

ANALISIS KUALITAS DAYA PADA *OFF-GRID PHOTOVOLTAIC SOLAR POWER SYSTEM* TERHADAP BEBAN LINIER

Arifin Wibisono^{1*}, Andhika Wicaksono Dwi Tangguh Klapoviq², Leonardus Heru Pratomo³

^{1,2,3}Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Soegijapranata, Jl. Pawiyatan Luhur IV Semarang

*E-mail: arifin@unika.ac.id

ABSTRAK

Photovoltaic merupakan energi terbarukan sebagai salah satu solusi yang diharapkan dapat mengatasi krisis energi. Namun, dalam pengaplikasiannya tergolong tidak mudah dan membutuhkan sedikit keahlian khusus agar listrik yang dihasilkan dapat sesuai dengan standar listrik PLN yaitu tegangan AC 220 volt dengan bentuk gelombang sinusoidal berfrekuensi 50 Hz. Gelombang sinusoidal ini digunakan pada sebagian besar peralatan elektronik dirumah tangga, yang mana jika gelombangnya terdistorsi maka dapat menyebabkan masalah pada peralatan tersebut. Hal inilah yang menjadi dasar penelitian ini untuk membahas mengenai analisa kualitas daya listrik yang dihasilkan oleh Off-Grid Photovoltaic terhadap beban linier dan diharapkan dapat menambah wawasan masyarakat mengenai analisa penggunaan Off-Grid Solar Panel agar meminimalisir terjadinya kerusakan pada peralatan listrik rumah tangga akibat tegangan listrik yang terdistorsi sekaligus mengoptimalkan penggunaan daya yang dihasilkan oleh panel surya dengan memperhatikan faktor daya dan jenis beban yang terpasang pada sistem kelistrikan.

Kata kunci: *Photovoltaic, Sinusoidal, Distorsi, Off-Grid, Beban Linier*

1. PENDAHULUAN

Krisis energi yang terjadi saat ini diakibatkan oleh kebutuhan energi semakin meningkat seiring bertambahnya jumlah penduduk yang tidak diimbangi oleh sumber daya yang mencukupi. Hal ini juga diperparah dengan penggunaan bahan bakar fosil yang mana jumlahnya terbatas sehingga dapat mempengaruhi pasokan energi negara tersebut (*World Energy Council, 2020*).

Energi terbarukan merupakan salah satu solusi yang diharapkan dapat mengatasi krisis energi tersebut sekaligus sebagai upaya untuk mengurangi emisi gas karbon. Pengembangan dan penggunaan energi bersih terbarukan terus dilakukan oleh banyak negara pada berbagai sektor terutama penggunaan energi cahaya matahari dan angin (*World Energy Council, 2020*).

Selama masa pandemi Covid-19 kuartal I tahun 2020, penggunaan energi terbarukan pada semua sektor secara global mengalami peningkatan dibandingkan dengan kuartal I tahun 2019. Pembangkit listrik terbarukan mengalami peningkatan yang cukup signifikan pada sektor energi matahari dan angin. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor diantaranya proyek pembangunan pembangkit listrik terbarukan yang telah diselesaikan pada satu tahun terakhir serta penurunan penggunaan bahan bakar minyak akibat adanya kebijakan pembatasan sosial (*International Energy Agency, 2020*).

Namun, dalam pengaplikasian pembangkit listrik tenaga surya tergolong tidak mudah dan membutuhkan sedikit keahlian khusus agar listrik yang dihasilkan dapat sesuai dengan standar listrik PLN yaitu tegangan AC 220 volt dengan bentuk gelombang sinusoidal berfrekuensi 50 Hz.

Seperti yang kita ketahui bahwa *photovoltaic* (yang selanjutnya disebut dengan singkatan PV) akan menghasilkan sumber arus searah (DC atau *Direct Current*) yang mana PV ini berfungsi untuk mengubah energi *Photon* dari pancaran cahaya matahari menjadi energi listrik dengan menggerakkan elektron yang terdapat pada PV. Akibat adanya perbedaan muatan elektron pada bagian yang terkena sinar matahari dan yang tidak, maka arus akan mengalir dari bagian yang tidak terkena sinar matahari menuju bagian yang terkena sinar sehingga terciptalah arus listrik (Rizwan, Mohd, 2017).

