

OPTIMALISASI ARAH SUDUT *TILT* DAN SUDUT *AZIMUTH* DARI ALAT PEMANEN ENERGI RADIASI MATAHARI DI SEMARANG, JAWA TENGAH

Bayu Sutanto*, Yusuf Dewantoro Herlambang, Bono, Abdul Syukur Alfauzi, Dita Anies Munawwaroh

Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Semarang
Jl. Prof. H. Soedarto S.H., Tembalang, Semarang, 50275

*E-mail: bayu.sutanto@polines.ac.id

Abstrak

Energi surya merupakan sumber energi terbarukan yang sangat optimal untuk dikembangkan dan telah menarik banyak perhatian baik dari para peneliti maupun pemerintahan. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi sudut kemiringan (*tilt/slope angle*) dan orientasi arah (*azimuth angle*) dari suatu alat pemanen energi surya untuk mendapatkan nilai radiasi maksimum pada sepanjang tahun di daerah Semarang, Jawa Tengah. Lokasi yang digunakan sebagai basis data untuk menghitung arah sudut optimum ini dipilih di Politeknik Negeri Semarang yang berkoordinat di 7°03'13.4" (7.053715°) Lintang Selatan dan 110°26'06.8" (110.435220°) Bujur Timur. Metode perhitungan dari sudut-sudut matahari dan koordinat di bumi digunakan untuk mendapatkan nilai estimasi radiasi matahari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sudut kemiringan optimum sepanjang tahun berada pada kisaran 0 – 30.14° dengan orientasi arah ke utara dan pada kisaran sudut kemiringan 0 – 16.00° dengan orientasi arah ke selatan. Sedangkan untuk pemasangan menggunakan sudut konstan sepanjang tahun, nilai optimum dicapai pada sudut kemiringan 7° dengan orientasi menghadap ke utara.

Kata Kunci: *Energi surya, konversi energi, tilt angle, azimuth angle, optimalisasi sudut.*

PENDAHULUAN

Energi surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki kuantitas melimpah. Pemanfaatan energi surya dapat dibagi menjadi dua kategori yaitu *photothermal* dan *photovoltaic*. Energi surya yang dimanfaatkan dengan mengkonversikannya menjadi energi termal disebut dengan *photothermal*. Energi panas tersebut dapat digunakan untuk mengurangi kadar air dari suatu material, menambah nilai kalor, maupun untuk menggerakkan fluida kerja dari mesin konversi energi. Contohnya adalah pengeringan bahan panganan, kompor surya, *solar chimney*, dan sebagainya. Sedangkan untuk *photovoltaic*, merupakan reaksi suatu material yang mampu mengubah energi surya menjadi energi listrik secara langsung melalui mekanisme efek fotolistrik (W, 2021;

Widodo & Iriani, 2019). Mekanisme tersebut mampu mengeksitasi elektron didalam material semikonduktor (seperti Si, CdTe, CIGS, ZnO, TiO₂, dll) dari pita valensi (*valence band*) menuju pita konduksi (*conduction band*) (Parida et al., 2011).

Dengan semakin besar dan beragamnya jenis alat pemanen energi surya, perhatian dari peneliti semakin besar untuk mendapatkan kondisi optimal dalam mengkonversi energi tersebut. Salah satu variabel yang dapat dilakukan secara sederhana namun memberikan efek yang besar dalam memanfaatkan energi surya adalah pengaturan arah hadap dari alat konversi energi (Darussalam et al., 2016; Herlambang et al., 2020). Hal ini terjadi karena bumi selalu berputar, baik itu pada porosnya maupun mengelilingi matahari. Pergerakan bumi ini menyebabkan setiap wilayah dan di setiap waktu memiliki nilai radiasi yang berbeda-beda.

Penelitian ini dimaksudkan untuk memberikan perhitungan dasar dari perancangan alat pemanen energi surya baik secara sistem *photothermal* maupun *photovoltaic* untuk menghasilkan rekomendasi sudut kemiringan dan orientasi arah *azimuth* yang optimal. Hasil dari penelitian ini diharapkan mampu menjadi acuan dari setiap instalasi di suatu wilayah sehingga nilai efisiensi dari konversi energi surya menjadi lebih baik.

