

ANALISIS PENGARUH CUACA TERHADAP EFISIENSI PANEL SURYA GRID TIE MENGGUNAKAN KONFIGURASI MICRO INVERTER DAN STRING INVERTER TERHADAP ENERGI YANG DIHASILKAN

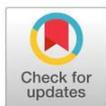
Setyo Purnomo¹, Yanuar Zulardiansyah Arief², Arie Jaenul³, Sinka Wilyanti⁴

^{1,3,4} Universitas Global Jakarta, Grand Depok City, Indonesia

² Universiti Malaysia Sarawak (UNIMAS), 94300 Kota Samarahan, Sarawak, Malaysia
Email: setyo@student.jgu.ac.id, yanuar@jgu.ac.id, ariej@jgu.ac.id, sinka@jgu.ac.id

Info Artikel

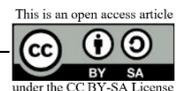
Histori Artikel:
Diterima Sep 25, 2023
Direvisi Okt 05, 2023
Disetujui Okt 07, 2023



ABSTRACT

The grid-tie PLTS system in the installation process can be carried out with a micro-inverter and string-inverter configuration. This research uses an experimental method by taking measurements of voltage, current, power, electrical energy (kWh), and power factor at predetermined measurement points. The analysis was carried out in various weather conditions, whether sunny, cloudy, or rainy, to obtain the efficiency performance of the electrical energy produced, and tests were carried out on both configuration models to obtain significance values for these two configurations. The data analysis shows that micro-inverters perform better in various weather conditions and have a significant difference compared to string-inverters of 9.93%. In sunny weather conditions, the micro-inverter also produces better electrical power by 20.43%. On the other hand, in cloudy weather conditions, the string-inverter configuration produces a better electrical power performance of 14.97%. Photovoltaic modules with a micro-inverter configuration have an average efficiency of 10.03% - 11.4%, while string-inverters have an average efficiency of 7.17% - 9%. The power factor of the micro-inverter configuration is 0.35, and the string-inverter has a power factor of 0.4.

Keywords: PLTS, grid-tie, photovoltaic module, micro-inverter, string-inverter



ABSTRAK

Sistem PLTS grid-tie dalam proses instalasinya dapat dilakukan dengan konfigurasi micro-inverter dan string inverte. Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan melakukan pengukuran berupa tegangan, arus, daya, energi listrik (kWh), dan faktor daya pada titik-titik pengukuran yang telah ditentukan. Analisis dilakukan dengan berbagai kondisi cuaca baik cerah, berawan, maupun kondisi hujan untuk memperoleh performa efisiensi energi listrik yang dihasilkan serta dilakukan uji kedua-dua model konfigurasi untuk memperoleh nilai signifikansi pada kedua konfigurasi ini. Dari analisis data diperoleh hasil yaitu micro-inverter memiliki performa lebih baik pada berbagai kondisi cuaca, dan memiliki perbedaan yang signifikan dibanding string-inverter sebesar 9,93%. Dalam kondisi cuaca cerah micro-inverter juga menghasilkan daya listrik yang lebih baik sebesar 20,43%. Sebaliknya dalam kondisi cuaca berawan, konfigurasi string-inverter menghasilkan performa daya listrik yang lebih baik sebesar 14,97%. Photovoltaic module dengan konfigurasi micro-inverter memiliki efisiensi rata-rata 10,03% - 11,4% sedang string-inverter memiliki efisiensi rata-rata 7,17% - 9%. Besarnya faktor daya konfigurasi micro-inverter sebesar 0,35 dan string-inverter memiliki faktor daya sebesar 0,4.

Kata Kunci: PLTS, grid-tie, photovoltaic module, micro-inverter, string-inverter

Penulis Korespondensi:

Setyo Purnomo,
Magister Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer
Universitas Global Jakarta,
Grand Depok City, Jl. Boulevard Raya No.2 Kota Depok.
setyo@student.jgu.ac.id

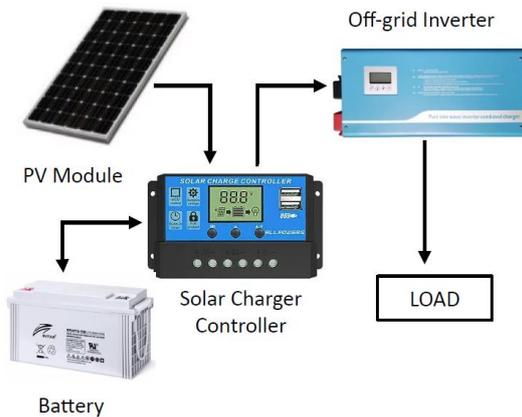


1. PENDAHULUAN

Total energi surya di seluruh dunia yang telah terpasang hingga akhir 2022 mencapai 1.185 GW, atau terjadi penambahan sekitar 240 GW dari tahun sebelumnya [1]. Indonesia memiliki potensi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Atap yang cukup besar, yakni mencapai 32,5 Gigawatt (GW), namun baru dimanfaatkan sebesar 31,32 Megawatt Peak (MWp). Hingga bulan Mei 2021, PLTS Atap tercatat digunakan oleh 3.781 pelanggan. Jumlah tersebut meningkat drastis dibandingkan pemanfaatan PLTS Atap pada November 2018 yang hanya sebesar 592 pelanggan [2].

Energi surya adalah energi berupa sinar dan panas dari matahari yang dapat dimanfaatkan dengan menggunakan serangkaian teknologi seperti pemanas surya, fotovoltaik surya, listrik panas surya, arsitektur surya, dan fotosintesis buatan [3]. Energi ini memiliki keunggulan dibandingkan dengan energi fosil, diantaranya: Sumber energi yang mudah didapatkan, ramah lingkungan, sesuai untuk berbagai macam kondisi geografis, instalasi, pengoperasian dan perawatan mudah, serta listrik dari energi surya dapat disimpan dalam baterai [4].

Ada dua cara dalam membangun sistem PLTS yaitu *stand-alone* dan *grid-tie*. Sistem *stand-alone* menggunakan teknologi *photovoltaic module*, *solar charging control (SCC)*, baterai dan *off-grid inverter*.

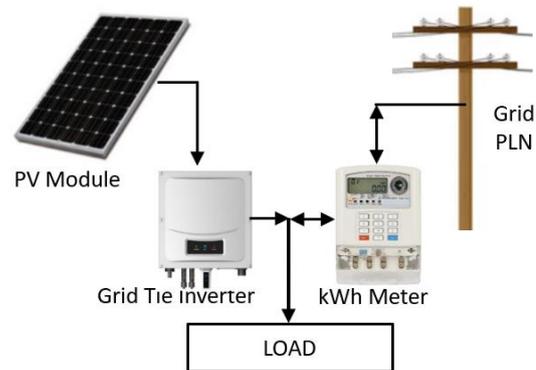


Gambar 1 Sistem PLTS *stand-alone*

Energi matahari dikonversi menjadi energi listrik oleh *photovoltaic module*, energi listrik tersebut digunakan untuk menghidupkan peralatan listrik dan sebagian disimpan ke dalam baterai, yang akan digunakan sebagai *backup* saat kekurangan energi matahari. SCC berfungsi untuk mengontrol baterai agar tidak mengalami kelebihan muatan listrik saat pengisian, yang dapat mempersingkat usia baterai. *off-grid inverter* mengubah arus searah dari baterai

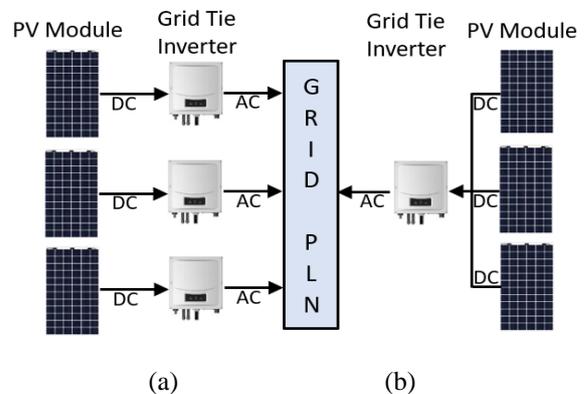
atau *photovoltaic module* menjadi arus bolak-balik sesuai kebutuhan peralatan listrik yang digunakan.

