

© Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi
Karya ini berada di bawah Lisensi Creative Commons Atribusi-BerbagiSerupa 4.0 Internasional
Terjemahan dari 10.22146/jnteti.v13i4.12765

Pengoptimalan Efisiensi Panel Surya: Integrasi Pelacakan dan Reflektor Sumbu Ganda Tenaga Surya

Alvin Rinaldi Wiharja¹, Levin Halim¹, Faisal Wahab¹

¹ Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Katolik Parahyangan, Bandung, Jawa Barat 40141, Indonesia

[Diserahkan: 25 April 2024, Direvisi: 18 Juni 2024, Diterima: 8 Oktober 2024]
Penulis Korespondensi: Levin Halim (email: halimlevin@unpar.ac.id)

INTISARI — Panel surya memiliki efisiensi yang relatif rendah, tetapi kinerjanya dapat ditingkatkan dengan sistem pelacakan, yaitu panel diarahkan tegak lurus terhadap sumber cahaya dan reflektor ditambahkan untuk menangkap lebih banyak sinar matahari. Metode pelacakan surya sumbu ganda, yang menggunakan dua aktuator linier dan dioptimalkan dengan logika *fuzzy*, secara efisien memosisikan panel surya untuk memperoleh paparan sinar matahari secara maksimal. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi panel surya secara keseluruhan dengan mengintegrasikan reflektor dengan sistem pelacakan surya sumbu ganda yang dioptimalkan dengan logika *fuzzy*. Secara spesifik, penelitian ini menguji berbagai reflektor untuk menentukan peningkatan efisiensi yang paling signifikan. Penelitian ini terdiri atas dua pengujian, yaitu uji pelacakan dan uji reflektor menggunakan lampu halogen. Uji pelacakan dilakukan dengan memosisikan cahaya pada empat posisi yang berbeda. Dari pengujian, diperoleh data sensor cahaya sebelum dan sesudah pelacakan surya, yang mengindikasikan bahwa pelacakan berhasil. Semua pengujian ini dilakukan dengan radiasi sumber cahaya 1.168 W/m². Penelitian ini menyimpulkan bahwa sistem pelacakan secara efektif memosisikan panel surya ke arah sumber cahaya, dengan waktu pelacakan berkisar antara 12 s hingga 16 s, tergantung pada posisinya. Foil aluminium adalah reflektor yang paling hemat biaya, dengan harga Rp5.341 tiap 1% peningkatan efisiensi, dibandingkan dengan cermin dengan harga Rp20.204 tiap 1% peningkatan efisiensi dan pita reflektif dengan harga Rp48.034 tiap 1% peningkatan efisiensi. Kesimpulannya adalah integrasi reflektor foil aluminium dan sistem pelacakan matahari sumbu ganda, yang dioptimalkan dengan logika *fuzzy*, secara signifikan meningkatkan efisiensi panel surya, yang hemat biaya dan efisien.

KATA KUNCI — Efektivitas Biaya, Pelacakan Surya Sumbu Ganda, Logika *Fuzzy*, Reflektor, Efisiensi Panel Surya.

I. PENDAHULUAN

Seiring dengan berkembangnya peradaban, konsumsi energi terus meningkat [1]. Lebih banyak energi akan dibutuhkan dalam waktu dekat untuk mempertahankan perkembangan manusia. Solusi utamanya adalah dengan membakar lebih banyak bahan bakar fosil [2]. Namun, ketersediaan bahan bakar fosil saat ini makin berkurang [3]. Hal ini menyebabkan harga sumber daya ini meningkat [4]. Selain itu, pembakaran bahan bakar fosil juga tidak ramah lingkungan karena menimbulkan banyak polusi. Oleh karena itu, diperlukan sumber energi baru yang ramah lingkungan dan dapat diperbarui secara terus-menerus [5]. Energi terbarukan memecahkan masalah keterbatasan energi fosil dan dapat mengurangi polusi [6]. Energi terbarukan dihasilkan dari sumber-sumber alam dan akan habis dalam waktu yang sangat lama. Energi surya, angin, dan air merupakan bagian dari energi terbarukan [7]. Energi surya berasal dari matahari dan jumlahnya sangat melimpah [8]. Indonesia merupakan negara khatulistiwa, sehingga sinar matahari yang masuk ke Indonesia sangat maksimal [9]. Pembangkit listrik dari energi matahari menggunakan alat khusus yang mengubah sinar matahari menjadi energi listrik. Alat ini biasa disebut sebagai panel surya.

Berdasarkan sistem pergerakannya, panel surya dibagi menjadi statis dan aktif [10]. Panel surya statis memiliki kelemahan karena panel surya tidak dapat bergerak saat matahari bergerak dari timur ke barat [11], sehingga terkadang panel surya tidak menghasilkan energi yang efisien [12]. Untuk mendapatkan tenaga surya yang maksimal, panel surya harus selalu menghadap ke arah matahari [13]. Posisi matahari akan berubah-ubah tergantung pada rotasi bumi, sehingga panel surya harus dapat mengikuti pergerakan ini [14]. Panel surya

aktif dibagi menjadi dua jenis pergerakan, yaitu sumbu tunggal dan sumbu ganda [15]. Panel surya sumbu tunggal hanya memiliki satu aktuator yang dapat menggerakkan panel surya secara bebas (360°) [16], [17]. Sebaliknya, panel surya sumbu ganda memiliki dua aktuator yang bergerak secara horizontal dan vertikal [18], [19].

