

# Kajian Kelayakan *Solar Rooftop On-Grid* untuk Kebutuhan Listrik Bengkel Mesin di Polinema

ASRORI ASRORI<sup>1</sup>, ACHMAD FAJAR RAMDHANI<sup>2</sup>, PIPIT WAHYU NUGROHO<sup>3</sup>, IRWAN HERYANTO ERYK<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup>Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Malang, Indonesia

<sup>4</sup>Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, Indonesia

Email : [asrori@polinema.ac.id](mailto:asrori@polinema.ac.id)

Received 6 Juni 2022 | Revised 21 Juli 2022 | Accepted 26 Juli 2022

## ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan melakukan studi kelayakan berupa perencanaan, simulasi dan analisis teknis maupun ekonomis pemasangan solar rooftop sistem on-grid di gedung Teknik Mesin Politeknik Negeri Malang (Polinema). Metode perencanaan dan simulasi menggunakan software PvSyst 6.88. Kajian kelayakan instalasi solar rooftop ini berdasarkan : Net Present Value (NPV), Profitability Index (PI) dan Pay Back Period (PBP). Kebutuhan listrik di bengkel mesin adalah 505,8 kWh/hari. Daya Rencana solar rooftop sebesar 332 kWh (65,6%) dan sisanya dari PLN. Hasil simulasi diperoleh panel surya tipe monocrystalline 440 Wp sebanyak 169 unit dan 6 unit inverter jaringan 12 kVa. Energi listrik yang diproduksi dapat mencapai 101,6 MWh/tahun. Performa sistem sebesar 83,63%. Modal awal adalah Rp. 1.281.440.000,00, NPV adalah Rp. 919.842.956,00, dan PI bernilai 1,72. Sehingga estimasi PBP adalah 11,18 tahun. Sehingga berdasarkan aspek teknis dan aspek ekonomis, proyek Solar Rooftop On-Grid ini dinilai layak dilaksanakan.

**Kata kunci:** studi kelayakan, tenaga surya, solar rooftop, on-grid, PvSyst

## ABSTRACT

The purpose of this research is to conduct a feasibility study on installing a solar rooftop on-grid system at the State Polytechnic of Malang's Mechanical Engineering building, which will include design, simulation, and technical and economic analysis. PvSyst 6.88 software is used in the planning and simulation methods. Analysis of investment feasibility consists of Net Present Value (NPV), Profitability Index (PI), and Pay Back Period (PBP). The electricity demand in the machine workshop reaches 505.8 kWh/day. The solar rooftop solar plan power is 332 kWh (65.6%) and the rest is from PLN. The simulation results obtained 169 units of 440 Wp monocrystalline solar panels and 6 units of 12 kVa grid inverters. The electrical energy produced can reach 101.6 MWh/year. The performance ratio is 83.63%. The total investment is IDR 1,281,440,000 with an NPV of IDR 919,842,956, and PI is 1.72. So the estimated PBP is 11.18 years. So based on the technical and economic aspects, the Solar Rooftop On-Grid project is considered feasible.