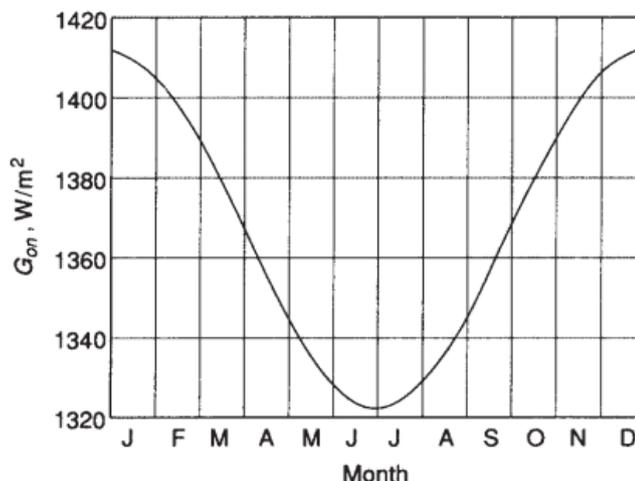
METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini dilakukan berdasarkan pada perhitungan teoritis nilai estimasi radiasi matahari di wilayah Politeknik Negeri Semarang (Polines), Semarang, Jawa Tengah yang memiliki koordinat geografis di 7°03'13.4" (7.053715°) Lintang Selatan dan 110°26'06.8" (110.435220°) Bujur Timur. Nilai koordinat tersebut akan dimasukkan kedalam persamaan sudut dari suatu bidang miring di permukaan bumi untuk mendapatkan nilai radiasi matahari yang optimal pada setiap bulan sepanjang tahun. Perhitungan sudut tersebut dilakukan dengan menganalisa geometri dan pergerakan dari bumi terhadap matahari.

A. Hubungan bumi dan matahari

Bentuk orbit bumi terhadap matahari seperti elips sehingga terjadi variasi jarak antara bumi dan matahari sebesar 1,7%. Jarak rata-rata antara bumi dan matahari adalah satu satuan astronomi atau $1,495 \times 10^{11}$ m, dan membentuk sudut 32°. Besarnya energi yang dipancarkan oleh matahari persatu satuan waktu pada area satu meter persegi dalam arah tegak lurus terhadap suatu bidang diluar atmosfer bumi (*extraterrestrial*) disebut dengan

solar constant (G_{sc}). Berdasarkan data dari World Radiation Center (WOC), nilai G_{sc} yang digunakan adalah 1367 W/m^2 dengan error sebesar 1%. Nilai konstanta G_{sc} tersebut sangat penting dalam melakukan prediksi intensitas radiasi matahari. Akibat adanya variasi jarak antara bumi dan matahari, maka terjadi perubahan nilai radiasi matahari *extraterrestrial* dalam sepanjang tahun. Gambar 1. menampilkan variasi nilai radiasi matahari diluar atmosfer bumi terhadap bidang yang tegak lurus dari arah radiasi (G_{on}) dan persamaan 1 merumuskan prediksi nilai G_{on} sepanjang tahun sebagai fungsi n (urutan hari dari 1 Januari). Sedangkan nilai radiasi aktual yang diterima oleh suatu wilayah permukaan bumi adalah perkalian antara G_{on} dan *clearness index* (k_T). Nilai k_T berkisar antara nol hingga satu yang bergantung pada faktor koordinat wilayah, ketinggian, iklim dan cuaca (Duffie & Beckman, 2013).