Selain sistem pelacakan surya, peningkatan efisiensi daya keluaran juga dapat dilakukan dengan menggunakan reflektor. Menurut penelitian sebelumnya, reflektor berupa cermin dapat meningkatkan efisiensi sebesar 24% [15]. Selain itu, reflektor cermin meningkatkan efisiensi dengan biaya seminimal mungkin. Penambahan reflektor foil aluminium dapat meningkatkan daya dari 4,87 W menjadi 6,9 W [20]. Data tersebut diambil dari daya keluaran rata-rata dari jam 7 pagi sampai jam 5 sore. Kemudian, penelitian lain menemukan bahwa pita reflektif dapat digunakan sebagai reflektor untuk memantulkan cahaya matahari dengan koefisien reflektif sebesar 70,6% [21]. Berdasarkan [22], sudut reflektor yang digunakan untuk pemantulan sinar matahari dengan panel surya yang maksimal adalah 112,5°. Sementara itu, pada [23], pelacakan surya dibuat dengan menggunakan metode logika *fuzzy* yang secara efektif dapat meningkatkan efisiensi panel surya.

Meskipun demikian, masih diperlukan identifikasi efektivitas biaya dari kombinasi sistem pelacakan dan reflektor yang dapat memaksimalkan efisiensi panel surya. Penelitian ini bertujuan untuk mengisi kesenjangan tersebut dengan mengintegrasikan pelacakan surya sumbu ganda dengan berbagai bahan reflektor dan mengoptimalkan sistem menggunakan logika *fuzzy*. Perbandingan komprehensif dari berbagai bahan reflektor dengan sistem pelacakan, yang

memberikan analisis rinci tentang peningkatan efisiensi dan efektivitas biaya, merupakan kebaruan penelitian ini. Di sisi lain, potensi untuk menawarkan solusi praktis dan hemat biaya guna meningkatkan kinerja panel surya adalah tujuan utama penelitian ini.

Penelitian ini membandingkan efisiensi keluaran dari sistem pelacakan matahari sumbu ganda dengan menambahkan tiga jenis reflektor yaitu cermin, foil aluminium, dan pita reflektif, kemudian diimplementasikan pada panel surya 50 WP menggunakan metode logika *fuzzy* Sugeno. Pendekatan Sugeno dipilih karena penanganan sistem nonlinier dan penerimaan masukan yang tidak sempurna [24]. Pendekatan ini mengatur kontrol canggih yang diperlukan untuk pelacakan dua sumbu, yang harus beradaptasi dengan perubahan sinar matahari. Sensor cahaya memberi tahu pengontrol logika *fuzzy* posisi penempatan panel surya untuk penyelarasan matahari yang optimal, sehingga meningkatkan akurasi dan efisiensi sistem pelacakan. Selain membandingkan efisiensi panel surya, perbandingan harga setiap reflektor yang digunakan untuk setiap peningkatan efisiensi panel surya juga dianalisis.

II. METODOLOGI

Efisiensi adalah parameter yang paling sering digunakan untuk membandingkan kinerja panel surya. Salah satu kuantitas yang menjadi parameter efisiensi panel surya adalah faktor pengisian [10]. Perhitungan faktor pengisian menunjukkan rasio daya maksimum yang diperoleh dari panel surya terhadap hasil kali V_{oc} dan I_{sc} , berdasarkan (1) [25].

$$FF = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (1)$$

FF menunjukkan faktor pengisian, V_{mp} menunjukkan tegangan pada daya maksimum (V), I_{mp} menunjukkan arus pada daya maksimum (A), V_{oc} menunjukkan tegangan maksimum panel surya dalam kondisi rangkaian terbuka (V), dan I_{sc} menunjukkan arus maksimum panel surya saat hubung singkat (A). Makin mendekati 1 nilai faktor pengisian panel surya, makin tinggi efisiensi panel surya tersebut. Berdasarkan (1), besar kecilnya faktor pengisian bergantung pada nilai V_{oc} dan I_{sc} .