**Keywords:** feasibility study, solar energy, solar rooftop, on-grid, PvSyst

## 1. PENDAHULUAN

Saat ini energi menjadi kebutuhan vital bagi umat manusia. Permintaan energi global terus mengalami peningkatan secara ekponensial, sehingga dapat menimbulkan dampak dalam berbagai sektor. Selama satu abad, dunia masih mengandalkan energi konvensional (bahan bakar fosil) yang sifatnya tidak ramah lingkungan, seperti batubara, gas, dan minyak bumi. Sementara itu, sumber daya alam minyak bumi semakin langka dan mahal harganya. Diprediksi cadangan sumber energi fosil di seluruh dunia akan habis, seperti minyak bumi pada tahun 2050, gas alam di tahun 2090, dan batu bara diperkirakan bertahan hingga tahun 2200 (**Zou, dkk, 2016**). Oleh karena itu diperlukan alternatif secepatnya untuk memenuhi kebutuhan energi dunia kedepannya. Salah satu strateginya adalah penggunaan sumber yang dapat diperbarui atau energi baru terbarukan. Energi Baru Terbarukan (EBT) mempunyai *sustainability* sepanjang masa seperti pancaran sinar matahari, angin, dan air. Salah satu bentuk EBT yang hampir terdapat di semua wilayah permukaan bumi adalah sinar matahari. Energi radiasi matahari ini dapat dieksplorasi melalui dua cara yaitu pemanfaatan energi panas (*solar thermal*) dan energi foton (*photovoltaic*) yang ditangkap dengan sel surya/panel surya untuk dikonversikan menjadi energi listrik (**Kalogirou, 2009**). Inti matahari mengeluarkan energi reaksi nuklir fusi sebesar  $3,8 \times 10^{20}$  MW. Permukaan matahari mengeluarkan energi kurang lebih  $63 \text{ MW/m}^2$ . Energi ini diradiasikan ke semua arah kepenjuru alam semesta, sedangkan radiasi yang mencapai bumi sekitar  $1,7 \times 10^{11}$  MW. Energi matahari yang mencapai bumi sekitar 30 % nya saja. Namun demikian, kebutuhan energi di bumi dalam setahun cukup diambil dari pemanfaatan energi matahari yang bersinar hanya setengah jam (**Duffie & Beckman, 2021**).

Sementara itu, wilayah Indonesia terletak pada zona tropis khatulistiwa dengan rata-rata radiasi matahari berkisar  $4,8 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$ . Sumber energi matahari yang begitu besarnya ini, masih belum menjadi skala prioritas (**Ali & Windarta, 2020**). Selain itu, kondisi geografis dan topografis sebagai negara kepulauan, menyebabkan pemerintah kesulitan untuk memenuhi kebutuhan listrik melalui jaringan (*grid*) konvensional. Namun demikian, dengan adanya regulasi pemerintah (Permen ESDM No. 26 Tahun 2021) dan ditunjang pesatnya teknologi, memungkinkan masyarakat umum maupun instansi di Indonesia dapat membangun pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) Atap (*solar rooftop*) secara mandiri dengan harga yang terjangkau (**EBTKE, 2021**). PLTS Atap yang dapat dikembangkan dapat dengan sistem *On-Grid* maupun *Off-Grid* (**Jufrizel & Irfan, 2017**) (**Putri, dkk, 2020**).

Dalam kurun lima tahun terakhir, perkembangan teknologi panel surya maju secara pesat. Ditambah lagi dengan adanya kepastian regulasi pemerintah, akan berdampak pada pengembangan EBT khususnya tenaga surya. Aplikasi panel surya untuk pemenuhan kebutuhan listrik untuk skala rumah tangga ataupun untuk fasilitas umum, juga mulai diteliti dan dikembangkan. Perencanaan, estimasi dan perancangan dari sebuah sistem PLTS Atap untuk lokasi pabrik, fasilitas umum atau tempat tinggal untuk skala menengah ( $10 \text{ kW}$ - $100 \text{ kW}$ ), biasanya didahului dengan analisis studi kelayakan (**Rega, dkk, 2021**) (**Hajir, dkk, 2022**). Namun demikian, terdapat beberapa peneliti yang langsung menerapkan sistem PLTS sederhana untuk diinstal di beberapa lokasi dengan jenis dan kapasitas bervariasi (**Tambunan, dkk, 2020**) (**Asrori, dkk, 2021**). Pengaruh beberapa variabel (*shadow*, kecepatan angin, temperatur panel, dll) terhadap karakteristik dan unjuk kerja pada instalasi *PV-Module* juga banyak dilakukan penelitian. Hasilnya dapat memberikan data dukung dalam aplikasi di lapangan (**Saodah & Utami, 2019**) (**Asrori, dkk, 2019**) (**Hidayat, dkk, 2019**).