Gambar 1. Variasi radiasi matahari *extraterrestrial* sepanjang tahun

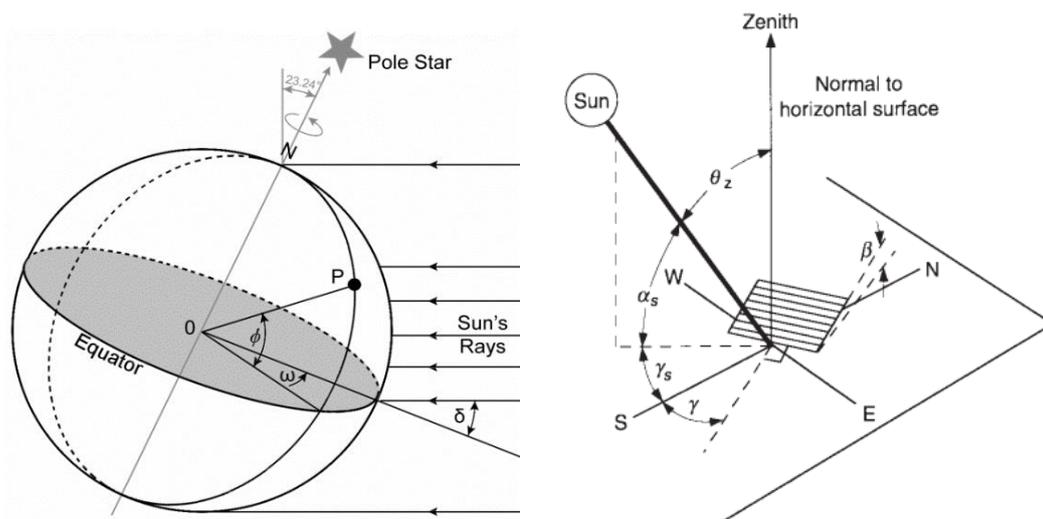
Sumber: (Duffie & Beckman, 2013)

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \tag{1}$$

$$G_n = k_T \times G_{on} \tag{2}$$

B. Posisi matahari dan bidang miring di bumi

Selain berpengaruh terhadap besarnya radiasi matahari, bentuk orbit bumi yang seperti elips juga mengakibatkan perubahan posisi matahari untuk setiap tempat di belahan planet bumi. Hal ini berdampak pada perancangan posisi struktur dari alat pemanen energi surya untuk menghasilkan radiasi yang optimal. Berbagai perubahan arah dan sudut dari radiasi matahari perlu dipertimbangkan dengan baik sehingga kerugian/*losses* dapat diminimalkan selama alat tersebut bekerja.



Gambar 2. Sudut-sudut posisi matahari terhadap suatu benda miring

Sumber: (Duffie & Beckman, 2013)

Terdapat beberapa parameter sudut-sudut yang penting dalam menentukan posisi matahari sebagaimana ditunjukkan di Gambar 2, yaitu:

- Sudut *latitude* (ϕ), merupakan sudut lintang utara atau selatan dari garis ekuator, yang bernilai positif untuk lintang utara, ($-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$).
- Sudut deklinasi (δ), merupakan sudut posisi matahari saat *solar noon* (ketika matahari berada tepat di atas posisi lokal suatu daerah) terhadap garis ekuator/khatulistiwa, yang bernilai positif untuk saat matahari di wilayah utara, ($-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$).
- Sudut *tilt/slope* (β), merupakan sudut kemiringan suatu bidang terhadap garis horizontal, ($0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$).
- Sudut *azimuth* (γ), merupakan sudut deviasi dari proyeksi suatu benda pada bidang horizontal terhadap garis selatan-utara, yang bernilai positif untuk arah ke barat, ($-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$).
- Sudut *solar azimuth* (γ_s), merupakan sudut deviasi dari proyeksi radiasi matahari pada bidang horizontal terhadap garis selatan-utara, yang bernilai positif untuk arah ke barat.
- Sudut jam atau *hour angle* (ω), merupakan perubahan nilai sudut matahari dari arah timur atau barat akibat rotasi bumi dengan nilai 15° per jam, yang saat pagi bernilai negatif dan sore bernilai positif.

- g. Sudut kedatangan atau *incidence angle* (θ), merupakan sudut antara radiasi matahari terhadap garis normal dari suatu permukaan.
- h. Sudut *zenith* (θ_z), merupakan sudut antara radiasi matahari terhadap garis normal dari permukaan horizontal.

C. Sudut bidang miring terhadap radiasi matahari

Beberapa hubungan persamaan untuk memberikan korelasi posisi matahari terhadap sudut-sudut tersebut diantaranya ditunjukkan oleh persamaan 3-5 (Duffie & Beckman, 2013). Persamaan 3 menunjukkan sudut deklinasi (δ) dari matahari di permukaan bumi sebagai fungsi dari n (urutan hari dari 1 Januari). *Incidence angle* (θ) antara radiasi matahari terhadap garis normal dari suatu permukaan berbagai sudut di wilayah bumi dapat dirumuskan dengan persamaan 4. Sedangkan untuk radiasi matahari khusus yang menghadap garis normal dari permukaan horizontal dirumuskan dengan menggunakan persamaan sudut *zenith* (θ_z) seperti yang ditunjukkan di persamaan 5.

