.913 Nm. Walaupun torsi worm gear yang dihasilkan sebesar 2286.268 Nm pada waktu 30 detik, pada waktu 32 detik torsi gear meningkat 2624.311 Nm yang disebabkan undershoot dan worm gear terkunci. Kondisi daya maksimum terjadi pada waktu 34-60 detik meningkat (50.617-101.479) kW. Jika torsi dan daya melewati kecepatan sudut maksimum, maka worm gear pada kondisi terkunci.

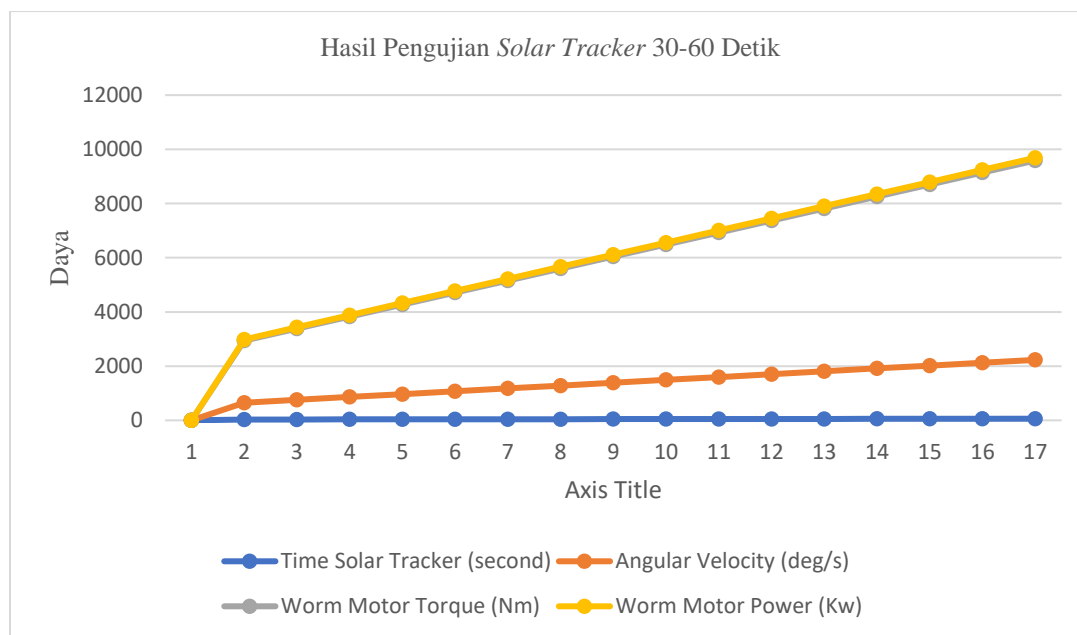
Table 2. Hasil Pengujian Solar Tracker 30-60 Detik

Solar Tracker (sec)	Angular Velocity (deg/s)	Worm Motor Torque (Nm)	Worm Motor Power (kW)
30	621.534	2286.268	46.984
32	724.748	2624.311	50.617

34	827.962	2962.354	54.251
36	931.176	3300.397	57.883
38	1034.39	3638.445	61.516
40	1137.604	3976.483	65.149
42	1240.818	4314.526	68.782
44	1344.032	4652.569	72.415
46	1447.246	4990.612	76.048
48	1550.46	5328.655	79.681
50	1653.674	5666.698	83.314
52	1756.888	6004.741	86.947
54	1860.102	6342.784	90.58
56	1963.316	6680.827	94.213
58	2066.53	7018.870	97.846
60	2169.744	7356.913	101.479