Pada sistem PLTS terhubung *grid-tie* lebih menguntungkan dalam hal biaya dan investasi daripada sistem PLTS *stand-alone*, Karena tidak memerlukan media baterai sebagai penyimpanan energi listrik tersebut. Dari solar panel sistem atau *photovoltaic module* melalui *Grid-Tie Inverter* (GTI) langsung terhubung dengan penyedia jaringan listrik utama yaitu Pembangkit Listrik Negara (PLN). Di dalam GTI ini terjadi proses konversi arus searah menjadi arus bolak-balik, juga terjadi proses sinkronisasi dengan jaringan *grid* PLN sehingga kedua sumber listrik yang berbeda ini dapat bergabung dan otomatis berbagi beban antara PLTS sebagai yang utama dan PLN sebagai *backup*. Bila *solar panel system* kekurangan *supply* maka akan dipenuhi dari PLN [5].



Gambar 2 Sistem PLTS terhubung *grid-tie*.

Konfigurasi panel surya terhubung *Grid-tie* dapat dilakukan dengan cara *micro-inverter* dan *string-inverter* [6]. *Micro-inverter* mengubah arus DC yang dihasilkan satu panel surya menjadi arus AC. Arus AC dari masing-masing *micro-inverter* ini kemudian digabungkan bersama dengan Keluaran dari *micro-inverter* lainnya untuk mengirimkannya ke jaringan grid.



Gambar 3 Konfigurasi,

(a) *micro-inverter* dan (b) *string-inverter*.

String-inverter terhubung ke serangkaian panel surya bukan hanya satu panel seperti dalam *micro-inverter*. Arus AC dari *string-inverter* kemudian dapat digabungkan dengan keluaran dari *String-inverter* lainnya.

Di wilayah Indonesia, energi listrik yang dihasilkan PLTS, mudah dipengaruhi oleh kondisi cuaca, yaitu keadaan udara di atmosfer pada waktu dan tempat tertentu yang sifatnya tidak menentu dan berubah-ubah. Penilaian terhadap kategori cuaca umumnya dinyatakan dengan memperhatikan kondisi hujan, suhu udara, jumlah tutupan awan, penguapan, kelembapan, dan kecepatan angin di suatu tempat dari hari ke hari [7]. Jenis cuaca yang ada di Indonesia terdiri atas: Cuaca panas, disebabkan oleh panas matahari karena posisinya berada tegak lurus di atas bumi dengan intensitas penyinaran matahari yang tinggi. Cuaca cerah, dimana sinar matahari terlihat jernih disertai dengan udara yang segar. Cuaca sejuk, terjadi pada suatu daerah yang mengalami angin bertiup, suhu udara rendah, dan kelembapan udara yang cukup tinggi. Cuaca hujan, terjadi karena adanya uap air yang terkandung di udara atau di awan. Cuaca berangin, adanya pergerakan angin yang cukup kuat. Dan cuaca berawan, yaitu kondisi ketika langit terlihat mendung atau dipenuhi awan [8].

Energi listrik yang dihasilkan dari PLTS juga dipengaruhi oleh iradiasi dari matahari. Iradiasi matahari adalah proses radiasi yang jatuh pada suatu permukaan. Semakin besar iradiasi yang diterima oleh panel surya, maka hasilnya akan berbanding lurus dengan daya listrik yang dihasilkan. Akibatnya, daya maksimum meningkat sejalan dengan radiasi yang diterima, maka efisiensi akan lebih baik pada radiasi yang besar [9]. Pemasangan panel surya di Indonesia cenderung lebih datar dibandingkan dengan pemasangan panel surya pada negara dengan empat musim, karena posisinya dekat dengan khatulistiwa. Jumlah energi listrik yang dihasilkan menjadi lebih sedikit. Penyebabnya ialah posisi penyinaran pada pagi dan sore hari kurang sempurna dan tidak menyerap seluruh sinar matahari yang terpancarkan [10].

Perumusan masalah dalam penelitian ini yaitu masih adanya pengguna PLTS yang belum mengetahui cara mengonfigurasi panel surya dengan sistem *grid-tie*, baik menggunakan konfigurasi *micro-inverter* maupun *string-inverter*, dan belum diketahui apakah energi listrik yang dihasilkan pada kedua konfigurasi tersebut memiliki perbedaan yang signifikan serta konfigurasi mana yang lebih optimal digunakan sesuai kondisi cuaca di wilayah Indonesia.

Tujuan yang akan dicapai dari penelitian ini adalah: mendesain dan membuat konfigurasi panel surya terhubung *grid-tie* dengan cara *micro-inverter* dan *string-inverter*, mendapatkan hasil analisis efisiensi daya listrik yang dihasilkan antara kedua konfigurasi tersebut dan mendapatkan konfigurasi PLTS yang optimal yang sesuai dengan kondisi cuaca di wilayah Indonesia.

Adapun manfaat dari penelitian ini yaitu: dapat menentukan konfigurasi panel surya terhubung *grid-tie* yang lebih efisien antara *micro-inverter* dan *string-inverter* dan memberi masukan kepada masyarakat cara mengonfigurasi panel surya terhubung *grid-tie* yang lebih efisien terhadap daya listrik yang dihasilkan dan pengaruh cuaca.

Penelitian mengenai efisiensi instalasi panel surya antara *micro-inverter* dan *string-inverter* dilakukan oleh Lagarde, et al [11]. Dalam penelitian ini efisiensi ditentukan oleh *Performance Ratio* (PR) dengan mempertimbangkan beberapa parameter seperti: orientasi, kemiringan, naungan, kerugian kabel, dan jumlah panel. Hasil penelitian diperoleh nilai rata-rata PR sebesar 0,79 dengan efisiensi 70-80%, tidak ditemukan perbedaan efisiensi yang signifikan antara *string-inverter* dengan *micro-inverter*.

Shubham Tiwari et al dari *Gyan Ganga Institute of Technology and Sciences* (GGITS) Jabalpur India meneliti perbandingan performa antara *string-inverter* dan *micro-inverter* pada jaringan *grid* dengan menggunakan *software System Advisor Model* (SAM) [12]. Hasil penelitian diperoleh *micro-inverter* menghasilkan energi tahunan tanpa naungan sebesar 4.916 kWh dan dengan naungan sebesar 4.332 kWh. *String-inverter* menghasilkan energi tahunan tanpa naungan sebesar 4.763 kWh jika dengan naungan menghasilkan energi 4.283 kWh. Dari kedua data ini *micro-inverter* menghasilkan energi lebih efisien dibanding *string-inverter*.