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \tag{3}$$

$$\begin{aligned} \cos\theta &= \sin\delta \sin\phi \cos\beta - \sin\delta \cos\phi \sin\beta \cos\gamma \\ &\quad + \cos\delta \cos\phi \cos\beta \cos\omega + \cos\delta \sin\phi \sin\beta \cos\gamma \cos\omega \\ &\quad + \cos\delta \sin\beta \sin\gamma \sin\omega \end{aligned} \tag{4}$$

$$\cos\theta_z = \cos\phi \cos\delta \cos\omega + \sin\phi \sin\delta \tag{5}$$

Persamaan 2 merupakan besarnya radiasi yang diterima suatu permukaan jika arah normal dari permukaan tersebut sejajar dengan radiasi matahari (G_n), sehingga hal tersebut akan memberikan nilai maksimum. Sedangkan suatu bidang yang diletakkan miring pada sudut tertentu (G_T), maka nilai radiasi akan lebih kecil dari nilai G_n (Duffie & Beckman, 2013) yaitu:

$$\begin{aligned} G_T &= G_n \cdot \cos\theta \\ &= k_T \times G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos\frac{360n}{365}\right) \cdot \cos\theta \end{aligned} \tag{6}$$

Persamaan 6 menunjukkan bahwa dengan membentuk nilai sudut kedatangan atau *incidence angle* (θ) mendekati nol, maka menghasilkan radiasi yang optimal bagi suatu bidang. Hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan teknologi *solar tracker* yang dapat mengikuti pergerakan matahari setiap saat. Namun sistem tersebut akan mengkonsumsi energi dalam jumlah yang cukup besar sehingga tidak dapat menghasilkan keuntungan

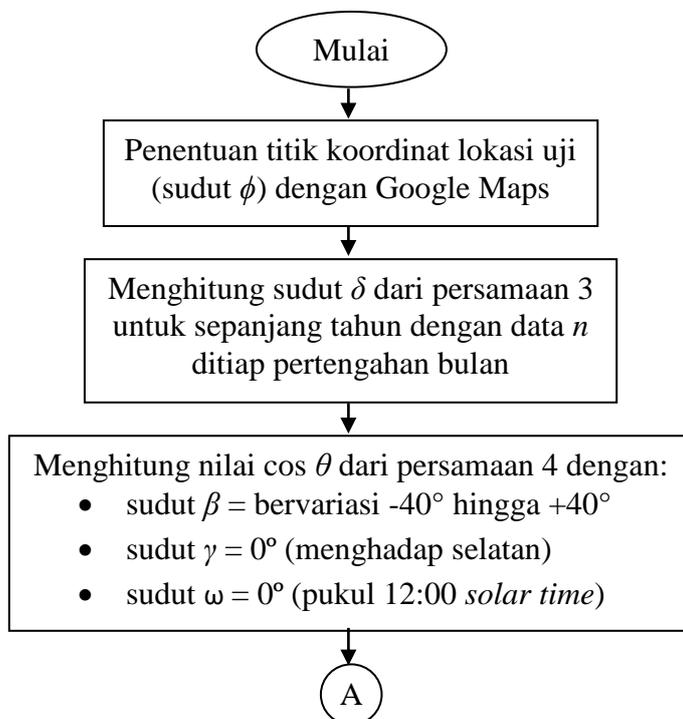
ekonomis (Handoyo et al., 2013). Salah satu metode yang banyak digunakan untuk memperoleh serapan radiasi matahari optimum tanpa menggunakan *solar tracker* adalah dengan melakukan pengaturan kemiringan bidang pada arah tertentu (Pangestuningtyas D.L et al., 2013). Arah kemiringan dari bidang dipilih dengan mengatur sudut *tilt/slope* (β) dan sudut *azimuth* (γ) menggunakan persamaan berikut (Duffie & Beckman, 2013).