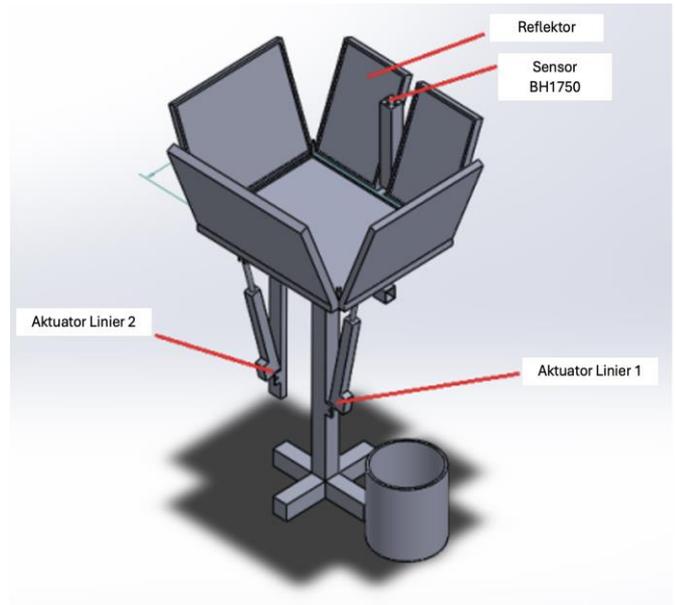
Efisiensi adalah rasio keluaran energi dari panel surya terhadap masukan energi dari matahari. Efisiensi panel surya bergantung pada beberapa faktor, termasuk spektrum dan intensitas sinar matahari, sudut datangnya sinar, suhu, peneduh, dan kualitas bahan panel surya. Oleh karena itu, satu perangkat dan perangkat lainnya harus digunakan dengan hati-hati untuk efisiensi yang lebih baik. Efisiensi panel surya dapat didefinisikan sebagai (2).

$$\eta = \frac{V_{oc} \times I_{sc} \times FF}{SI \times A} \quad (2)$$

V_{oc} menunjukkan tegangan rangkaian terbuka panel surya (V), I_{sc} menunjukkan arus hubung singkat panel surya (A), FF menunjukkan faktor pengisian, SI menunjukkan iradiasi matahari (W/m^2), dan A menunjukkan luas permukaan panel surya (m^2).

A. DESAIN SISTEM

Sistem ini terdiri atas sebuah panel surya, empat sensor cahaya, dua aktuator linier, dan sebuah reflektor. Setiap sensor diposisikan di empat posisi yang berbeda, yaitu timur, barat, utara, dan selatan. Menurut Gambar 1, aktuator linier pertama akan menggerakkan panel surya secara horizontal dengan membandingkan intensitas cahaya di timur dan barat. Aktuator



Gambar 1. Tampilan isometrik dari desain sistem.

linier kedua akan menggerakkan panel surya secara vertikal dengan membandingkan intensitas cahaya di utara dan selatan. Reflektor dipasang dengan parameter lebar 40,6 cm dan panjang yang disesuaikan dengan ukuran panel surya, yaitu 625 mm.

B. PENGUJIAN SISTEM PELACAKAN

Untuk memvalidasi proses pelacakan, diperlukan rangkaian listrik yang dirangkai dan digabungkan pada kutub tengah panel surya. Komponen elektriknya adalah empat buah sensor BH1750 yang diposisikan seperti pada Gambar 2, kemudian dihubungkan ke multiplexer PCA7948A, lalu multiplexer dihubungkan ke Arduino Uno. Sebuah catu daya 12 V/10 A digunakan sebagai sumber daya dan *driver* motor yang digunakan adalah BTS7960. Rangkaian elektronik sistem pelacakan diperlihatkan pada Gambar 3. Pembuktian pelacakan dilakukan dengan memosisikan sumber cahaya pada empat posisi yang berbeda, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Kemudian, data nilai *lux* dari sensor BH1750 diambil sebagai bukti awal sebelum proses pelacakan. Selanjutnya, pelacakan dilakukan. Setelah berjalan, pelacakan akan berhenti ketika nilai dari keempat sensor BH1750 berada di atas 400 dan kedua motor tidak lagi bergerak, yang menandakan bahwa panel surya dan keempat sensor sudah mengarah ke sumber cahaya.

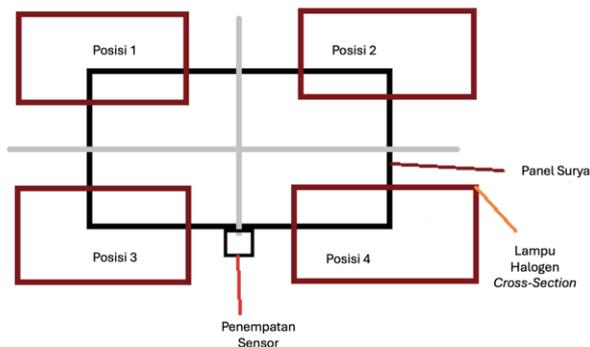
C. PENGUKURAN DATA

Pengumpulan data V_{oc} dan I_{sc} dilakukan menggunakan multimeter digital dengan menempatkan lampu halogen di atas panel surya. Terdapat empat skema pengumpulan data: (a) panel surya tanpa reflektor, (b) panel surya + reflektor cermin, (c) panel surya + reflektor foil aluminium, dan (d) panel surya + reflektor pita reflektif.