Penelitian Analisis Perbandingan Supply Arus *Grid Tie Inverter* (GTI) Panel Surya dan PLN pada beban 400-Watt Terhadap Radiasi Matahari, dilakukan oleh Safri Nahela, et al [13]. Metode yang digunakan dalam pengujian dengan mengukur arus pada *photovoltaic module*, GTI dan beban menggunakan *clamp meter*. Tegangan *photovoltaic module* dan PLN menggunakan *multimeter*. Panel surya yang digunakan mempunyai kapasitas 130Wp, dan GTI menggunakan *Smart Grid-tie Micro-inverter* 1kW. Pengujian dan pengukuran dilakukan selama 3 hari dan didapatkan radiasi matahari rata-rata yaitu 497.3 W/m² dengan hasil

data perbandingan rata-rata 78.91% suplai arus dari GTI dan 21.09% suplai dari arus PLN.

Penelitian Analisis *On Grid* dilakukan oleh Ryan Rezky Ramadhana at al [14], dengan metode kualitatif dengan cara penelitian langsung atau disebut *direct observation*. Penelitian diawali dengan pengambilan data secara langsung kemudian melakukan analisis. Dengan hasil Input inverter menghasilkan lebih besar 0.106 kWh/day daripada keluaran inverter yang menghasilkan 0,073 kWh/day. Dan besar daya PLN sebelum ter sinkronisasi *grid* inverter 0,351 kWh/day kemudian menurun atau menghemat 0.272 kWh/day. Hal itu menyebabkan adanya selisih penghematan selama sehari penyinaran mencapai 0,079 KWh/day. Terlihat bahwasanya antara daya keluaran panel surya sangat mempengaruhi besar kecilnya daya keluaran *grid* PLN. Kapasitas panel surya menggunakan *grid* inverter dalam hal ini menghemat pengeluaran listrik dengan cara membagi beban bersama dengan PLN

Penelitian mengenai efisiensi panel surya antara *micro-inverter* dan *string-inverter* pernah dilakukan oleh beberapa peneliti yang telah dijelaskan di atas, yang membedakan penelitian ini dengan penelitian sebelumnya yaitu:

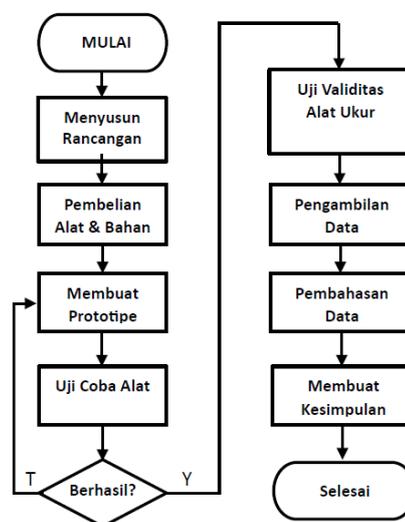
- a. Penelitian ini memperoleh data dari hasil pengukuran eksperimen, penelitian sebelumnya menggunakan data dari *website* dan data dari *software System Advisor Model (SAM)*.
- b. Penelitian ini menggunakan panel surya dan *grid-tie inverter (GTI)* dengan type dan kapasitas yang sama. Penelitian sebelumnya menggunakan berbagai type dan kapasitas yang berbeda.
- c. Penelitian ini menggunakan panel surya dengan sudut kemiringan, *azimuth* dan lokasi yang sama. Penelitian sebelumnya menggunakan sudut kemiringan, *azimuth* dan lokasi yang berbeda-beda.
- d. Pada penelitian ini konfigurasi *micro-inverter* dan *string-inverter* mendapat perlakuan cuaca di indonesia, seperti cuaca cerah, berawan, dan hujan. Penelitian sebelumnya mendapat naungan atau bayangan dari pemodelan *software* atau kondisi cuaca di prancis dan italia.

2. METODE PENELITIAN

Metode pengumpulan data yang digunakan adalah metode eksperimen. Metode ini memanipulasi suatu variabel yang sengaja dilakukan untuk melihat efek yang terjadi dari tindakan tersebut [15]. Pada metode ini, ada dua variabel yang diteliti, yaitu berupa panel surya dengan total masing-masing 200Wp yang terhubung dengan *grid-tie inverter*.

Dimana masing-masing diberi perlakuan yang berbeda, variabel pertama dikonfigurasi dengan cara *micro-inverter*, sedang variabel kedua dikonfigurasi dengan cara *string-inverter*. Selanjutnya kedua variabel ini dilakukan pengukuran berupa: tegangan, arus, daya, faktor daya, energi listrik (kWh), temperatur dan kelembapan. Pengamatan dilakukan untuk melihat kondisi cuaca saat cerah, berawan dan saat hujan. Dari hasil pengukuran dan pengamatan, dilakukan analisis efisiensi panel surya dan pengaruh cuaca sehingga dapat ditarik suatu kesimpulan konfigurasi yang lebih efisien terhadap daya listrik yang dihasilkan.

Metode penelitian dilakukan dengan mengikuti diagram alir seperti pada Gambar 4 di bawah ini:



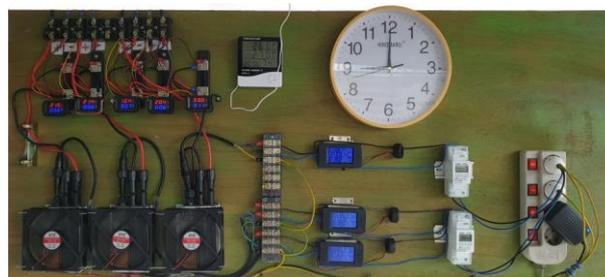
Gambar 4 Diagram alir penelitian.

Setelah menyusun suatu rancangan, dilakukan pembelian alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini berupa:

Tabel 1 Alat dan bahan

No	Alat dan Bahan	Jumlah
1	Photovoltaic Module 100 Wp	4 Unit
2	Grid-tie Inverter 350 Watt	3 Unit
2	DC Digital Dual Meter	5 Unit
3	AC Multifunction Meter	3 Unit
4	Energy Meter (kWh)	2 Unit

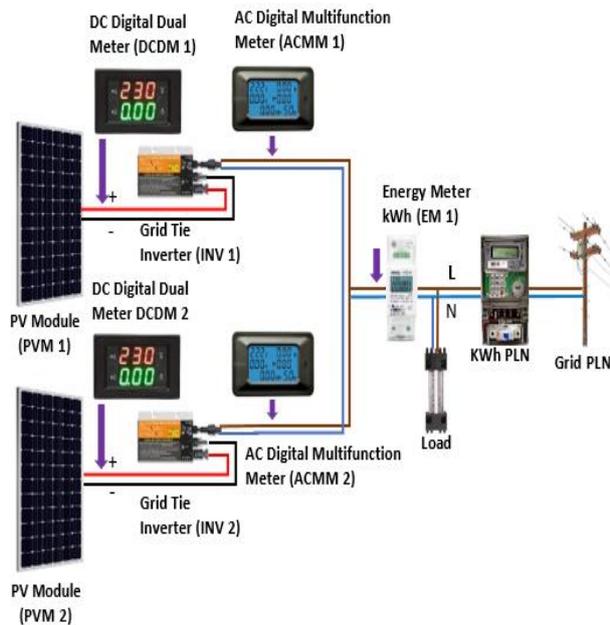
Selanjutnya membuat prototipe untuk penelitian seperti pada gambar di bawah ini:



Gambar 5 Prototipe penelitian.