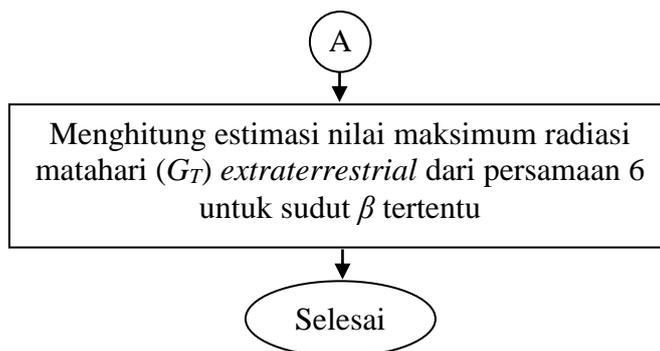
$$\beta = |\phi - \delta|$$

$$\gamma = \begin{cases} 0^\circ & \text{jika } \phi - \delta > 0 \\ 180^\circ & \text{jika } \phi - \delta \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

Pengaturan kemiringan dan arah bidang di persamaan 7 hanya didasarkan pada koordinat garis lintang wilayah tersebut atau sudut *latitude* (ϕ) dan sudut deklinasi (δ) matahari pada saat itu. Meskipun sudut deklinasi (δ) merupakan fungsi dari hari (persamaan 3), namun pengaturan sudut *tilt/slope* (β) dapat dilakukan dengan hanya mengambil nilai hari pada pertengahan bulan (misalnya pada tanggal 15).

Sudut *azimuth* (γ) umumnya diatur untuk menghadap kedalam dua pilihan arah yaitu 0° untuk arah selatan dan 180° untuk arah utara. Sedangkan untuk kasus dimana struktur akan diatur pada posisi yang tetap/konstan sepanjang tahun, maka nilai sudut β diambil berdasarkan nilai rata-rata dari perhitungan disetiap bulannya (Darussalam et al., 2016; Handoyo et al., 2013; Kurnianto et al., 2017). Gambar 3 menunjukkan diagram alir dari tahap penelitian ini.

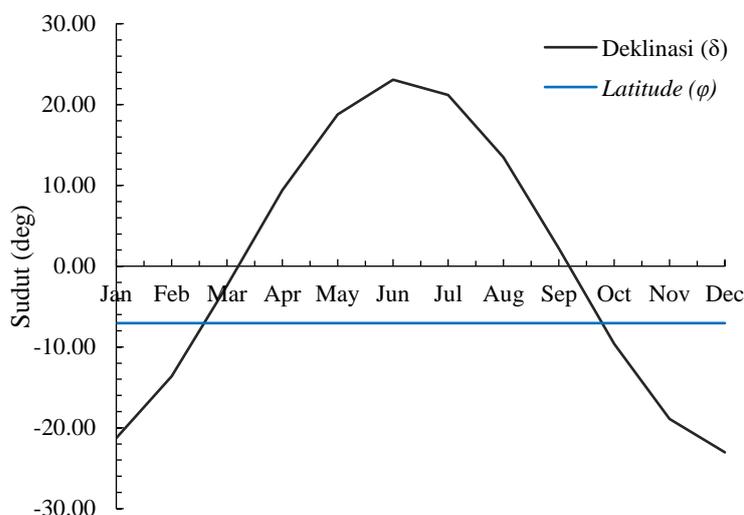




Gambar 3. Diagram alir penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan persamaan sudut deklinasi matahari (persamaan 3), terlihat bahwa matahari akan bergerak secara sinusoidal terhadap garis ekuator/khatulistiwa. Pada tanggal 21 Maret sampai 23 September, posisi matahari berada di sudut positif yang artinya akan berada di sisi utara dari garis ekuator bumi. Sedangkan pada 23 September hingga 21 Maret, terjadi hal sebaliknya yang menyebabkan posisi matahari di sisi selatan dari garis ekuator.