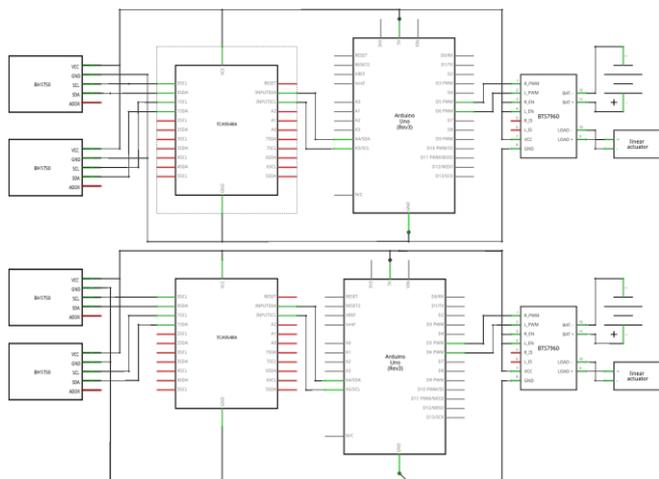
Pengambilan data V_{oc} dan I_{sc} membantu mengukur peningkatan efisiensi panel surya sebelum dan sesudah penambahan reflektor dan mengetahui reflektor yang terbaik dari segi nilai efisiensi yang ditambahkan dan harga. Pengambilan data V_{oc} dan I_{sc} dilakukan dengan menggunakan multimeter digital pada keluaran panel surya. Kondisi pertama yang diuji adalah panel surya tanpa reflektor dengan memosisikan lampu halogen tegak lurus dengan panel surya tanpa reflektor.

TABEL I
DATA LUX POSISI 1

Waktu (s)	Sensor 1 (Utara) (lx)	Sensor 2 (Barat) (lx)	Sensor 3 (Selatan) (lx)	Sensor 4 (Timur) (lx)
1	157,50	100,83	23,33	158,33
2	210,00	105,00	31,67	157,50
3	212,50	112,50	47,50	177,50
4	279,33	134,17	70,00	198,33
5	286,67	143,33	118,33	198,33
6	359,17	153,33	211,67	203,33
7	370,00	149,17	241,33	199,50
8	370,83	143,33	290,17	287,00
9	372,50	186,67	318,33	319,17
10	415,00	312,50	368,33	342,50
11	419,17	371,67	398,33	395,83
12	421,67	401,67	408,33	410,83
13	418,33	403,33	414,00	406,67
14	415,00	407,00	408,50	409,50
15	418,50	413,83	417,33	407,17
16	413,50	412,17	410,33	411,00
17	421,33	409,00	411,17	407,33
18	412,83	405,50	411,33	413,83
19	412,17	413,00	417,50	405,00
20	411,00	410,50	412,00	408,33



Gambar 2. Posisi sumber cahaya.



Gambar 3. Skema secara keseluruhan.

III. HASIL DAN DISKUSI

A. HASIL PELACAKAN MATAHARI

Data *lux* diperlukan sebelum memantau setiap posisi (Gambar 2). Sementara itu, data *lux* juga diperlukan setelah pelacakan untuk membuktikan bahwa pelacakan berjalan dan panel surya telah diposisikan dengan benar, yaitu tegak lurus terhadap sumber cahaya. Pada posisi 1, pembacaan *lux* awal menunjukkan bahwa sensor utara dan timur lebih signifikan, mengindikasikan bahwa posisi cahaya berada di kanan atas (Gambar 2). Hasil pembacaan sensor di atas 400 menunjukkan bahwa sumbu telah memosisikan panel surya tegak lurus terhadap sumber cahaya. Hal ini didasarkan pada kalibrasi sensor cahaya yang digunakan dalam sistem. Pada kalibrasi, ditentukan bahwa pembacaan *lux* 400 atau lebih tinggi berkaitan dengan intensitas cahaya maksimum yang dapat dideteksi oleh sensor, yang terjadi ketika panel surya menghadap sumber cahaya tegak lurus dengan permukaan panel surya.

Sebagai contoh, pembacaan sensor 1 dan 3 mulai di atas 400 pada detik ke-10 untuk sensor 1 dan detik ke-12 untuk sensor 3, yang mengindikasikan bahwa sumbu vertikal tetap berada pada detik ke-12. Pada sumbu horizontal, pembacaan sensor 2, seperti halnya dua sensor lainnya, berada di atas 400 pada detik ke-12. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa proses pelacakan berhasil dilakukan dari posisi awal sejajar dengan tanah ke posisi 1, dengan membutuhkan waktu 12 s. Pembacaan *lux* pada sumbu horizontal memperoleh nilai tertinggi 413,83 lx dan nilai terendah 100,83 lx. Nilai terendah dan tertinggi tersebut berada pada rentang masukan metode logika *fuzzy*, yang masukan tersebut dibagi menjadi tiga

kategori, yaitu gelap, normal, dan terang. Kemudian, tabel aturan yang telah dibuat diaplikasikan dengan hasil yang diperoleh berupa pergerakan aktuator linier, searah jarum jam, berlawanan arah jarum jam, atau diam. Sebagai contoh, dari detik ke-9 hingga detik ke-10, aktuator linier bergerak searah jarum jam karena nilai pembacaan sensor barat dikategorikan sebagai gelap pada masukan logika *fuzzy* dan nilai pembacaan sensor timur dikategorikan sebagai terang. Tabel I menunjukkan data dari nilai *lux* awal sebelum menjalankan sistem pelacakan hingga pelacakan berhasil.