Namun, hasil keluaran dari PV ini bergantung pada intensitas cahaya yang diterima dan hasil dari keluaran PV ini masih berupa arus searah yang mana masih perlu dilakukan proses pengolahan agar dapat digunakan pada peralatan listrik pada umumnya.

2. METODE

2.1 Teori Daya

a) Nilai Maksimum, Nilai Efektif, dan Nilai Sesaat

i. Nilai Maksimum

Merupakan nilai maksimum yang terdapat pada arus bolak-balik sebagai nilai nilai puncak-puncak (*peak to peak*). Nilai tegangan ditulis sebagai :

$$V_{Max} = V_M \quad (1)$$

dan arus ditulis sebagai :

$$I_{Max} = I_M \quad (2)$$

ii. Nilai Efektif (Nilai rms / root mean square)

Merupakan nilai tegangan/arus bolak-balik yang dapat menghasilkan energi yang setara dengan yang dihasilkan oleh tegangan/arus searah.

Tegangan efektif atau V_{rms} dapat ditulis sebagai :

$$V_{Eff} = \frac{V_M}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

Arus efektif atau I_{rms} dapat dituliskan sebagai

$$I_{Eff} = \frac{I_M}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

iii. Nilai Sesaat

Merupakan nilai tegangan atau arus yang terukur sesaat peninjauan. Hal ini kemudian dapat menyebabkan munculnya daya sesaat yang dapat dirumuskan kedalam :

$$P(t) = V(t) \times i(t) \quad (5)$$

b) Gelombang Sinusoidal

Merupakan gelombang fungsi periodik untuk menyatakan bentuk arus dan tegangan yang dapat dituliskan kedalam persamaan :

$$y(t) = A \sin(\omega t) \text{ atau } y(t) = A \cos(\omega t) \quad (6)$$

Dimana A merupakan amplitudo gelombang, ω adalah frekuensi gelombang periodik, dan t adalah waktu.

c) Daya Sesaat, Daya Rata-rata, Daya Reaktif, dan Daya Tampak

i. Daya sesaat

Merupakan daya yang timbul pada waktu tertentu ketika suatu komponen dialiri arus listrik dan memiliki tegangan pada waktu pengukuran. Dirumuskan dalam:

$$P(t) = V(t) \times i(t) \quad (7)$$

dimana t merupakan waktu.

ii. Daya Rata-Rata (P)

Merupakan daya yang diserap oleh komponen pasif resistor dan sering disebut juga dengan daya nyata. Simbol daya ini adalah P dengan satuan Watt yang dapat dirumuskan kedalam persamaan :

$$P = V_{Eff} \times I_{Eff} \cos\theta \quad (8)$$

iii. Daya Reaktif (Q)

Merupakan *Power Losses* atau rugi-rugi daya akibat penyerapan daya oleh komponen pasif selain resistor. Dengan memperkecil faktor daya, munculnya daya ini dapat diminimalisir. Simbol daya ini adalah Q dengan satuan VAR (Volt Ampere Reaktif) yang dapat dirumuskan kedalam :

$$Q = V_{Eff} \times I_{Eff} \sin\theta \quad (9)$$

iv. Daya Tampak (S)

Merupakan daya hasil resultan dari daya rata-rata dan daya reaktif. Simbol daya ini adalah S dengan satuan VA (Volt Ampere) yang secara sistematis dapat dituliskan sebagai:

$$S = V_{Eff} \times I_{Eff} \tag{10}$$

d) Faktor Daya / *Power Factor* (pf)

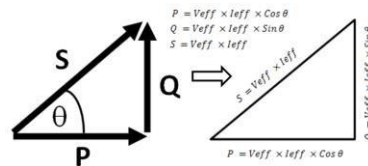
Merupakan nilai yang menyatakan perbandingan daya rata-rata (P) terhadap daya tampak (S). Nilai ini dapat dirumuskan kedalam persamaan matematis sebagai berikut:

$$pf = \frac{P}{S} = \frac{V_{Eff} \times I_{Eff} \times \cos\theta}{V_{Eff} \times I_{Eff}} = \cos\theta \tag{11}$$

e) Segitiga Daya

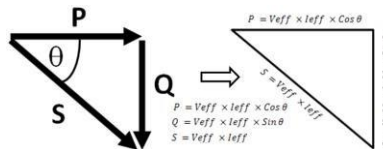
Hubungan daya Rata-rata, daya Reaktif, dan daya Tampak dapat dinyatakan dalam vektor. Daya rata-rata (P) dapat digambarkan dengan vektor kearah horizontal dan daya reaktif (Q) dapat digambarkan sebagai vektor kearah vertikal. Sisi miring pada segitiga tersebut merepresentasikan daya tampak (S). Pada komponen induktor (L) dan Kapasitor (C) memiliki hubungan segitiga daya yang cukup berbeda dimana akan tampak seperti dibawah ini:

i. Pada komponen Induktor (L)