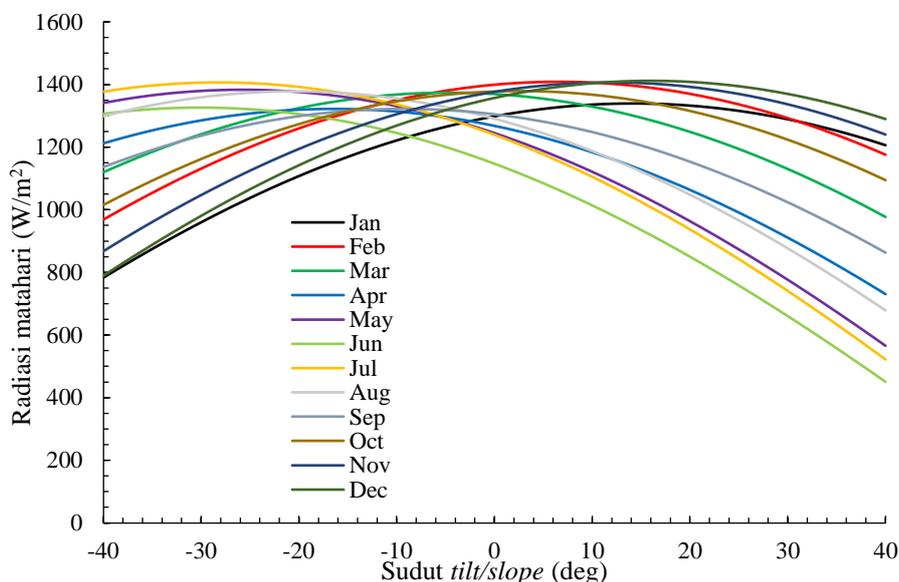


Gambar 4. Sudut deklinasi matahari dan sudut latitude di Polines
 Sumber: Data sekunder (dari persamaan 3) yang diolah, Tahun 2021

Posisi koordinat Polines yang digunakan sebagai lokasi titik uji, berada di sudut *latitude* (ϕ) 7°03'13.4" (-7.053715) Lintang Selatan menjadikan posisi matahari lebih banyak di sisi utara. Seperti yang ditunjukkan di gambar 4, pada tanggal 4 Maret sampai 8 Oktober, posisi matahari akan berada di sisi utara dari titik uji dan pada tanggal sebaliknya akan berada di sisi selatan dari titik uji. Hal ini menunjukkan bahwa matahari akan berada

di sisi utara titik uji secara lebih lama dalam durasi selama satu tahun penuh. Sehingga, dalam merancang alat konversi energi surya di sekitar lokasi titik uji disarankan untuk lebih banyak menghadap ke sisi utara.

Hasil dari perhitungan estimasi nilai radiasi matahari (G_T) *extraterrestrial* untuk bidang miring dengan menggunakan persamaan 3, 4 dan 6 ditunjukkan oleh Gambar 5 sebagai sebuah grafik. Dalam perhitungan tersebut, sudut deklinasi matahari (δ) hanya mengambil nilai hari pada pertengahan bulan (misalnya pada tanggal 15) di sepanjang tahun dan sudut jam/hour angle (ω) hanya pada saat pukul 12 (*solar time*). Sudut *tilt/slope* (β) dilakukan variasi dari -40° hingga $+40^\circ$, dimana nilai negatif menunjukkan bahwa bidang miring menghadap ke utara dan sebaliknya untuk nilai positif menunjukkan bahwa bidang miring menghadap ke selatan.



Gambar 5. Estimasi nilai radiasi matahari untuk berbagai variasi sudut *tilt/slope* (β) sepanjang tahun

Sumber: Data sekunder (dari persamaan 6) yang diolah, Tahun 2021

Gambar 5 menunjukkan bahwa nilai radiasi matahari (G_T) *extraterrestrial* akan mencapai titik maksimum yang berbeda-beda bergantung dengan waktu (bulan) dari pengujian dan sudut *tilt/slope* (β) yang digunakan. Karena sudut *latitude* (ϕ) berada di wilayah selatan, maka sudut *tilt/slope* (β) yang memberikan nilai radiasi matahari secara optimum berada di nilai negatif (dimana bidang miring menghadap ke arah utara). Tabel 1 menunjukkan sudut *tilt/slope* (β) dan sudut *azimuth* (γ) yang memberikan nilai radiasi matahari (G_T) *extraterrestrial* di titik maksimum. Sudut *tilt/slope* (β) optimum sepanjang tahun berada pada kisaran $0 - 30.14^\circ$ dengan sudut *azimuth* 180° (menghadap ke utara) dan

pada kisaran sudut *tilt/slope* (β) $0 - 16.00^\circ$ dengan sudut *azimuth* 0° (menghadap ke selatan).