Pada posisi 2, pembacaan *lux* awal menunjukkan bahwa sensor utara dan barat lebih signifikan, yang mengindikasikan bahwa posisi cahaya berada di kiri atas (Gambar 2). Pembacaan sensor di atas 400 menunjukkan bahwa sumbu tersebut telah mengarahkan panel surya tegak lurus terhadap sumber cahaya. Sebagai contoh, pembacaan sensor 1 dan 3 pada sumbu vertikal mulai di atas 400 pada detik ke-14. Sementara itu, pembacaan sensor 2 berada di atas 400 pada sumbu horizontal pada detik ke-13 dan sensor 4 pada detik ke-14. Jadi, dapat disimpulkan bahwa proses pelacakan berhasil dari posisi awal dengan posisi paralel. Sementara itu, perubahan posisi dari sejajar tanah ke posisi 2 membutuhkan waktu 14 s. Pembacaan nilai *lux* pada sumbu horizontal memiliki nilai tertinggi sebesar 424,17 lx dan nilai terendah sebesar 96,67 lx. Nilai terendah dan tertinggi tersebut berada pada rentang masukan metode logika *fuzzy*. Masukan tersebut dibagi menjadi tiga kategori, yaitu gelap, normal, dan terang. Kemudian, tabel aturan yang telah dibuat diaplikasikan. Hasil yang diperoleh berupa pergerakan aktuator linier searah jarum jam, berlawanan arah jarum jam, atau diam. Sebagai contoh, pada detik ke-7 hingga detik ke-8, pergerakan aktuator linier dibalik (berlawanan arah jarum jam) karena nilai pembacaan sensor barat dikategorikan normal pada masukan logika *fuzzy*, sedangkan nilai pembacaan sensor timur dikategorikan gelap. Tabel II menunjukkan data dari nilai *lux* awal sebelum menjalankan sistem pelacakan hingga pelacakan berhasil.

TABEL II
DATA LUX POSISI 2

Waktu (s)	Sensor 1 (Utara) (lx)	Sensor 2 (Barat) (lx)	Sensor 3 (Selatan) (lx)	Sensor 4 (Timur) (lx)
1	100,83	158,33	25,83	96,67
2	154,17	172,50	51,67	116,67
3	158,33	172,50	84,17	116,67
4	205,83	184,17	93,33	145,83
5	209,17	185,83	109,17	170,83
6	302,50	206,67	133,33	170,00
7	317,50	224,17	150,83	183,33
8	317,50	263,33	161,67	210,83
9	319,17	305,00	190,67	263,33
10	329,17	383,83	233,33	294,17
11	353,33	391,67	312,50	342,50
12	356,67	399,17	365,00	371,67
13	389,33	410,83	385,83	385,83
14	425,00	413,67	414,17	401,17
15	424,17	419,17	410,83	411,67
16	425,33	411,67	421,67	413,33
17	419,17	424,17	422,50	420,00
18	420,17	420,50	418,50	416,83
19	420,33	424,17	417,50	420,33
20	423,00	420,00	422,83	423,33

Pada posisi 3, pembacaan *lux* awal menunjukkan bahwa sensor selatan dan sensor barat lebih signifikan, yang mengindikasikan bahwa posisi cahaya berada di kiri bawah (Gambar 2). Pembacaan sensor di atas 400 menunjukkan bahwa sumbu yang memosisikan panel surya tegak lurus dengan sumber cahaya. Sebagai contoh, pembacaan sensor 1 dan 3 pada sumbu vertikal mulai di atas 400 pada detik ke-12. Sementara itu, pada sumbu horizontal, pembacaan sensor 2 mulai di atas 400 pada detik ke-10 dan pembacaan sensor 4 di atas 400 pada detik ke-12. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa waktu pelacakan dari posisi mulai sejajar dengan tanah sampai posisi 3 adalah 12 s. Pembacaan nilai *lux* pada sumbu horizontal memiliki nilai tertinggi 422,17 lx dan nilai terendah 52,5 lx. Nilai terendah dan tertinggi ini adalah rentang masukan dari metode logika *fuzzy*. Masukan dibagi menjadi tiga kategori, yaitu gelap, normal, dan terang. Sebagai contoh, dari detik ke-8 hingga detik ke-9, aktuator linier bergerak searah jarum jam karena nilai pembacaan sensor barat dikategorikan sebagai terang pada masukan logika *fuzzy* dan nilai pembacaan sensor timur dikategorikan sebagai normal. Tabel III menunjukkan data dari nilai *lux* awal sebelum menjalankan sistem pelacakan hingga pelacakan berhasil.