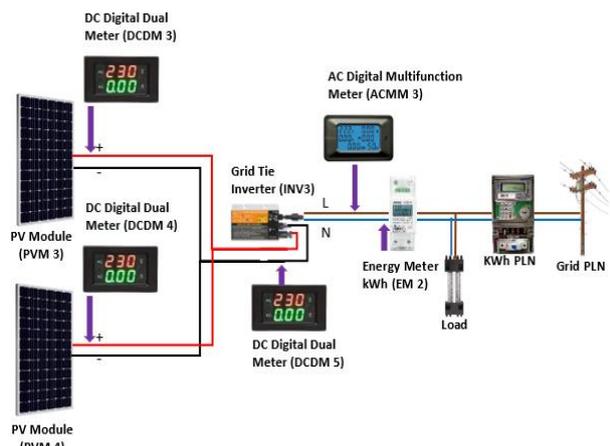
Tahap uji coba alat yaitu melakukan pengujian fungsionalitas alat dan bahan penelitian, pengujian pengukuran dan pengujian pengambilan data. Tahap selanjutnya yaitu uji validitas alat ukur berupa kalibrasi alat ukur menggunakan alat ukur standar yang sudah memiliki sertifikat kalibrasi.

Pengukuran konfigurasi *micro-inverter* dilakukan pada titik-titik pengukuran seperti pada Gambar 6 di bawah ini:



Gambar 6 Titik pengukuran pada konfigurasi *micro-inverter*.

Adapun titik-titik pengukuran konfigurasi *string-inverter* seperti pada Gambar 7 di bawah ini:



Gambar 7 Titik pengukuran pada konfigurasi *string-inverter*.

Pengambilan data dilakukan selama 3 bulan (90 hari) mulai dari tanggal 20 Maret 2023 sampai dengan 25 Juni 2023 pada pukul 08.00, 09.00, 10.00, 11.00, 12.00, 13.00, 14.00, 15.00 dan 16.00 WIB. Sehingga masing-masing variabel diperoleh sebanyak 810 sample data. Lokasi Penelitian di

LPK Pientar Teknik, Perum Griya Jati Asri Blok B1 No.3 Jatimulya Cilodong Depok.

Pengujian hipotesis dianalisis dengan menguji kesamaan dua rata-rata uji dua pihak menggunakan rumus [16]:

$$t = \frac{x_1 - x_2}{s \sqrt{\left(\frac{1}{n_1}\right) + \left(\frac{1}{n_2}\right)}} \tag{1}$$

Keterangan:

t adalah hasil uji rata-rata dua pihak
x adalah mean
n adalah jumlah sampel
s adalah simpangan baku

Simpangan baku dicari dengan rumus:

$$S^2 = \frac{(n_1 - 1) s_1^2 + (n_2 - 1) s_2^2}{(n_1 + n_2) - 2} \tag{2}$$

Dalam pengujian terhadap hipotesis yang perumusannya mengandung pengertian sama, disebut hipotesis nol dengan lambang H_0 melawan hipotesis tandingannya dengan lambang H_1 yang mengandung pengertian tidak sama. Pasangan H_0 dan H_1 yang telah dirumuskan, ditulis dalam bentuk:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 \tag{3}$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \tag{4}$$

Distribusi untuk mendapatkan batas-batas kriteria untuk uji dua pihak ini didapat dari daftar *student distribution*. H_0 diterima jika $-t_{1-\frac{1}{2}\alpha} < t < t_{1-\frac{1}{2}\alpha}$ dengan $t_{1-\frac{1}{2}\alpha}$ didapat dari tabel distribusi t dengan dk = (n_1+n_2-2) dan peluang $1-\frac{1}{2}\alpha$. Untuk harga t lainnya di tolak.

Besarnya perbedaan kedua variabel dicari dengan menggunakan persamaan:

$$y = \frac{(x_1 - x_2)}{x_2} \times 100 \tag{5}$$

Keterangan:

y adalah besarnya perbedaan (%)

Kemampuan maksimum *photovoltaic module* dalam menyerap energi matahari dan mengubahnya menjadi energi listrik disebut sebagai besarnya efisiensi daya maksimum.

Perhitungan efisiensi (η) *photovoltaic module* dihitung berdasarkan persamaan:

$$\eta = \frac{I_{sc} \times V_{oc} \times FF}{IFF \times A_c} \tag{6}$$

Keterangan:

η adalah efisiensi *photovoltaic module* (%)
 I_{sc} adalah arus hubung singkat (A)
 V_{oc} adalah tegangan rangkaian terbuka (V)
FF adalah faktor pengisi

IFF adalah radiasi matahari (W/m^2)

A_c adalah area pengumpul (m^2)

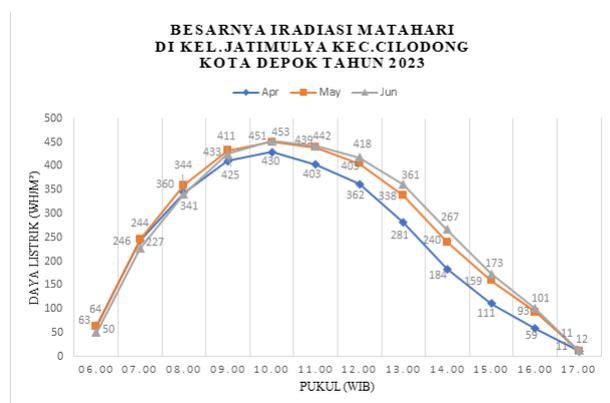
Faktor Pengisi (*Fill Factor*) *photovoltaic module* dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (7)$$

Data besarnya arus hubung singkat (I_{sc}), tegangan *open circuit* (V_{oc}) dan daya maksimum (P_{max}) *photovoltaic module* dapat dilihat pada *datasheet* yaitu $I_{sc} = 4,9$ Ampere, $V_{oc} = 24,66$ volt dan $P_{max} = 100Wp$.

Besarnya efisiensi maksimum *photovoltaic module* dihitung berdasar I_{sc} dan V_{oc} , sedangkan besarnya efisiensi daya keluaran dihitung berdasar arus output (I_o) dan Tegangan output (V_o) pada konfigurasi *micro-inverter* dan *string-inverter*.

Adapun besarnya iradiasi matahari di lokasi penelitian berdasar Gambar 8 di bawah ini:



Gambar 8 Besarnya iradiasi matahari kel. Kalimulya [Wh/m²] [17].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam kondisi cuaca berawan dan hujan, *photovoltaic module* dengan konfigurasi *string-inverter* menghasilkan daya listrik yang lebih efisien dibanding *micro-inverter* dengan performa efisiensi saat berawan mencapai 14,97%. Dan saat hujan mencapai 25,74%.

Konfigurasi *micro-inverter* dalam kondisi cuaca cerah menghasilkan performa energi listrik yang lebih baik sebesar 21,26% dibanding dengan konfigurasi *string-inverter*.

Dalam berbagai kondisi cuaca, yang menghasilkan performa daya listrik lebih efisien yaitu konfigurasi *micro-inverter*, memiliki perbedaan signifikan dibanding *string-inverter* mencapai 9,93%.