Sistem PLTS tersusun dari beberapa komponen utama yaitu panel surya (*PV-Module*), *Solar Charger Controller* (SCC), baterai, dan *inverter* serta komponen pendukung lainnya. Sistem instalasi PLTS terdiri dari *On-Grid*, *Off-Grid* dan *Hybrid System* (Parastiwi, dkk, 2018). PLTS *Off-Grid* merupakan sistem pembangkitan yang tidak terhubung dengan jaringan sumber listrik lainnya (*stand-alone*), misalnya PLN. Kelemahan sistem ini adalah listrik tidak dapat digunakan pada saat kondisi hujan/mendung atau malam hari. Sehingga sistem *Off-Grid* ini memerlukan *energy storage* berupa baterai (Muslim, dkk, 2020).

PLTS *On-Grid* merupakan sistem jaringan yang terhubung dengan jaringan listrik PLN. Sistem ini tidak menggunakan baterai, sehingga secara investasi awal jaringan *On-Grid* bisa mengurangi hingga 50% dibanding *Off-Grid*. Apabila sudah terhubung dengan jaringan listrik PLN maka inverter *On-Grid* baru dapat berfungsi (Sianipar, 2014). Jenis *On-Grid* ini akan mempunyai kinerja yang optimal juga digunakan pada siang hari, karena bisa langsung disuplai dari panel surya. Sistem ini juga dikenal dengan *net-metering*, dimana terjadi proses *import-export* arus listrik. Metode ini, memungkinkan seorang pelanggan akan mengeksport arus ke PLN apabila listrik hasil panel surya yang dipasang berlebih. Begitu juga sebaliknya, jika kekurangan maka listrik bisa diimpor dari PLN. PLTS Atap tipe ini cocok diterapkan di gedung perkantoran, pabrik, fasilitas umum, *home industry* dan perumahan. Pemasangan *solar rooftop* tersebut dapat mengurangi pengeluaran biaya listrik secara signifikan (Haq, dkk, 2021).

PLTS *Hybrid* adalah hibrida jaringan listrik dari pembangkit tenaga surya dengan sumber pembangkit listrik yang berbeda, misalnya tenaga mikrohidro (PLTMH), tenaga bayu (PLTB), atau tenaga diesel (PLTD) (Syahril, dkk, 2018). Sistem ini merupakan alternatif terbaik untuk daerah terpencil yang tidak terjangkau jaringan PLN dan Sistem pembangkit lainnya, seperti PLTD. Sehingga PLTS *hybrid* juga *feasible* untuk diterapkan di Indonesia, khususnya wilayah bagian timur. Jenis *hybrid* pada umumnya menggunakan energi listrik utama (primer) berupa energi EBT dan sumber energi listrik lainnya sebagai pembangkit sekunder (Hidayat, dkk, 2019).

Seiring dengan perkembangan teknologi PLTS tersebut banyak peneliti yang melakukan analisis/kajian berkaitan dengan aspek teknis maupun ekonomis, khususnya instalasi PLTS Atap (*solar rooftop*) di Indonesia. Metode analisis teknis dan ekonomis dari sistem instalasi PLTS yang direncanakan tersebut, banyak menggunakan berbagai aplikasi *software* dan algoritma, misalnya: *Genetic Algorithm*, *PSO*, *SAM*, *HOMER*, *MATLAB*, *Grhyso*, *ETAP*, *Arena*, *PV-DesignPro*, *Hybrid2*, *PvSyst*, *Insel*, *Solsim*, *Watsun-PV* (Manullang, dkk, 2020) (Alfaridzi, dkk, 2020). Penggunaan *software PVSys* untuk menganalisis kelayakan teknis dan ekonomis proyek pemasangan PLTS Atap (*solar rooftop*) di Instansi pendidikan (kampus/sekolah), banyak dilakukan oleh beberapa peneliti. Kajian kelayakan proyek *solar rooftop* sistem *off-grid* untuk fasilitas gedung kampus yang dilakukan menghasilkan analisis ekonomis. Selain itu juga informasi tentang spesifikasi komponen utama sistem *off-grid* yang dirancang yaitu *PV-Modul*, *solar charger controller* dan *battery* yang digunakan (Al Bahar & Maulana, 2018). Pada sistem *Off Grid* juga dilakukan analisis kondisi baterai (*DoD/SoC*), sistem *string* rangkaian *PV-module*, penambahan komponen seperti *inverter* dan *Automatic Transfer Switch* (ATS) demi meningkatkan efisiensi dan kehandalan sistem (Ali, dkk, 2020).