Gambar 5 menunjukkan bahwa hasil pengujian solar tracker dengan waktu 30-60 detik. Pengujian dilakukan untuk mengidentifikasi perubahan sudut kemiringan, kecepatan perubahan sudut, torsi dan daya motor pada worm gear. Kecepatan sudut, torsi motor, dan daya motor mengalami penurunan dan peningkatan yang signifikan seiring dengan energi matahari yang diserap oleh panel surya. Peningkatan kecepatan sudut (angular velocity) terlihat pada waktu 30 detik yaitu 621.534 deg/s, waktu 32 detik yaitu 724.748 deg/s, waktu 34 detik yaitu 827.962 deg/s, waktu 36 detik yaitu 931.176 deg/s, waktu 38 detik yaitu 1034.39 deg/s, waktu 40 detik yaitu 1137.604 deg/s, waktu 42 detik yaitu 1240.818 deg/s, waktu 44 detik yaitu 1344.032 deg/s, waktu 46 detik yaitu 1447.246 deg/s, waktu 48 detik yaitu 1550.46 deg/s, waktu 50 detik yaitu 1653.674 deg/s, waktu 52 detik yaitu 1756.888 deg/s, waktu 54 detik yaitu 1860.102 deg/s, waktu 56 detik yaitu 1963.316 deg/s, waktu 58 detik yaitu 2066.53 deg/s, dan waktu 60 detik adalah 2169.744 deg/s. Hal ini berbeda dengan torsi dan daya motor worm gear yang mengalami peningkatan waktu 32 detik sebesar 2624.311 Nm dan 50.617 kW. Peningkatan torsi dan daya motor worm gear terjadi sampai waktu 60 detik (2286.268-7356.913) Nm.

Kecepatan sudut, torsi motor dan daya motor worm gear mengalami peningkatan pada waktu pengujian yaitu 32-60 detik. Peningkatan masing-masing sebesar (724.748-2169.744) deg/s, (2624.311-7356.913) Nm, dan daya motor (50.617-101.479) kW. Hal ini disebabkan oleh worm gear berputar sebesar 1800 dengan mengikuti arah matahari dan penyearapan energi cahaya matahari pada panel surya semakin intens. Sehingga perubahan sudut, torsi dan daya motor meningkat. Selain itu, peningkatan disebabkan oleh torsi selalu berbading lurus dengan daya yang dihasilkan oleh motor worm gear. Perubahan arah gerakan worm gear sudut sebesar 900 mengikuti perubahan torsi.



Gambar 5. Hasil Pengujian Solar Tracker 30-60 Detik

5. KESIMPULAN

Desain teknologi dual-axis solar tracker untuk mengukur sudut, torsi dan daya motor worm gear pada panel surya di lahan buah naga di Banyuwangi. Desain teknologi solar tracker menggunakan worm gear yang terdiri dari poros berulir spiral untuk menggerakkan roda bergigi dengan sudut putar 1800. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa kecepatan sudut, torsi dan daya yang meningkat signifikan. Pengukuran dual-axis solar tracker dengan waktu 2-30 detik diperoleh sudut, torsi dan daya motor worm gear sebesar waktu 0 detik yaitu - 664.151 deg/s sampai waktu 30 detik 621.534 deg/s. Sedangkan hasil pengukuran dengan waktu 30-60 detik menghasilkan kecepatan sudut 621.534-2169.744 deg/s. Selanjutnya pengukuran pada torsi motor worm gear pada waktu 0-30 detik diperoleh 353.712-2286.268 Nm, dan pengukuran torsi motor pada waktu 30-60 detik menghasilkan nilai 2286.268-7356.913 Nm. Pengukuran daya motor worm gear dengan waktu 2-30 detik menghasilkan rata-rata daya sebesar 7.785-46.984 kW, dan pengukuran daya motor pada waktu 30-60 detik dihasilkan daya sebesar 46.984-101.479 kW.

REFERENSI

- [1] K. W. Fauzi, T. Arfianto, and N. Taryana, "Perancangan dan Realisasi Solar Tracking System untuk Peningkatan Efisiensi Panel Surya Menggunakan Arduino Uno," TELKA, vol. 4, no. 1, pp. 64–75, 2018. <https://doi.org/10.15575/telka.v4n1.63-74>
- [2] A. Tasrif, "Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia," Indonesia, 2022. Available <https://www.esdm.go.id/>
- [3] R. Repice and A. Sun, "Monthly Energy Review," Department of Energy Washington DC, Sep. 2022. [Online]. Available: www.eia.gov/mer
- [4] E. Syahril, "Statistik Minyak dan Gas Bumi 2019 Oil and Gas Statistics," Indonesia, 2019. [Online]. Available: <http://www.migas.esdm.go.id/>
- [5] A. P. Afin and B. F. T. Kiono, "Potensi Energi Batubara serta Pemanfaatan dan Teknologinya di Indonesia Tahun 2020 – 2050: Gasifikasi Batubara," Jurnal Energi Baru dan Terbarukan, vol. 2, no. 2, pp. 144–122, Jul. 2021, doi: <https://doi.org/10.14710/jebt.2021.11429>