Pada posisi 4, pembacaan *lux* awal menunjukkan bahwa sensor timur dan selatan signifikan, yang menunjukkan bahwa cahaya berada di kanan bawah (Gambar 2). Pembacaan sensor yang berada di atas 400 menunjukkan bahwa pelacakan telah berhasil memosisikan panel surya secara tegak lurus terhadap sumber cahaya. Sebagai contoh, pada sumbu vertikal, pembacaan sensor 1 mulai di atas 400 pada detik ke-16 dan pembacaan sensor 3 mulai di atas 400 pada detik ke-14. Sementara itu, pada sumbu horizontal, pembacaan sensor 2 mulai di atas 400 pada detik ke-16 dan pembacaan sensor 4 mulai di atas 400 pada detik ke-14. Dapat disimpulkan bahwa sistem pelacakan dari posisi awal yang sejajar dengan tanah ke posisi 4 memerlukan waktu 16 s. Pembacaan nilai *lux* pada sumbu horizontal memiliki nilai tertinggi 425,83 lx dan nilai terendah 65 lx. Nilai terendah dan tertinggi berada pada rentang masukan metode logika *fuzzy*, dengan masukan dibagi ke

TABEL III
DATA LUX POSISI 3

Waktu (s)	Sensor 1 (Utara) (lx)	Sensor 2 (Barat) (lx)	Sensor 3 (Selatan) (lx)	Sensor 4 (Timur) (lx)
1	56,67	104,17	76,67	52,50
2	91,67	111,67	130,83	79,17
3	111,67	129,17	179,17	105,00
4	130,00	183,33	185,83	135,83
5	135,83	185,83	285,83	178,33
6	175,83	203,33	288,33	177,50
7	193,33	210,83	295,00	204,17
8	250,83	286,50	312,50	212,50
9	310,00	348,67	315,83	337,50
10	313,33	413,33	336,67	359,17
11	370,00	408,33	363,33	372,50
12	412,50	412,50	414,17	407,50
13	412,67	407,50	414,67	407,50
14	413,5	425,83	418,50	407,33
15	417,33	422,67	414,67	410,83
16	420,83	419,83	416,33	418,83
17	418,00	416,00	417,17	416,00
18	418,33	421,33	418,00	413,17
19	420,00	418,50	421,33	418,67
20	415,83	422,17	421,00	418,50

dalam tiga kategori, yakni gelap, normal, dan terang. Sebagai contoh, dari detik ke-11 hingga detik ke-12, pergerakan aktuator linier searah jarum jam karena nilai pembacaan sensor barat dikategorikan normal pada masukan logika *fuzzy* dan nilai pembacaan sensor timur dikategorikan terang. Tabel IV menampilkan data dari nilai *lux* awal sebelum menjalankan sistem pelacakan hingga pelacakan berhasil.

B. EFISIENSI PANEL SURYA DENGAN IMPLEMENTASI REFLEKTOR

Setelah terbukti bahwa proses pelacakan berjalan, selanjutnya dilakukan proses pengujian nilai efisiensi keluaran panel surya dengan dan tanpa reflektor. Data V_{oc} dan I_{sc} dibutuhkan untuk mendapatkan nilai efisiensi panel surya, sehingga digunakan multimeter digital. Tabel V menunjukkan data V_{oc} dan I_{sc} untuk panel surya tanpa reflektor serta data V_{oc} dan I_{sc} untuk panel surya dengan reflektor yang terpasang.

Setelah mendapatkan nilai V_{oc} dan I_{sc} dari panel surya dengan sistem pelacakan yang dipasang pada masing-masing reflektor dan panel surya dengan sistem pelacakan tanpa reflektor, nilai efisiensi dari masing-masing percobaan dihitung. Persamaan (2) digunakan untuk menghitung efisiensi panel surya. Nilai faktor pengisian dari (1) juga digunakan. Hasil perhitungan efisiensi setiap kondisi ditunjukkan pada Tabel V.

Berdasarkan perhitungan efisiensi, ditemukan bahwa penggunaan reflektor cermin dapat meningkatkan efisiensi panel surya sebesar 4,12%. Reflektor foil aluminium dapat meningkatkan efisiensi panel surya sebesar 3,51% dan reflektor pita reflektif dapat meningkatkan efisiensi panel surya sebesar 2,29%.

C. PERHITUNGAN HARGA PENINGKATAN EFISIENSI

Data harga reflektor diperlukan untuk membandingkan harga reflektor per peningkatan efisiensi panel surya. Tabel VI merinci harga reflektor untuk perlengkapan penelitian.