3.1 Hasil Penelitian

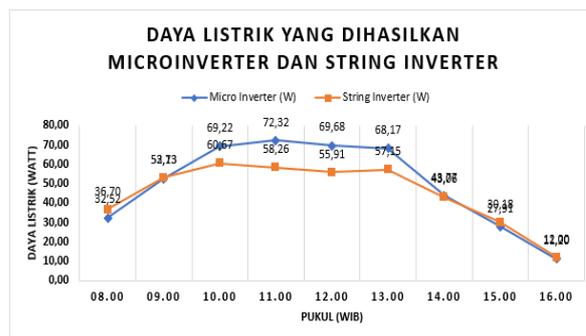
Dalam kondisi berbagai cuaca, baik cuaca cerah, berawan, maupun hujan, *photovoltaic Module* dengan konfigurasi *micro-inverter* menghasilkan

performa daya listrik lebih besar dibanding konfigurasi *string-inverter*, seperti terlihat dalam Tabel 2.

Tabel 2 Daya listrik yang dihasilkan *micro-inverter* dan *string-inverter*.

Month	Micro-inverter (Watt)	String-inverter (Watt)
April	14.787,79	12.945,83
Mei	13.125,41	11.881,90
Juni	12.363,37	11.807,27
Total	40.276,57	36.635,00
Mean	49,72	45,23
Standard Deviasi	32,19	23,68

Rata-rata harian energi listrik yang dihasilkan antara *micro-inverter* dan *string-inverter* berdasar waktu dari pukul 08.00 sampai dengan pukul 16.00, dengan berbagai kondisi cuaca dapat dilihat seperti pada Gambar 9. Pada pagi hari dari pukul 08.00 sampai dengan 09.00 terlihat bahwa *string-inverter* menghasilkan energi listrik yang lebih besar dibanding *micro-inverter*. Pada pukul 09.00 hingga pukul 14.00 *micro-inverter* menunjukkan performa terbaiknya. Pada pukul 14.00 hingga 16.00 kedua konfigurasi menghasilkan energi listrik yang hampir sama.



Gambar 9 Rata-rata daya listrik harian yang dihasilkan *micro-inverter* dan *string-inverter*.

Pada kondisi cuaca yang cerah, konfigurasi *micro-inverter* dan *string-inverter* menghasilkan daya listrik rata-rata seperti tabel di bawah ini.

Tabel 3 Daya listrik pada kondisi cuaca cerah

Pukul (WIB)	Daya (Watt)	
	Micro-inverter	String-inverter
08.00	38,36	42,89
09.00	63,21	60,96
10.00	88,56	67,44
11.00	90,73	65,23
12.00	90,30	64,23
13.00	86,49	66,56
14.00	82,31	68,13
15.00	64,81	61,19
16.00	53,30	46,05
Mean	73,12	60,30

Pada kondisi cuaca berawan, energi listrik yang dihasilkan *photovoltaic module* dengan konfigurasi *micro-inverter* dan *string-inverter* seperti pada **Tabel 4**:

Tabel 4 Daya listrik pada kondisi cuaca berawan.

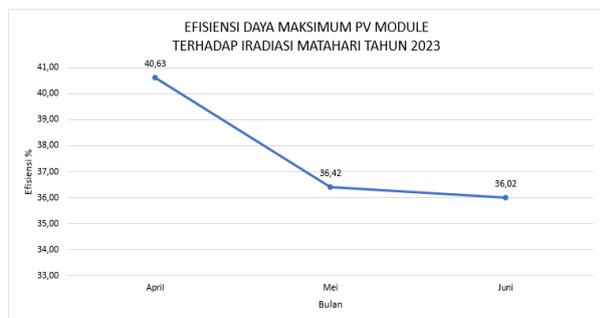
Pukul (WIB)	Daya (Watt)	
	<i>Micro-inverter</i>	<i>String-inverter</i>
08.00	19,52	22,89
09.00	33,68	39,63
10.00	45,04	53,09
11.00	41,14	49,75
12.00	39,77	44,58
13.00	44,07	46,65
14.00	32,71	37,60
15.00	26,39	30,56
16.00	13,45	15,27
Mean	32,86	37,78

Pada kondisi cuaca hujan, *photovoltaic module* dengan konfigurasi *micro-inverter* dan *string-inverter* menghasilkan daya listrik seperti pada **Tabel 5**.

Tabel 5 Daya listrik pada kondisi cuaca hujan.

Pukul (WIB)	Daya (Watt)	
	<i>Micro-inverter</i>	<i>String-inverter</i>
08.00	3,06	5,79
09.00	4,88	7,52
10.00	1,69	3,05
11.00	1,31	0,61
12.00	2,88	3,21
13.00	3,50	3,23
14.00	2,16	3,63
15.00	1,31	1,59
16.00	1,77	1,82
Mean	2,51	3,38

Besarnya efisiensi maksimum *photovoltaic module* pada bulan April, Mei dan Juni Tahun 2023 seperti yang terlihat pada gambar grafik di bawah ini:



Gambar 10 Efisiensi Daya Maksimum *Photovoltaic Module* Terhadap Iradiasi Matahari.

Dari pengukuran rata-rata tegangan dan arus keluaran *photovoltaic module* didapat hasil pengukuran seperti pada **Tabel 6**:

Tabel 6 Tegangan dan arus keluaran *photovoltaic module*.

Bulan	<i>Micro-inverter</i>				<i>String-inverter</i>			
	PVM 1		PVM 2		PVM 3		PVM 4	
	V	I	V	I	V	I	V	I
April	19,19	2,06	18,87	1,85	20,35	1,49	20,34	1,25
Mei	19,18	1,84	19,34	1,61	19,90	1,40	19,85	1,09
Juni	19,81	1,74	19,56	1,54	20,18	1,40	20,15	1,07

Efisiensi daya keluaran *photovoltaic module* pada konfigurasi *micro-inverter* dan *string-inverter* di dapat seperti pada tabel di bawah ini:

Tabel 7 Efisiensi daya keluaran *photovoltaic module*.

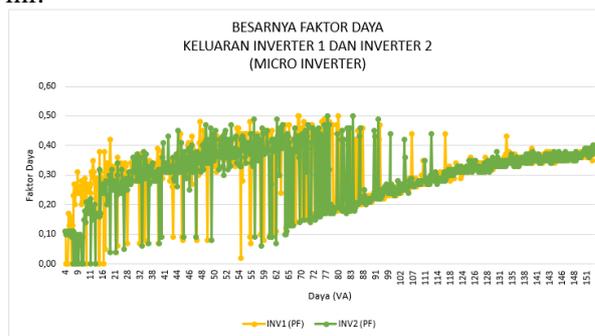
Bulan	<i>Micro-inverter</i> (%)		<i>String-inverter</i> (%)	
	PVM 1	PVM 2	PVM 3	PVM 4
April	13,29	11,74	10,20	8,55
Mei	10,64	9,38	8,40	6,52
Juni	10,27	8,98	8,42	6,43
Rata-rata	11,40	10,03	9,00	7,17

Energi listrik yang dihasilkan *photovoltaic module* berdasar pengukuran dari kWh meter seperti yang tunjukkan pada tabel di bawah ini:

Tabel 8 Besarnya kWh meter.