- [6] T. Pamudji and A. W. Kencono, "Perkembangan Penyediaan dan Pemanfaatan Migas Batu Bara," Edisi Pertama., vol. 1, Jakarta: Pusat Data dan Teknologi Informasi Energi dan Sumber Daya Mineral Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2015, pp. 1–189. Available at <https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-pemodelan-dan-prakiraan-penyediaan-dan-pemanfaatan-migas-batubara-ebt-listrik.pdf>
- [7] C. M. Yasin et al., "Road Map Pengembangan dan Pemanfaatan Batubara," Jakarta, Oct. 2021. Available at <https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-buku-road-map-pengembangan-dan-pemanfaatan-batubara.pdf>
- [8] J. Rezkyanzah, L. P. Purba, and C. A. Putra, "Perancangan Solar Tracker Berbasis Arduino Sebagai Penunjang Sistem Kerja Solar Cell Dalam Penyerapan Energi Matahari," SCAN Jurnal Teknologi dan Komunikasi, vol. XI, no. 2, pp. 55–60, 2016. doi: <https://doi.org/10.33005/scan.v11i2.646>
- [9] K. al Faizal, M. Rumbayan, and S. Silimang, "Perencanaan Instalasi Solar Home System," Repository Universitas Sam Ratulagi, pp. 1–14, 2021. Available <http://repo.unsrat.ac.id/3412/>
- [10] Tanwir, S. Widiastuti, and A. Muid Fabanyo, "Penyerapan Energi Matahari Pada Solar Cell Dengan Menggunakan Sistem Tracking," Jurnal Teknik Mesin Universitas Sains dan Teknologi Jayapura, vol. 8, no. 2, pp. 13–25, 2019. Available <https://ojs.ustj.ac.id/mesin/article/view/641>
- [11] A. Fauzan, "Solar Tracking System Untuk Mengoptimalkan Penyerapan Energi Matahari Pada Panel Surya Menggunakan Mikrokontroler Atmega 16," Repository Universitas Muhammadiyah Jember, pp. 1–12, Jun. 2016, Accessed: Oct. 04, 2022. [Online]. Available: <http://repository.unmuhjember.ac.id/id/eprint/396>
- [12] E. Yohana and Darmanto, "Uji Eksperimental Pengaruh Sudut Kemiringan Modul Surya 50 Watt-Peak Dengan Posisi Megikuti Pergerakan Arah Matahari," Jurnal MEKANIKA, vol. 11, no. 1, pp. 25–30, 2012. Available at <https://jurnal.ft.uns.ac.id/index.php/mekanika/article/view/103>
- [13] I. M. Benny, I. Bgs, A. Swamardika, I. Wyn, A. Wijaya, and J. T. Elektro, "Rancang Bangun Sistem Tracking Panel Surya Berbasis Mikrokontroler Arduino," E-Journal SPEKTRUM, vol. 2, no. 2, 2015. Available at <https://ojs.unud.ac.id/index.php/spektrum/article/view/20023>
- [14] Z. Lubis and S. Aryza, "Peningkatan Penangkapan Cahaya Pembangkit Listrik Tenaga Surya Menggunakan Empat Titik Berbasis Mikrokontroler," Jurnal Elektro dan Telekomunikasi, vol. 8, no. 2, pp. 54–68, 2021. Availabel at <https://jurnal.pancabudi.ac.id/index.php/elektrotelkomunikasi/article/view/4110/3768>
- [15] I. Winarno, F. Wulandari, H. Tuah Surabaya Jl Arif Rahman Hakim, and S. Jawa Timur, "Solar Tracking System Single Axis Pada Solar Sel Untuk Mengoptimalkan Daya Dengan Metode Adaptive Neurofuzzy Inference System (ANFIS)," in Seminar Nasional Sains dan Teknologi, Nov. 2017, pp. 1–10. Available at <https://jurnal.umj.ac.id/index.php/semnastek/article/view/1903>
- [16] A. Sowandhana, A. Uji Krismanto, and I. Budi Sulistiwati, "Analisa Kinerja Solar Tracker Single Axis dengan Metode Neuro Fuzzy," in Seminar Nasional 2022 SENIATI 2022 METAVERSE, Jun. 2022, vol. 13, pp. 619–627. doi: <https://doi.org/10.36040/seniati.v6i3.4853>