Gambar 1. Segitiga daya pada komponen induktor

ii. Pada komponen Kapasitor (C)



Gambar 2. Segitiga daya pada komponen kapasitor

2.2 Metode Analisis Kualitas Daya

Salah satu keunggulan penggunaan elektronika daya terdapat pada proses konversi energi listrik yang mana hal ini dapat berdampak negatif dengan rusaknya sistem kelistrikan akibat munculnya kandungan harmonisa.

Secara teori, sistem yang ideal memiliki bentuk gelombang sinusoida pada tegangan dan arusnya. Namun karena adanya komponen harmonisa, akan mengakibatkan distorsi gelombang sehingga tegangan dan arus tidak akan berbentuk gelombang sinusoida lagi. Ada beberapa parameter yang paling sering digunakan dalam menganalisa dampak dari harmonisa, antara lain: (IEEE std 519, 1992)

a) *Total Harmonic Distortion* (THD) / Distorsi Harmonisa Total

Merupakan perbandingan nilai efektif komponen harmonisa dengan nilai efektif komponen fundamental. THD ini dapat dituliskan kedalam persamaan:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V} \text{ atau } THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I} \tag{12}$$

Yang mana persamaan ini banyak dipakai sebagai acuan untuk mengukur deviasi kandungan harmonisa pada gelombang sinusoida. Nilai THD pada gelombang sinusoida murni adalah nol. Jika masing-masing orde diambil data nilai harmonisanya, maka THD akan berubah menjadi IHD (*Individual Harmonic Distortion*).

b) *Total Demand Distortion* (TDD)

Untuk menghitung nilai distorsi arus harmonisa total, diperlukan persamaan *Total Demand Distortion* (TDD) yang dirumuskan kedalam:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \quad (13)$$

Dimana I_L didefinisikan sebagai arus beban maksimal yang dibutuhkan (selama 15-30 menit pada frekuensi fundamental). Nilai I_L dapat dicari dengan menggunakan persamaan:

$$I_L = \frac{KW}{PF \sqrt{3} kV} \quad (14)$$

Dan untuk mencari arus hubung singkat atau I_{SC} dapat menggunakan rumus:

$$I_{SC} = \frac{kVA \cdot 100}{\sqrt{3} \cdot kV \cdot Z(\%)} \quad (15)$$

Dengan catatan bahwa variabel KW adalah daya dalam satuan kilo Watt, PF merupakan *Power Factor* / faktor daya, KV merupakan tegangan dalam satuan kilo Volt, kVA merupakan daya kompleks (daya tampak) dalam satuan kilo Volt Ampere, dan variabel Z merupakan nilai dari impedansi.

Pada standar industri Jepang, THD didefinisikan sebagai rasio komponen harmonisa terhadap komponen fundamental untuk menganalisa bentuk getaran dan gelombang audio. Parameter yang digunakan adalah:

a) THD-F (*Total Harmonic Distortion Fundamental*)

Merupakan komponen harmonik gelombang fundamental yang dirumuskan kedalam:

$$THDF = \frac{\sum \text{Orde}2 + \dots \text{Orde}N}{\text{Fundamental}} \times 100\% \quad (16)$$

b) THD-R

Merupakan komponen harmonik dari RMS yang dirumuskan kedalam:

$$THDR = \frac{\sum \text{Orde}2 + \dots \text{Orde}N}{\text{RMS}} \times 100\% \quad (17)$$

2.3 Toleransi Kandungan Harmonik Sesuai IEEE 512-1992 Untuk Tegangan dan Arus

Batas kandungan harmonik pada tegangan akan ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 1. Voltage Distortion Limits