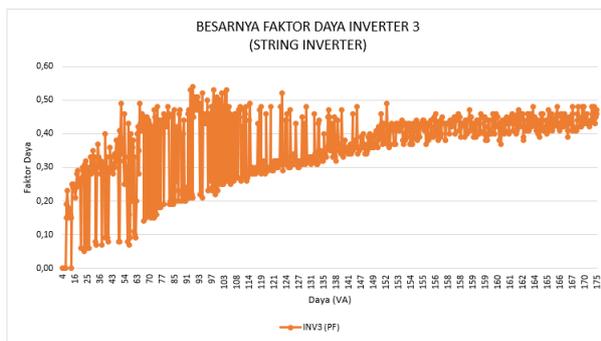
Month	<i>Micro-inverter</i> (kWh)	<i>String-inverter</i> (kWh)
April	14,0	12,1
Mei	13,0	11,8
Juni	12,3	11,8
Jumlah	39,3	35,7

Hasil Pengukuran faktor daya keluaran inverter 1 (INV 1) dan inverter 2 (INV 2) pada konfigurasi *micro-inverter* diperlihatkan pada gambar di bawah ini:



Gambar 11 Faktor daya keluaran inverter 1 dan inverter 2.

Dari **Gambar 11** di atas terlihat bahwa faktor daya tertinggi pada konfigurasi *micro-inverter* sebesar 0,5 dengan nilai rata-rata faktor daya sebesar 0,35. Tidak jauh berbeda dengan hasil pengukuran faktor daya keluaran inverter 3 (INV 3) yaitu pada konfigurasi *string-inverter*, dimana faktor daya tertinggi sebesar 0,54 dengan rata-rata faktor daya sebesar 0,4. seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 12**:



Gambar 12 Faktor daya keluaran inverter 3.

3.2 Pembahasan Hasil Penelitian

Dari data hasil penelitian di atas dapat di analisis performa energi listrik yang dihasilkan pada konfigurasi *micro-inverter* dan *string-inverter* sebagai berikut:

1.1 Pengaruh Berbagai Kondisi Cuaca

Dari Tabel 2 dapat diketahui *micro-inverter* dalam tiga bulan menghasilkan daya listrik lebih besar yaitu 40,3 kW sedang *string-inverter* menghasilkan daya listrik lebih rendah sebesar 36,6 kW, dengan selisih daya listrik yang dihasilkan sebesar 3,7 kW. Untuk mengetahui apakah ada perbedaan yang signifikan diantara keduanya, dilakukan analisis uji t pada kedua belah pihak sebagai berikut:

Simpangan baku dicari dengan persamaan 2:

$$S^2 = \frac{(n_1 - 1) s_1^2 + (n_2 - 1) s_2^2}{(n_1 + n_2) - 2}$$

$$S^2 = \frac{(810 - 1)32,19^2 + (810 - 1)23,68^2}{(810 + 810) - 2}$$

$$S = 28,26$$

Hasil uji rata-rata dua pihak dengan persamaan 1:

$$t = \frac{x_1 - x_2}{s \sqrt{\left(\frac{1}{n_1}\right) + \left(\frac{1}{n_2}\right)}}$$

$$t = \frac{49,72 - 45,23}{28,26 \sqrt{\left(\frac{1}{810}\right) + \left(\frac{1}{810}\right)}}$$

$$t = 3,198$$

Nilai presentil untuk distribusi t dengan dk = 1.618 pada peluang 95% dari *t-tabel* diperoleh: 2,243. Dengan kriteria pengujian H_0 diterima jika t hasil perhitungan terletak antara -2,243 dan 2,243, dan H_0 diolak jika t hasil perhitungan mempunyai nilai-nilai lain. Nilai t ditemukan sebesar 3,198. Sehingga H_0 ditolak, dengan kata lain ada perbedaan signifikan daya listrik yang dihasilkan antara konfigurasi *string-inverter* dengan *micro-inverter*.

Perbedaan kedua konfigurasi tersebut dihitung dengan persamaan 5:

$$y = \frac{(x_1 - x_2)}{x_2} \times 100$$

$$y = \frac{(49,72 - 45,23)}{45,23} \times 100$$

$$y = 9,93\%$$

Dari perhitungan di atas konfigurasi *micro-inverter* menghasilkan daya listrik lebih efisien dengan perbedaan yang signifikan sebesar 9,93% dibanding konfigurasi *string-inverter*.

Dari Gambar 9 terlihat bahwa *string-inverter* memiliki performa daya listrik terbaiknya pada pukul 08.00 sampai dengan pukul 09.00 dan pada pukul 14.00 hingga pukul 16.00. Pada waktu-waktu tersebut intensitas cahaya matahari atau foton yang mampu diserap oleh *photovoltaic module* rendah, dengan merangkai seri atau paralel *photovoltaic module* tersebut, dapat meningkatkan performa energi listrik yang dihasilkan pada keluaran *grid-tie inverter*. Sedangkan *micro-inverter* menghasilkan performa daya listrik terbaiknya pada pukul 10.00 sampai dengan pukul 13.00, dimana pada waktu-waktu tersebut, intensitas cahaya matahari yang diserap *photovoltaic module* tinggi sehingga lebih optimal jika menggunakan *grid-tie inverter* (GTI) pada masing-masing *photovoltaic module* tersebut.

1.2 Pengaruh Kondisi Cuaca Cerah

Dari Tabel 3 terlihat konfigurasi *micro-inverter* menghasilkan rata-rata performa daya listrik harian lebih besar yaitu 73,12 Watt dibanding *string-inverter* sebesar 60,3 Watt. Dengan perbedaan performa energi listrik yang dihasilkan kedua konfigurasi tersebut sebesar 21,26% seperti perhitungan di bawah ini:

$$y = \frac{(73,12 - 60,30)}{60,30} \times 100$$

$$y = 21,26\%$$

Dari Tabel 3 terlihat juga bahwa konfigurasi *string-inverter* lebih efisien pada pukul 8.00 sampai dengan pukul 9.00 walaupun dalam kondisi cuaca cerah. Pada pagi hari, sinar matahari memiliki intensitas cahaya yang rendah, juga arah datang sinar matahari tidak tegak lurus dengan *photovoltaic module*, sehingga iradiasi yang mampu diserap masing-masing *photovoltaic module* rendah. Dengan menseri atau paralel *photovoltaic module* tersebut, dapat meningkatkan performa daya listrik yang dihasilkan pada keluaran *grid-tie inverter*, itulah mengapa konfigurasi *string-inverter* lebih banyak menghasilkan daya listrik pada pagi hari. Selanjutnya dari pukul 9.00 sampai dengan pukul 16.00 konfigurasi *micro-inverter* lebih efisien dalam menghasilkan daya listrik. Dimana pada waktu-waktu tersebut, matahari memiliki intensitas cahaya yang tinggi, iradiasi yang dipancarkan matahari dapat diserap secara optimal oleh masing-masing *photovoltaic module*, sehingga energi yang dihasilkan akan lebih efisien jika setiap

photovoltaic module tersebut langsung terhubung dengan *grid-tie inverter (GTI)*.

1.3 Pengaruh Kondisi Cuaca Berawan

Dari [Tabel 4](#) terlihat konfigurasi *string-inverter* dalam kondisi cuaca berawan, menghasilkan rata-rata daya listrik lebih besar yaitu 37,78 Watt, sedangkan *micro-inverter* menghasilkan rata-rata daya listrik sebesar 32,86 Watt.

Dari [Tabel 4](#) juga terlihat bahwa dalam kondisi cuaca berawan, *string-inverter* menghasilkan daya listrik lebih efisien dari pukul 08.00 sampai dengan pukul 16.00. Hal ini disebabkan intensitas cahaya matahari yang diterima *photovoltaic module* berkurang karena terhalang oleh awan, iradiasi yang diserap *photovoltaic module* juga mengalami penurunan, dengan merangkai seri atau paralel pada *photovoltaic module* tersebut, dapat meningkatkan performa daya listrik yang dihasilkan. Sehingga dalam kondisi cuaca berawan, konfigurasi *string-inverter* lebih optimal dalam menghasilkan daya listrik.