- [17] W. Yandi and A. Basrah Pulungan, "Tracker Tiga Posisi Panel Surya Untuk Peningkatan Konversi Energi Dengan Catu Daya Rendah," *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, vol. 6, no. 3, 2017, doi: <https://doi.org/10.20449/jnte.v6i3.468>
- [18] E. Eko, P. Optimalisasi, P. Daya, E. E. Prasetyo, G. Marausna, and D. W. Nugroho, "Optimalisasi Pembangkitan Daya Panel Surya 200 WP Menggunakan Solar Tracker System Dual Axis," 2022. <https://doi.org/10.22146/jnteti.v11i3.4143>
- [19] M. Yusak, M. Jasa' Afroni, and F. Rahman, "Pelacak Surya Otomatis Berbasis IoT," *SCIENCE ELECTRO*, vol. 15, no. 1, pp. 1–7, 2022. Available at <http://repository.unisma.ac.id/handle/123456789/5369>
- [20] Putriani, M. Basyir, and Muhaimin, "Sistem Monitoring Alat Uji Karakteristik Panel Surya Berbasis Mikrokontroler," *JURNAL TEKTRONIKA*, vol. 3, no. 2, pp. 102–112, Sep. 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.30811/tektro.v3i2.1552>
- [21] A. W. Utama, "Rancang Bangun Solar Tracker dengan Sensor Light Dependent Resistor Berbasis Arduino," *Jurnal Citra Widya Edukasi*, vol. XI, no. 1, pp. 101–118, 2019. Available at https://journal.poltekcwe.ac.id/index.php/jurnal_citrawidyaedukasi/article/view/192
- [22] Samsurizal, A. Makkulau, and Christiono, "Analisis Pengaruh Sudut Kemiringan Terhadap Arus Keluaran Pada Photovoltaic Dengan Menggunakan Regretion Quadratic Method," *JURNAL ENERGI & KELISTRIKAN*, vol. 10, no. 2, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.33322/energi.v10i2.286>
- [23] Pangestuningtyas D and K. Hermawan, "Analisis Pengaruh Sudut Kemiringan Panel Surya Terhadap Radiasi Matahari Yang Diterima Oleh Panel Surya Tipe Larik Tetap," *Jurnal TRANSIENT*, vol. 2, no. 4, pp. 930–937, 2013. doi: <https://doi.org/10.14710/transient.v2i4.930-937>
- [24] A. Masih and I. Odinaev, "Performance Comparison of Dual Axis Solar Tracker with Static Solar System in Ural Region of Russia," in *2019 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)*, 2019, pp. 375–378. doi: [10.1109/USBREIT.2019.8736642](https://doi.org/10.1109/USBREIT.2019.8736642)
- [25] R. Khotama, D. B. Santoso, and A. Stefanie, "Perancangan Sistem Optimasi Smart Solar Electrical pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dengan Metode Tracking Dual Axis Technology," *Jurnal Ecotipe (Electronic, Control, Telecommunication, Information, and Power Engineering)*, vol. 7, no. 2, pp. 78–84, Oct. 2020, doi: <https://doi.org/10.33019/jurnalecotipe.v.7i2.1887>
- [26] A. D. Putra, A. B. Pulungan, and I. Yelfianhar, "Optimalisasi Penyerapan Energi Matahari Menggunakan Sistem Solar Tracking Dua Sumbu," *JTEV (Jurnal Teknik Elektro Dan Vokasional)*, vol. 06, no. 02, pp. 187–197, 2020, [Online]. Available: <http://ejournal.unp.ac.id/index.php/jtev/index>
- [27] Y. H. Anoi, A. Yani, and Y. W., "Analisis Sudut Panel Solar Cell Terhadap Daya Output dan Efisiensi Yang Dihasilkan," *Turbo J. Progr. Stud. Tek. Mesin*, vol. 8, no. 2, pp. 0–5, 2020, doi: <https://doi.org/10.24127/trb.v8i2.1051>
- [28] P. Baltas, M. Tortoreli, and P. E. Russell, "Evaluation of Power Output for Fixed and Step Tracking Photovoltaic Arrays," *Solar Energy*, vol. 37, no. 2, pp. 147–163, 1986.
- [29] K. S. Karimov, M. A. Saqib, P. Akhter, M. M. Ahmed, J. A. Chattha, and S. A. Yousafzai, "A simple photo-voltaic tracking system," in *Solar Energy Materials and*