Tabel 1. Hasil perhitungan optimalisasi sudut *tilt/slope* (β) dan sudut *azimuth* (γ) untuk wilayah Politeknik Negeri Semarang

Bulan	Sudut <i>tilt/slope</i> (deg)	Sudut <i>azimuth</i> (deg)	
Januari	14.22	0	Selatan
Februari	6.57	0	Selatan
Maret	4.64	180	Utara
April	16.47	180	Utara
Mei	25.85	180	Utara
Juni	30.14	180	Utara
Juli	28.24	180	Utara
Agustus	20.51	180	Utara
September	9.27	180	Utara
Oktober	2.55	0	Selatan
November	11.86	0	Selatan
Desember	16.00	0	Selatan

Sumber : Data sekunder (dari persamaan 6) yang diolah, Tahun 2021

Berdasarkan hasil tersebut, dapat dilakukan pengambilan nilai rata-rata untuk menghasilkan rekomendasi sudut *tilt/slope* (β) yang konstan sepanjang tahun namun memberikan nilai radiasi matahari yang optimum. Nilai optimum dari sudut *tilt/slope* (β) sepanjang tahun dicapai pada sudut kemiringan 7° dengan sudut *azimuth* 180° (menghadap ke utara). Pada konfigurasi sudut tersebut, nilai estimasi radiasi matahari (G_T) *extraterrestrial* sebesar 1310.4 W/m^2 , dimana nilai tersebut sudah cukup mendekati nilai dari *solar constant* (G_{sc}).

SIMPULAN

Hasil perhitungan sudut *tilt/slope* (β) dan sudut *azimuth* (γ) yang memberikan nilai radiasi di titik maksimum di lokasi uji Politeknik Negeri Semarang telah berhasil dilakukan. Sepanjang tahun, nilai optimum dari sudut-sudut tersebut selalu berubah, tetapi nilai rata-rata dari sudut *tilt/slope* (β) yang menghasilkan nilai radiasi maksimum berada di sudut kemiringan 7° dengan orientasi arah yang menghadap ke utara. Hal ini disebabkan oleh lokasi titik uji yang berada di wilayah selatan bagian bumi. Meskipun demikian, nilai sudut optimal tersebut harus disesuaikan kembali dengan kemiringan yang disarankan oleh

Optimalisasi Arah Sudut *Tilt* dan Sudut *Azimuth* Bayu Sutanto, dkk
manufacturer untuk memperoleh efek pembersihan dari debu maupun benda lainnya yang berada di atas permukaan alat pemanen energi surya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Darussalam, R., Rajani, A., & Atmaja, T. D. (2016). *Pengaturan Arah Azimuth Dan Sudut Tilt Panel Photovoltaic untuk Optimalisasi Radiasi Matahari*, . V, 31–36.
- [2] Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes* (4th ed.). John Wiley and Sons. Chapter 1 (page 3-64).
- [3] Handoyo, E. A., Ichsani, D., & Prabowo. (2013). The optimal tilt angle of a solar collector. *Energy Procedia*, 32, 166–175.
- [4] Herlambang, Y. D., Margana, Safarudin, Y. M., Yosintaska, Yusrindra, N., Wibowo, R. R., & Cahya, Y. T. I. (2020). Model Alat Ukur Kecepatan Angin, Arah Angin, dan Intensitas Radiasi Matahari. *Eksergi*, 16(2), 80–91.
- [5] Kurnianto, R., Hiendro, A., & Ismail Yusuf, H. M. (2017). Optimum orientation angles for photovoltaic arrays to maximize energy gain at near equator location in Indonesia. *International Review of Automatic Control*, 10(1), 86–91.
- [6] Pangestuningtyas D.L, Hermawan, & Karnoto. (2013). Analisis Pengaruh Sudut Kemiringan Panel Surya terhadap Radiasi Matahari yang Diterima oleh Panel Surya Tipe Larik Tetap. *Transient*, 2(4), 0–7.
- [7] Parida, B., Iniyana, S., & Goic, R. (2011). A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1625–1636.
- [8] Kristianto. A. W. (2021). Desain Modul Pompa Air Laut Tenaga Surya untuk Produksi Garam. *Eksergi*, 17(1), 1–14.
- [9] Widodo, S., & Iriani, J. (2019). Perancangan Listrik Energi Surya 300VA, 220V, 50Hz, untuk Rumah Tangga Sederhana. *Eksergi*, 15(1), 1.