Berdasarkan perhitungan, harga per peningkatan efisiensi sistem pelacakan panel surya dengan penambahan reflektor

TABEL IV
DATA LUX POSISI 4

Waktu (s)	Sensor 1 (Utara) (lx)	Sensor 2 (Barat) (lx)	Sensor 3 (Selatan) (lx)	Sensor 4 (Timur) (lx)
1	62,50	65,00	78,33	74,17
2	115,83	70,33	121,67	68,17
3	136,67	156,67	159,17	158,33
4	140,83	171,17	194,17	183,33
5	157,50	178,33	196,67	185,00
6	175,00	199,83	208,17	202,50
7	200,83	217,50	219,17	265,83
8	205,00	233,33	241,67	265,00
9	210,00	289,00	291,67	300,00
10	275,50	301,67	318,33	314,17
11	303,33	303,33	350,00	341,67
12	310,83	313,33	366,67	385,83
13	318,33	360,83	391,67	397,50
14	372,50	399,17	413,33	405,83
15	396,67	395,00	424,17	400,00
16	412,50	417,50	425,67	423,33
17	413,50	414,17	421,50	424,83
18	414,67	416,67	422,00	425,83
19	418,33	419,83	420,33	420,50
20	420,82	418,00	419,50	421,17

TABEL V
DATA PENGUKURAN

Kondisi	Tegangan (V_{oc}) (V)	Arus (I_{sc}) (A)	Efisiensi (%)
Kondisi normal (tanpa perawatan)	21,50	0,600	3,40
Panel surya + reflektor cermin	24,80	1,150	7,52
Panel surya + reflektor foil aluminium	22,22	1,180	6,91
Panel surya + reflektor pita reflektif	21,80	0,989	5,68

TABEL VI
HARGA REFLEKTOR

Tipe	Harga (Rp)
Cermin	82.500
Foil aluminium	18.750
Pita reflektif	110.000

cermin adalah Rp20.204 per 1%. Kemudian, dengan penambahan reflektor foil aluminium, harganya menjadi Rp5.341 per 1%. Sementara itu, harga dengan penambahan pita reflektor adalah Rp48.034 per 1%. Jika hanya berfokus pada peningkatan efisiensi sistem pelacakan panel surya dengan penambahan reflektor, reflektor cermin memiliki peningkatan efisiensi tertinggi, yaitu mencapai 4,12%. Namun, foil aluminium merupakan reflektor yang paling hemat biaya karena keseimbangan antara peningkatan efisiensi dan harga yang lebih rendah.

IV. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa sistem pelacakan panel surya dapat mengarahkan panel surya ke arah sumber cahaya pada semua posisi. Waktu yang dibutuhkan sistem pelacakan terhadap sumber cahaya pada posisi 1 adalah 12 s, posisi 2 adalah 14 s, posisi 3 adalah 12 s, dan posisi 4

adalah 16 s. Efisiensi sistem pelacakan panel surya tanpa reflektor adalah 3,4%. Sebaliknya, dengan penambahan reflektor yang terbuat dari cermin, efisiensi panel surya menjadi 7,52%. Dengan penambahan reflektor foil aluminium, efisiensi panel surya menjadi 6,92% dan penambahan reflektor pita reflektif meningkatkan efisiensi panel surya menjadi 5,6%. Reflektor foil aluminium memiliki harga terendah per peningkatan efisiensi, yaitu Rp5.341 per 1% peningkatan efisiensi. Sementara itu, harga terendah per efisiensi untuk reflektor cermin adalah Rp20.204 per 1% dan untuk reflektor pita reflektif sebesar Rp48.034 per 1%.

KONFLIK KEPENTINGAN

Pada penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan.

KONTRIBUSI PENULIS

Konseptualisasi, Alvin Rinaldi Wiharja dan Levin Halim; metodologi, Alvin Rinaldi Wiharja dan Faisal Wahab; perangkat lunak, Alvin Rinaldi Wiharja; validasi, Alvin Rinaldi Wiharja, Levin Halim, Faisal Wahab; analisis formal, Alvin Rinaldi Wiharja; investigasi, Alvin Rinaldi Wiharja; sumber daya, Alvin Rinaldi Wiharja; kurasi data, Alvin Rinaldi Wiharja dan Faisal Wahab; penulisan—persiapan draf awal, Alvin R. Wiharja dan Levin Halim; penulisan—penelaahan dan penyuntingan, Levin Halim; visualisasi, Alvin Rinaldi Wiharja dan Levin Halim; supervisi, Levin Halim dan Faisal Wahab; administrasi proyek, Levin Halim.