<i>Maximum Harmonics Voltage Distortion in (%)</i>		
<i>Voltage at PCC</i>	<i>Induividual Voltage Distortion</i>	<i>Total Voltage Distortionn THD</i>
Dibawah 69 Kv	3,0	5,0
69,001 Kv – 161 Kv	1,5	2,5
Diatas 161,001 Kv	1,0	1,5

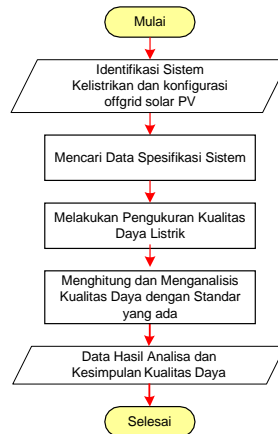
Batas kandungan harmonik pada arus akan ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 2. Current distortion limits

<i>Maximum Harmonics Current Distortion in (%) dari IL</i>						
<i>Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)</i>						
<i>Isc / IL</i>	<i>< 11</i>	<i>11 ≤ h < 17</i>	<i>17 ≤ h < 23</i>	<i>23 ≤ h < 35</i>	<i>35 ≤</i>	<i>TDD</i>
< 20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20-50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50-100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100-1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

2.4 Alur Penelitian

Penelitian dan percobaan ini dilakukan berdasarkan *flowchart* yang ditunjukkan oleh gambar dibawah ini :



Gambar 3. *Flowchart* Penelitian

2.5 Pengambilan Data

Percobaan dilakukan pada siang hari sekitar pukul 12.00 WIB bertempat di luar ruangan dengan asumsi cuaca dalam keadaan cerah dan intensitas cahaya matahari berada pada titik maksimal. Penelitian ini menggunakan 3 buah panel surya yang akan dioperasikan secara *Off-Grid* (menjadikan panel surya sebagai sumber energi utama untuk membangkitkan listrik sesuai dengan kebutuhan), alat *PV Off-Grid Solar Inverter* kapasitas 1000 W, beban linier berupa lampu bolam, serta alat monitoring berupa *oscilloscope* dan *power meter*. Berikut merupakan spesifikasi alat-alat yang kami gunakan dalam penelitian ini:

- a) Panel Surya

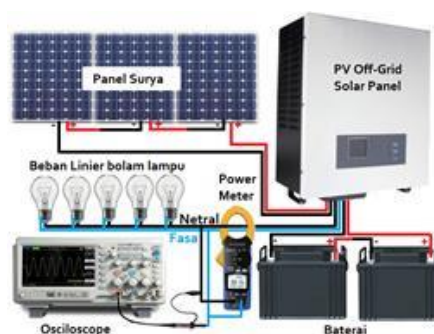
Daya maksimum (Pmax)	: 190	W	
Daya Arus Maksimum (Imp)	: 10,11	A	
Daya Tegangan Maksimum (Vmp)	: 18,8	V	
Tegangan saat Sirkuit Terbuka (Voc)	: 23,5	V	
Arus saat hubung singkat (Isc)	: 10,23	A	
- b) *PV Off-Grid Solar Panel Model 1000W*

DC Input	: 24	VDC	
Vmax PV	: 100	VDC	
Isc PV	: 48	A (DC)	
Rating Tegangan Output	: 200/220/230/240	VAC	50/60 Hz
- c) Bolam lampu Pijar

Daya	: 100	W	220V/50Hz
------	-------	---	-----------
- d) Baterai

Kapasitas	: 45	AH	
Tegangan	: 12	VDC	

Dibawah ini merupakan gambaran mengenai rangkaian alat yang akan digunakan dalam percobaan:



Gambar 4. Skema *Off-Grid Photovoltaic Solar Power System*



Gambar 5. Pengujian laboratorium *Off-Grid Photovoltaic Solar Power System* dengan beban linier

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah melakukan percobaan, didapatkan data sebagai berikut:

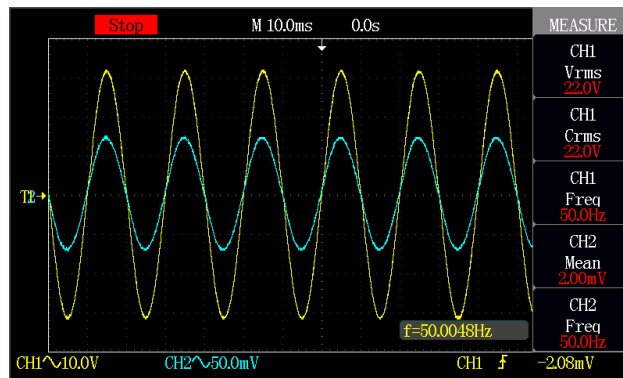
3.1 Data Pengukuran Pada *Display PV Off-Grid Solar Inverter*