Dalam kondisi cuaca berawan, besarnya perbedaan energi listrik yang dihasilkan antara konfigurasi *string-inverter* dan *micro-inverter* yakni sebesar 14,97% seperti perhitungan di bawah ini:

$$y = \frac{(37,78 - 32,86)}{32,86} \times 100$$

$$y = 14,97\%$$

1.4 Pengaruh Kondisi Cuaca Hujan

Dari [Tabel 5](#) dalam kondisi cuaca hujan, konfigurasi *string-inverter* menghasilkan performa daya listrik yang lebih besar yaitu 3,38 Watt. Sedangkan *string-inverter* menghasilkan 2,51 Watt. Kedua konfigurasi menghasilkan performa daya listrik sangat kecil, rata-rata sekitar 2,95 Watt. Dengan kata lain dalam kondisi cuaca hujan keduanya mengalami penurunan daya listrik yang signifikan.

Dalam kondisi cuaca hujan, dimana intensitas cahaya dan iradiasi matahari berkurang, justru konfigurasi *string-inverter* menunjukkan performa lebih baik dalam menghasilkan daya listrik, karena dapat meningkatkan besaran arus dan tegangan pada *photovoltaic module* sebagai inputan *grid-tie inverter (GTI)*. Dengan perbedaan efisiensi rata-rata sebesar 25,74% dibandingkan dengan konfigurasi *micro-inverter*, seperti dalam perhitungan di bawah ini:

$$y = \frac{(3,38 - 2,51)}{2,51} \times 100$$

$$y = 25,74\%$$

1.5 Efisiensi Daya Maksimum Photovoltaic Module Terhadap Iradiasi Matahari

Faktor Pengisi (*Fill Factor*) *photovoltaic module* dapat dihitung menggunakan persamaan 7

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc} \times V_{oc}}$$

$$FF = \frac{100}{4,9 \times 24,66}$$

$$FF = 0,83$$

Sehingga efisiensi daya maksimum *photovoltaic module* dapat diketahui menggunakan persamaan 6:

$$\eta = \frac{I_{sc} \times V_{oc} \times FF}{IFF \times A_c}$$

Dengan IFF adalah rata-rata iradiasi matahari Tahun 2023 di lokasi penelitian berdasar data [Gambar 8](#) yaitu diketahui besarnya rata-rata iradiasi matahari pada bulan April sebesar 242 Wh/m^2 , pada bulan Mei sebesar 270 Wh/m^2 , dan pada bulan Juni sebesar 273 Wh/m^2 . Sedang A_c adalah luas *photovoltaic module* berdasar *datasheet* yaitu 1,02 m^2 . Sehingga efisiensi maksimum *photovoltaic module* pada bulan april tahun 2023 dapat dihitung sebagai berikut:

$$\eta = \frac{4,9 \times 24,66 \times 0,83}{242 \times 1,02} \times 100$$

$$\eta = 40,63\%$$

Dengan cara yang sama, besarnya efisiensi maksimum *photovoltaic module* pada bulan Mei dan Juni tahun 2023 seperti yang terlihat pada [Gambar 10](#). Terlihat bahwa performa daya maksimum *photovoltaic module* dalam menyerap sinar matahari menjadi energi listrik pada bulan April sebesar 40,63%, bulan Mei terjadi penurunan menjadi 36,42%, dan menurun lagi pada bulan Juni menjadi 36,02%. Perhitungan efisiensi *photovoltaic module* terhadap iradiasi matahari tidak dipengaruhi oleh kondisi cuaca, akan tetapi ditentukan oleh sudut antara arah sinar matahari ke permukaan atmosfer. Sudut ini akan berubah pada pagi, siang, hingga sore hari, dan akan berbeda di lintang yang berbeda dan pada musim yang berbeda. Sehingga terjadinya penurunan efisiensi seperti yang terlihat pada gambar di atas, akibat dari naiknya iradiasi matahari yang dipancarkan matahari di lokasi penelitian. Sementara itu kemampuan maksimum panel surya dalam menyerap iradiasi matahari menjadi listrik, tidak mengalami perubahan, tetap sebesar 100 Wh/m^2 .

1.6 Efisiensi Daya Keluaran Photovoltaic Module Terhadap Iradiasi Matahari

Berdasar [Tabel 6](#), efisiensi daya keluaran *photovoltaic module* dengan konfigurasi *micro-inverter* pada bulan April dapat dihitung sebagai berikut:

$$\eta = \frac{19,19 \times 2,06 \times 0,83}{242 \times 1,02} \times 100$$

$$\eta = 13,29 \%$$

Dengan cara perhitungan yang sama, dapat diperoleh efisiensi dari masing-masing *photovoltaic module* pada bulan April, Mei dan Juni tahun 2023 seperti pada Tabel 7. Pada tabel tersebut terlihat terjadi penurunan efisiensi pada bulan april hingga juni disebabkan oleh meningkatnya iradiasi matahari dan berkurangnya intensitas cahaya matahari yang diserap oleh *photovoltaic module* akibat dari meningkatnya kondisi cuaca berawan dan hujan. Dari perhitungan didapat besarnya efisiensi rata-rata *micro-inverter* sebesar 10,03% - 11,40% dan efisiensi rata-rata *string-inverter* sebesar 7,17% - 9%.

1.7 Energi Listrik yang Dihasilkan Dalam kWh

Dari Tabel 8 tersebut di atas terlihat konfigurasi *micro-inverter* menghasilkan energi listrik (kWh) meter yang lebih besar dibanding *string-inverter* pada tiap bulannya. Dengan total energi listrik (kWh) selama tiga bulan sebesar 39,3 kWh untuk *micro-inverter* dan 35,7 kWh untuk *string-inverter*.

1.8 Faktor Daya Keluaran Grid-tie Inverter

Kedua konfigurasi baik *micro-inverter* maupun *string-inverter*, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 11 dan Gambar 12, memiliki faktor daya yang rendah, berkisar antara 0,35 hingga 0,4. Ini jauh dari nilai yang ditetapkan oleh Standar Pembangkit Listrik Negara (SPLN) yaitu minimal sebesar 0,85. Rendahnya faktor daya menunjukkan kurang efisiensinya PLTS *grid-tie*. Artinya dari total energi listrik yang dihasilkan PLTS tidak semua dapat dikonversi menjadi energi listrik, justru sebagian besar malah berubah menjadi energi lain, misalkan menjadi energi panas. Apabila faktor daya kurang dari 0,85 untuk pemakaian listrik industri, maka PLN akan memperhitungkan kelebihan pemakaian *Kilo Volt Ampere Reaktif Hours (kVARh)*, disamping pemakaian energi listrik (kWh) yang sudah ada. Dengan demikian faktor daya harus diperbaiki menjadi tinggi, sesuai dengan yang diharapkan, yaitu antara 0,85 hingga 1.