- Solar Cells, May 2005, vol. 87, no. 1–4, pp. 49–59. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2004.08.010>
- [30] C. Alexandru and C. Pozna, “Simulation of a dual-axis solar tracker for improving the performance of a photovoltaic panel,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, vol. 224, no. 6, pp. 797–811, Jan. 2010, doi: <https://doi.org/10.1243/09576509JPE871>
- [31] M. B. Prakash and K. Govindarajulu, “Analysis and Testing of Dual Axis Solar Tracker for Standalone PV Systems using Worm Gear,” *International Journal for Modern Trends in Science and Technology*, vol. 8, no. 01, pp. 1–8, Dec. 2022, doi: <https://doi.org/10.46501/IJMTST0801001>
- [32] A. Dyah Afriyani et al., “Analisis Pengaruh Posisi Panel Surya Terhadap Daya Yang Dihasilkan di PT Lentera Bumi Nusantara,” in *Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta*, 2019, pp. 176–183. [Online]. Available: <http://semnas.mesin.pnj.ac.id>
- [33] A. Smith, “Dual-Axis Solar Tracker,” Thesis, Central Washington University, United State of America, 2019. [Online]. Available: <https://digitalcommons.cwu.edu/undergradproj>
- [34] A. Wibowo, *Instalasi Panel Listrik Surya*, 1st ed., vol. 1. Semarang: Yayasan Prima Agus Teknik, 2022.
- [35] O. Krol, “Modeling of Worm Gear Design with Non-clearance Engagement,” in *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2021, pp. 36–46. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-54814-8_5
- [36] P. Melnikov and S. Schegoleva, “Methods of increasing the efficiency of the worm gear,” *MATEC Web of Conferences*, vol. 298, p. 00001, 2019, doi: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201929800001>
- [37] Z. Zengwei, Z. Zhen, J. Yongfeng, L. Haolin, and Z. Shengcheng, “Performance analysis on bifacial pv panels with inclined and horizontal east-west sun trackers,” *IEEE J Photovolt*, vol. 9, no. 3, pp. 636–642, May 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2899472>
- [38] S. Azmi, Y. Away, and I. Devi Sara, “Kajian Aspek Kecepatan dan Ketepatan pada Sun Tracker Dua Sumbu Berbasis Sensor Berbentuk Tetrahedron,” *Jurnal Rekayasa ElektriKa*, vol. 15, no. 2, Sep. 2019, doi: <https://doi.org/10.17529/jre.v15i2.13546>
- [39] Y. R. Al-Saadi, M. S. Tapou, A. A. Badi, S. Abdulla, and M. Diykh, “Developing Smart Self Orienting Solar Tracker for Mobile PV Power Generation Systems,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 79090–79099, 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3194026>
- [40] C. D. Rodriguez-Gallegos, O. Gandhi, S. K. Panda, and T. Reindl, “On the PV Tracker Performance: Tracking the Sun Versus Tracking the Best Orientation,” *IEEE J Photovolt*, vol. 10, no. 5, pp. 1474–1480, Sep. 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2020.3006994>
- [41] T. Takayama and N. Hisamatsu, “Worm gear mechanism with switchable backdrivability,” *ROBOMECH Journal*, vol. 6, no. 1, Dec. 2019, doi: <https://doi.org/10.1186/s40648-019-0149-7>

- [42] H. A. Santoso, "Design and Construction Single Axis (Azimuth) Solar Tracking System Using Pid Control," Tugas Akhir, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2014.
- [43] J. Wu, X. Chen, and L. Wang, "Design and Dynamics of a Novel Solar Tracker with Parallel Mechanism," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 21, no. 1, pp. 88–97, Feb. 2016, doi: <https://doi.org/10.1109/TMECH.2015.2446994>
- [44] T. V. Tran and W. Y. Chung, "High-Efficient Energy Harvester with Flexible Solar Panel for a Wearable Sensor Device," *IEEE Sens J*, vol. 16, no. 24, pp. 9021–9028, Dec. 2016, doi: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2616114>
- [45] H. Fathabadi, "Novel online sensorless dual-axis sun tracker," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 22, no. 1, pp. 321–328, Feb. 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/TMECH.2016.2611564>
- [46] H. Wang and J. Shen, "Analysis of the Characteristics of Solar Cell Array Based on MATLAB/Simulink in Solar Unmanned Aerial Vehicle," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 21195–21201, Apr. 2018, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2802927>
- [47] J. A. Carrasco, F. G. de Quiros, H. Alaves, and M. Navalon, "An analog maximum power point tracker with pulsewidth modulator multiplication for a solar array regulator," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 34, no. 9, pp. 8808–8815, Sep. 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2886887>