Gambar 6. *Display monitor Off-Grid Solar Panel inverter*

Berdasarkan tampilan dari *display monitor Off-Grid solar panel inverter*, PV akan mengalirkan arus listrik DC menuju MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) untuk dikontrol arus dan tegangannya yang kemudian digunakan untuk mengisi baterai sekaligus dialirkan menuju inverter untuk dikonversi menjadi tegangan AC dengan keluaran 219 V, 50Hz. Pada display tersebut juga menampilkan kapasitas baterai sebesar 35%, Tegangan input dari PV sebesar 31.5 VDC, dan beban sebesar 19% dari kapasitas alat *solar panel inverter*.

3.2 Data Pengukuran Pada *Oscilloscope*



Gambar 7. Sinyal arus dan tegangan saat terhubung pada beban linier

Ketika beban yang berupa beberapa buah lampu pijar dihubungkan pada keluaran *Off-Grid Solar* Inverter, arus (garis berwarna biru) mengalir dari terminal keluaran menuju beban membentuk gelombang sinusoidal dengan sudut fasa yang sama dengan tegangan keluaran (garis berwarna kuning) tanpa adanya distorsi gelombang yang terlihat maupun pergeseran sudut fasa.

3.3 Data Pengukuran Pada *Power Meter*

Tersaji dalam Tabel 3 yang merupakan data pengukuran secara umum yang terukur pada *power meter* meliputi daya, tegangan, dan arus ketika keluaran *Off-grid solar* inverter mengalami pembebanan. Daya yang terukur sebesar 0.191 kW (atau sekitar 191 W) telah sesuai dengan angka yang tertampil pada *display* monitor (beban $19\% \times 1000 \text{ W} = 190 \text{ W}$).

Tabel 3. Pengukuran secara umum

Parameter	Hasil pengukuran	
	Nilai	Satuan
Daya	0,191	kW
Tegangan	221,6	V
Arus	0,863	A

Tabel 4. Pengukuran harmonik

Tingkat/Orde	Hasil pengukuran	
	Level Harmonik (A)	Kandungan Harmonik (%)
1	0,866	100,00
2	0,003	0,30
3	0,013	1,46
4	0,002	0,24
5	0,006	0,70
6	0,002	0,23
7	0,004	0,43
8	0,002	0,27
9	0,003	0,35
10	0,003	0,36
THD-F = 1.88%		THD-R = 1.88%

Tabel 4 diatas menunjukkan hasil kutipan dari pengukuran harmonik 10 orde pertama dimana nilai yang terukur pada tingkat satu merupakan sebuah gelombang fundamental. THD yang terukur merupakan THD-F (sebesar 1.88%) dan THD-R (sebesar 1.88%) dengan jumlah orde sebanyak 30. Data tersebut juga menunjukkan adanya distorsi pada gelombang tegangan dan arus walaupun nilainya sangat kecil (mendekati nol).

4. KESIMPULAN

Berdasarkan data kurva arus dan tegangan yang terdapat pada *Oscilloscope*, beban yang terpasang pada sistem berjenis beban linier resistif murni karena nilai arusnya berbanding lurus dengan nilai tegangannya sehingga bentuk gelombangnya akan sama dan tidak mengalami pergeseran maupun distorsi. Daya yang bekerja pada sistem ini merupakan daya rata-rata (P). Sehingga pada segitiga daya apabila jumlah beban linier terus ditambahkan, maka akan berdampak pada bertambahnya semakin tingginya nilai daya reaktif (Q) dan semakin berkurangnya nilai daya tampak (S). Hal ini menjadi kerugian tersendiri bagi konsumen listrik apabila beban yang digunakan berjenis linier. Solusi untuk mengatasi hal ini, yaitu dengan mengurangi nilai faktor daya (pf) untuk meningkatkan nilai daya tampak (S).

UCAPAN TERIMA KASIH

Kegiatan ini dibiayai oleh Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat Deputi Bidang Penguatan Riset dan Pengembangan Kementerian Riset dan Teknologi/Badan Riset dan Inovasi Nasional dengan Kontrak Pelaksanaan Program Pengabdian Masyarakat Nomor: 089 / SP2H / PPM / DPRM / 2021.