Dari kedua gambar di atas juga memperlihatkan bahwa semakin besar daya listrik yang dihasilkan oleh *photovoltaic module*, semakin besar pula nilai faktor dayanya. Disamping itu, faktor daya juga terlihat tidak stabil dan mudah berubah-ubah nilainya, ketidakstabilan faktor daya kemungkinan disebabkan oleh *drop* tegangan karena pengaruh cuaca atau panas berlebih pada *photovoltaic module*. Dapat pula disebabkan lepasnya *phase*

locked loop (PLL) inverter saat *synchronize* dengan jaringan *grid* PLN. Sedangkan rendahnya faktor daya kemungkinan disebabkan karena *supply* PLTS lebih rendah dibanding *supply* dari PLN terhadap beban yang digunakan pada saat penelitian ini berlangsung. Untuk memastikannya perlu penelitian lebih lanjut mengenai faktor daya pada PLTS terhubung *grid-tie*.

4. KESIMPULAN

Dari analisis hasil dan pembahasan dapat disimpulkan dalam mendesain dan membuat konfigurasi panel surya terhubung *grid-tie* dapat dilakukan dengan cara *micro-inverter* dan *string-inverter*. Konfigurasi *micro-inverter* yaitu menghubungkan setiap keluaran satu panel surya dengan satu buah *grid-tie inverter*. Sedangkan konfigurasi *string-inverter* yaitu beberapa panel surya dirangkai seri atau paralel baru dihubungkan dengan satu buah *grid-tie inverter*. Selanjutnya masing-masing *grid-tie inverter* ini dihubungkan dengan jaringan *grid* PLN.

Hasil analisis efisiensi daya listrik yang dihasilkan antara konfigurasi *micro-inverter* dan *string-inverter* serta pengaruh cuaca, didapatkan hasil dalam berbagai kondisi cuaca, panel surya dengan konfigurasi *micro-inverter* menghasilkan daya listrik lebih efisien dengan perbedaan yang signifikan dibanding *string-inverter*, dengan perbedaan mencapai 9,93%. Dalam kondisi cuaca cerah, panel surya dengan konfigurasi *micro-inverter* menghasilkan daya listrik lebih efisien dibanding *string-inverter* sebesar 21,26%. Dalam kondisi cuaca berawan dan hujan, panel surya dengan konfigurasi *string-inverter* menghasilkan performa daya listrik lebih efisien dibanding konfigurasi *micro-inverter*, saat cuaca berawan mencapai 14,97%, saat cuaca hujan mencapai 25,74%. Panel surya dengan konfigurasi *micro-inverter* memiliki efisiensi rata-rata 10,03% - 11,4% sedang *string-inverter* memiliki efisiensi rata-rata 7,17% - 9%. Besaran rata-rata faktor daya konfigurasi *micro-inverter* yaitu sebesar 0,35 dan *string-inverter* sebesar 0,4. Kedua konfigurasi tersebut sangat kecil, tidak sesuai dengan Standar Pembangkit Listrik Negara (SPLN) yaitu minimal sebesar 0,85.

Didapatkan konfigurasi PLTS yang optimal yaitu menggunakan konfigurasi *micro-inverter* yang memiliki performa daya listrik lebih efisien dalam berbagai kondisi cuaca yang sesuai di sebagian besar wilayah Indonesia. Sedangkan konfigurasi *string-inverter* memiliki performa daya listrik lebih efisien pada saat kondisi cuaca berawan dan hujan,

sesuai untuk wilayah Indonesia yang memiliki curah hujan lebih tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. Kaizuka, A. Jäger Waldau, dan J. Donoso, *Snapshot of Global PV Markets 2023 Task 1 Strategic PV Analysis and Outreach PVPS*, IEA-PVPS T1-44:2023. France: IEA PVPS, 2023. [Daring].
- [2] A. Pribadi, “Semakin Ekonomis, Pengguna PLTS Atap Diharapkan Terus Bertambah,” *Energi Baru Terbarukan dan Konversi Energi (EBTKE)*. Diakses: 22 September 2023. [Daring].
- [3] A. Zayyinun dan M. Widyartono, “Prototipe Mesin Stirling Menggunakan Panas Sinar Matahari Sebagai Energi Alternatif,” *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 9, no. 2, hlm. 459–466, 2020.
- [4] I. Wahidin dan R. Hidayat, “Perancangan Pembangkit Tenaga Listrik Tenaga Surya Dengan Panel Surya Monocrystalline 60 Wp,” *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan, Juli*, vol. 2023, no. 14, hlm. 378–387, doi: 10.5281/zenodo.8173835.
- [5] R. Abdullah dan S. Subiyanto, “Sistem Hibrida Pembangkit Listrik Energi Terbarukan Terhubung Grid Dengan Kerangka Referensi Natural,” *Jetri: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 16, no. 1, hlm. 1–16, Agu 2018, doi: 10.25105/jetri.v16i1.2940.
- [6] A. Wibowo, “*Instalasi Panel Listrik Surya*”. Semarang: Yayasan Prima Agus Teknik, 2022.
- [7] O. A. Rozak, M. Marfin, I. Irvan, dan J. Setiawan, “Analisis Pengaruh Kondisi Cuaca Pada Efisiensi Sel Surya Monocrystalline, Polycrystalline dan Thin Film,” *EPIC Journal of Electrical Power Instrumentation and Control*, vol. 5, no. 2, hlm. 186, Jan 2023, doi: 10.32493/epic.v5i2.28401.
- [8] Susilo Budi, “*Mengenal Iklim dan Cuaca Di Indonesia*”. Yogyakarta: DIVA Press, 2021.
- [9] S. Widayawati Putri, G. Marausna, dan E. Eko Prasetyo, “Analisis Pengaruh Intensitas Cahaya Matahari Terhadap Daya Keluaran Pada Panel Surya,” *Teknika STTKD: Jurnal Teknik, Elektronik, Engine*, vol. 8, no. 1, hlm. 29–37, Jul 2022, doi: 10.56521/teknika.v8i1.442.
- [10] Jamaaluddin, “*Buku Petunjuk Pengoperasian Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)*”. Sidoarjo: UMSIDA Press, 2021.
- [11] Q. Lagarde, B. Beillard, S. Mazen, M. S. Denis, dan J. Leylaverigne, “Performance ratio of photovoltaic installations in France: Comparison between inverters and micro-inverters,” *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. King Saud University, 2021. doi: 10.1016/j.jksues.2021.11.007.
- [12] S. Tiwari, R. Pandey, dan A. Goswami, “Performance Comparison of 3kW Residential Grid-Connected Photovoltaic System between Micro-inverter and String-inverter Topology using System Advisor Model,” *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 08, no. 09, hlm. 1129–1131, Sep 202.
- [13] S. Nahela, I. Fauzi Faridyan, N. Arief Rachman, A. Risdiyanto, dan B. Susanto, “Analisis Perbandingan Supply Arus Grid-Tied Inverter Panel Surya Dan Pln Pada Beban 400 Watt Terhadap Radiasi Matahari,” *Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan*, vol. 18, no. 2, hlm. 69–78, 2019.
- [14] Ryan Rezky Ramadhan, I. M. Moch, Abdul Hafid, dan Adriani, “ANALISIS PLTS ON GRID,” *Vertex Elektro*, vol. 14, no. 1, hlm. 12–25, Feb 2022.
- [15] Salmaa, “Penelitian Eksperimen: Tujuan, Jenis, Langkah, Contoh,” Penerbit Depublish. Diakses: 22 September 2023.
- [16] M. Syaban dan E. Ratnaningrum, “*Statistika Penelitian*”, vol. 3. Bandung: Informatika Bandung, 2021.
- [17] Solargis, “Global Solar Atlas,” World Bank Group. Diakses: 21 Mei 2023.