REFERENSI

- [1] Y. Yao, K. Ivanovski, J. Inekwe, dan R. Smyth, "Human capital and energy consumption: Evidence from OECD countries," *Energy Econ.*, vol. 84, hal. 1–14, Okt. 2019, doi: 10.1016/j.eneco.2019.104534.
- [2] R. Alvarado dkk., "Do economic development and human capital decrease non-renewable energy consumption? Evidence for OECD countries," *Energy*, vol. 215, hal. 1–14, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2020.119147.
- [3] S.A. Qadir, H. Al-Motairi, F. Tahir, dan L. Al-Fagih, "Incentives and strategies for financing the renewable energy transition: A review," *Energy Rep.*, vol. 7, hal. 3590–3606, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.egy.2021.06.041.
- [4] Z.-M. Chen dkk., "Inflationary and distributional effects of fossil energy price fluctuation on the Chinese economy," *Energy*, vol. 187, hal. 1–12, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.115974.
- [5] A. Qazi dkk., "Towards sustainable energy: A systematic review of renewable energy sources, technologies, and public opinions," *IEEE Access*, vol. 7, hal. 63837–63851, Mei 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2906402.
- [6] M.S. Nazir dkk., "Environmental impact and pollution-related challenges of renewable wind energy paradigm – A review," *Sci. Total Environ.*, vol. 683, hal. 436–444, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.274.
- [7] A. Blakers dkk., "Pathway to 100% renewable electricity" *IEEE J. Photovolt.*, vol. 9, no. 6, hal. 1828–1833, Nov. 2019, doi: 10.1109/JPHOTOV.2019.2938882.
- [8] A. Awasthi dkk., "Review on sun tracking technology in solar PV system," *Energy Rep.*, vol. 6, hal. 392–405, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.egy.2020.02.004.
- [9] M.S. Islami, T. Urmee, dan I.N.S. Kumara, "Developing a framework to increase solar photovoltaic microgrid penetration in the tropical region: A case study in Indonesia," *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 47, hal. 1–15, Okt. 2021, doi: 10.1016/j.seta.2021.101311.
- [10] R.F. Fuentes-Morales dkk., "Control algorithms applied to active solar tracking systems: A review," *Sol. Energy*, vol. 212, hal. 203–219, Des. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.10.071.
- [11] N. Katrandzhiev dan N. Karnobatev, "Influence of the angle of fall of light on the photovoltaic panel and its optimization - Literature review," dalam *2019 2nd Balkan Jr. Conf. Light. (Balkan Light Jr.)*, 2019, hal. 1–5, doi: 10.1109/BLJ.2019.8883613.
- [12] G. Hailu dan A.S. Fung, "Optimum tilt angle and orientation of photovoltaic thermal system for application in Greater Toronto Area,

- Canada.” *Sustainability*, vol. 11, no. 22, hal. 1–21, Nov. 2019, doi: 10.3390/su11226443.
- [13] Y.R. Al-Saadi dkk., “Developing smart self orienting solar tracker for mobile PV power generation systems,” *IEEE Access*, vol. 10, hal. 79090–79099, Jul. 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3194026.
- [14] N.G. Hariri dkk., “Experimental investigation of azimuth- and sensor-based control strategies for a PV solar tracking application,” *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 9, hal. 1–15, Mei 2022, doi: 10.3390/app12094758.
- [15] D.T.P. Wijesuriya dkk., “Reduction of solar PV payback period using optimally placed reflectors,” *Energy Procedia*, vol. 134, hal. 480–489, Okt. 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.606.
- [16] K. Kumba dkk., “Performance evaluation of a second-order lever single axis solar tracking system,” *IEEE J. Photovolt.*, vol. 12, no. 5, hal. 1219–1229, Sep. 2022, doi: 10.1109/JPHOTOV.2022.3187647.
- [17] W. Batayneh, A. Bataineh, I. Soliman, dan S.A. Hafees, “Investigation of a single-axis discrete solar tracking system for reduced actuators and maximum energy collection,” *Autom. Constr.*, vol. 98, hal. 102–109, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.autcon.2018.11.011.
- [18] A. Awasthi dkk., “Review on sun tracking technology in solar PV system,” *Energy Rep.*, vol. 6, hal. 392–405, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.egypr.2020.02.004.
- [19] C. Jamroen dkk., “A low-cost dual-axis solar tracking system based on digital logic design: Design and implementation,” *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 37, hal. 1–14, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.seta.2019.100618.
- [20] S. Ahmed, M.M.A. Mia, S. Acharjee, dan M.A.A. Ansary, “More efficient use of photovoltaic solar panel using multiple fixed directed mirrors or aluminum foils instead of solar trackers in rural perspective of Bangladesh,” *Int. J. Sci. Technol. Res.*, vol. 3, no. 4, hal. 294–298, Apr. 2014.
- [21] S.E. Ghasemi dan A.A. Ranjbar, “Thermal performance analysis of solar parabolic trough collector using nanofluid as working fluid: A CFD modelling study,” *J. Mol. Liq.*, vol. 222, hal. 159–166, Okt. 2016, doi: 10.1016/j.molliq.2016.06.091.
- [22] M.A. Ismail dkk., “Improving the performance of solar panels by the used of dual axis solar tracking system with mirror reflection,” *J. Phys., Conf. Ser.*, vol. 1432, hal. 1–7, Jan. 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1432/1/012060.
- [23] M.D. Aditya, “Implementasi kontrol fuzzy berbasis modified particle swarm optimization (MPSO) pada mobile based sistem penjejak matahari pasif dua poros menggunakan reflektor,” Skripsi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia, 2018.
- [24] R. Sakthivel, C.K. Ahn, dan M. Joby, “Fault-tolerant resilient control for fuzzy fractional order systems,” *IEEE Trans. Syst. Man Cybern., Syst.*, vol. 49, no. 9, hal. 1797–1805, Sep. 2019, doi: 10.1109/TSMC.2018.2835442.
- [25] B. Qi dan J. Wang, “Fill factor in organic solar cells,” *Phys. Chem. Chem. Phys.*, vol. 15, no. 23, hal. 8972–8982, Jun. 2013, doi: 10.1039/c3cp51383a.