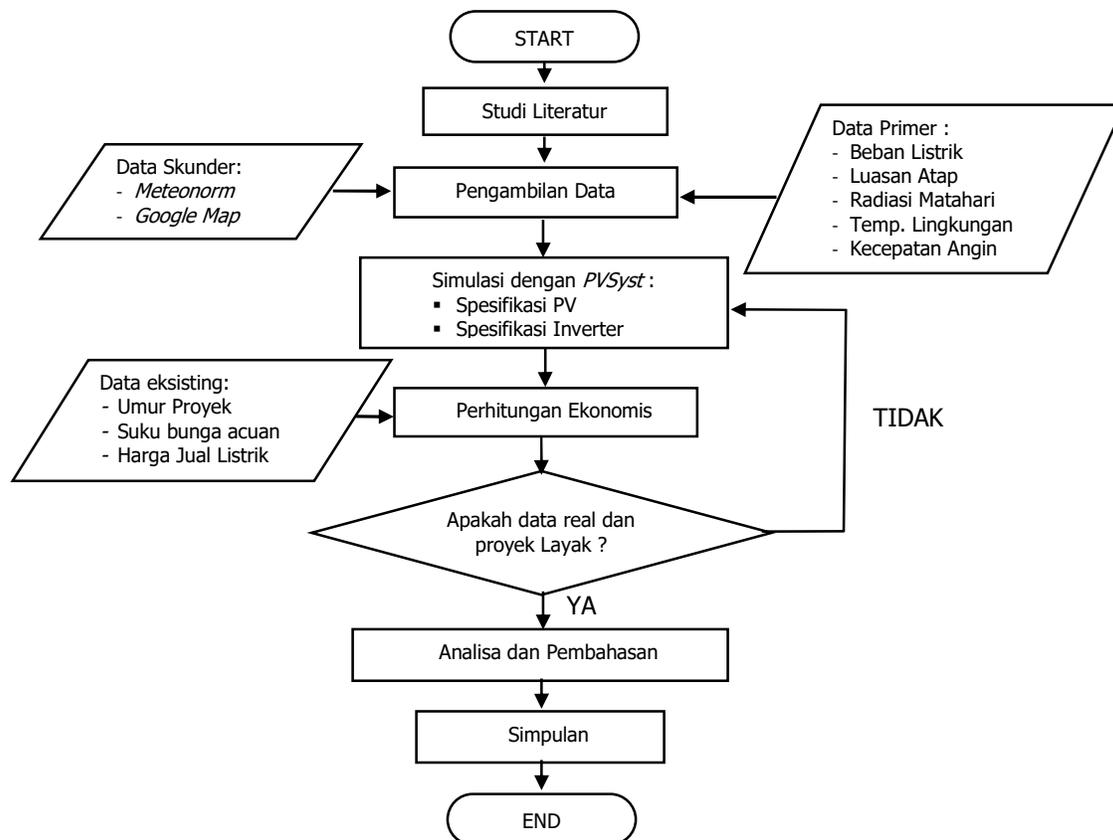
Sedangkan beberapa peneliti lain, menggunakan *software PVSys* untuk mengkaji kelayakan *solar rooftop* tipe *On-Grid*. Dengan mempertimbangkan berbagai parameter *input*, hasil analisis diperoleh beberapa informasi, misalnya: konfigurasi instalasi sistem, spesifikasi komponen, dan manajemen energi sehingga dapat diketahui *performance ratio* atau