PUSTAKA

- Adi Wirajaya, I.P.A., Rinas, I.W. & Sukerayasa, I.W. 2019. Studi Analisa Pengaruh *Total Harmonic Distortion* (THD) terhadap Rugi-Rugi, Efisiensi, dan Kapasitas Kerja Transformator pada penyulang Kerobokan. *Spektrum*, 6(2).
- Boussetta, M., Elbachtiri, R., Khanfara, M., & Elhammoumi, K. 2017. Performance analysis and power evaluation of Hybrid off-grid System. *Proceedings of 2016 International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2016*, 1130–1134. <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2016.7983942>.
- Chedjou, J. C., & Kyamakya, K. 2015. A Universal Concept Based on Cellular Neural Networks for Ultrafast and Flexible Solving of Differential Equations. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 26(4), 749–762. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2014.2323218>.
- Garg, R. 2019. *Comparison of an Off-Grid Solar Power Plant based Renewable Energy Production. Proceedings of the 3rd International Conference on Electronics and Communication and Aerospace Technology, ICECA 2019*, 521–525. <https://doi.org/10.1109/ICECA.2019.8821954>.
- Hicks, C., Baghzouz, Y., & Haddad, S. 2018. *Power quality of residential PV system under low solar irradiance and off-grid operation. Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP, 2018-May*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2018.8378937>
- International Energy Agency. 1974. *The Center of The Global Energy Debate*. France: IEA. *Global Energy Review 2020 The impacts of the Covid-19 crisis on global energy demand and CO₂ emissions*. France: International Energy Agency.
- Institute of Electrical and Electronics Engineer. 1963. *A Professional Association for Electronic Engineering and Electrical Engineering*. New York: IEEE. *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*. 1992. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineer.
- Ivanova, I. Y., Tuguzova, T. F., & Khalgaeva, N. A. 2018. Comparative Analysis of Approaches to Consider Rationale of use of Solar Panel Plants for Power Supply of Off-Grid Consumers. *Proceedings - 2018 International Ural Conference on Green Energy, UralCon 2018*, 75–79. <https://doi.org/10.1109/URALCON.2018.8544276>.
- Jasuan, A., Nawawi, Z., & Samaulah, H. 2019. Comparative Analysis of Applications Off-Grid PV System and On-Grid PV System for Households in Indonesia. *Proceedings of 2018 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science, ICECOS 2018*, 253–258. <https://doi.org/10.1109/ICECOS.2018.8605263>.
- Malakani, A. I., Handoko Arthanto, D., Dwi Wicaksono, B. G., & Purwadi, A. 2019. Study and Design of Off-Grid PV Power System in Pirien, Asmat Regency, Papua Province using MATLAB/SIMULINK. *Proceedings of the 2nd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems: Towards Sustainable and Reliable Power Delivery, ICHVEPS 2019*, 339–343. <https://doi.org/10.1109/ICHVEPS47643.2019.9011048>.
- Ramdhani, M. 2008. *Rangkaian Listrik*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Riyadi, S. 2011. *Tapis Daya Aktif Shunt: Suatu Alternatif Reduksi Harmonisa*. Semarang: Universitas Katolik Soegijapranata.
- Rizwan, M. 2017. A Review Paper on Electricity Generation from Solar Energy. *Jurnal Penelitian*, (Online), Volume 5, Issue IX, (<https://www.researchgate.net/publication/320226399>), diakses 9 Juni 2021).
- Robert, S. 2006. *Solar Electricity: A Practtical Guide to Designing and Installing Small Photovoltaic Systems*. Maylands Avenue Hemel Hempstead Hertfordshire. Prentice Hall Europe.
- Singh, R., & Kaur, L. 2019. Optimal Configuration and Evaluation Analysis of an Existing Solar Photovoltaic Power Plant. 2018 *IEEE International Conference on Renewable Energy and Power Engineering, REPE 2018, 1*, 47–50. <https://doi.org/10.1109/REPE.2018.8657484>.
- World Energy Council. 1923. *World Energy Congress and publishing authoritative studies*. United Kingdom: World Energy Council. *World Energy Issue Monitor/2020*. 2020. England and Wales: World Energy Council.