kehandalan sistem yang dirancang (**Fuaddin & Daud, 2020**). Selain itu, salah satu keunggulan dari *Software PV Syst* ini dapat tersinkronisasi dengan *database* yang bersumber dari data meteorologi atau *google map*, dan adanya *update database* komponen real yang ada di pasar. Sehingga dapat dihasilkan sebuah simulasi/rancangan sistem PLTS sesuai dengan kondisi nyata (**Husnayain & Luthfy, 2020**). Perencanaan PLTS *rooftop* dengan *PV Syst* akan menghasilkan rekomendasi desain teknis dan tingkat kehandalan pembangkitan berupa *performance ratio* (PR). Dimana suatu indikasi kelayakan suatu sistem yang dirancang tersebut jika nilai PR lebih besar 0,6. Sedangkan analisis kelayakan proyek dihitung berdasarkan *Net Present Value* (NPV), *Benefit Cost Ratio* (BCR) dan *Payback Period* (PP). Sehingga dari hasil kajian aspek teknis dan ekonomi ini, diperoleh rekomendasi bahwa proyek yang direncanakan layak (*feasible*) dilakukan (**Rafli, dkk, 2022**).

## 2. METODE PENELITIAN

### 2.1 Alur Perencanaan

Metode Analisis kelayakan proyek menggunakan *software PV Syst Ver. 6.88*. Lokasi pemasangan *Solar Rooftop* pada koordinat 7,9553 °LS dan 112,6125 °BT. Diagram alir penelitian pada perencanaan *Solar Rooftop* di Gedung Teknik Mesin Polinema, ditunjukkan dalam Gambar 1.



**Gambar 1. Flow Chart Perencanaan**

Perencanaan kelayakan *solar rooftop* ini, meliputi: 1–Pemetaan lokasi. 2–Pengukuran radiasi matahari secara langsung di lokasi. 3–Perhitungan konsumsi listrik bengkel mesin perkakas.

4–Melakukan simulasi dengan *PVSyst software* untuk mengetahui hasil efisiensi komponen PLTS yang dirancang. 5–Perhitungan ekonomi kelayakan. Beberapa variabel dalam penelitian ini meliputi radiasi matahari, spesifikasi baterai, spesifikasi panel surya, jumlah panel, kapasitas inverter, energi yang dibutuhkan beban, dan kelayakan ekonomi.

## 2.2 Dasar Formulasi

### 2.2.1 Aspek Teknis

#### Perhitungan kebutuhan area *roof toop*

Luasan panel surya (*PV Area*),  $A_{PV}$ , dalam  $m^2$ , dapat dihitung dengan Persamaan (1) (Hajir, dkk, 2022).

$$A_{PV} = \frac{E_L}{G_{avg} \times TCF \times \eta_{PV} \times \eta_{out}}, \quad (1)$$

dimana;  $E_L$  = energi listrik, kWh/hari;  $G_{avg}$  = rata-rata radiasi surya harian,  $kW/m^2/hari$ ;  $TCF$  = *Temperature Coefficient Factor*;  $\eta_{PV}$  = efisiensi *PV-module*;  $\eta_{out}$  = Efisiensi sistem = 0,95.

#### Daya rencana *solar rooftop*

Daya *Photovoltaic* ( $P_{PV}$ ) yang direncanakan pada sistem PLTS Atap (*solar rooftop*) dalam satuan *Wp* (*Watt Peak*) dihitung dengan Persamaan (2), sebagai berikut (Rega, dkk, 2021):

$$P_{PV} = A_{PV} \times G_p \times \eta_{PV}, \quad (2)$$

dimana;  $A_{PV}$  = luas permukaan panel surya,  $m^2$ ;  $G_p$  = Radiasi puncak (=  $1000 W/m^2$ );  $\eta_{PV}$  = efisiensi *PV-Module*. Sedangkan, jumlah panel surya ( $N_{PV}$ ) dapat dihitung menggunakan Persamaan (3).

$$N_{PV} = \frac{P_{PV}}{P_{Max}}, \quad (3)$$

dimana,  $P_{max}$  = daya maksimum unit panel surya, *Wp*.

#### Spesifikasi Inverter

*Inverter* adalah perangkat elektronika yang berfungsi mengubah voltase DC menjadi AC. Frekuensi tegangan yang dihasilkan inverter adalah *pure sine wave* dengan *single* atau *3 phase*. Kapasitas inverter dapat ditentukan dengan Persamaan (4) (Hajir, dkk, 2022).

$$C_{inv} = P_{PV} \times SF, \quad (4)$$

dimana;  $C_{inv}$  = kapasitas inverter, *kVA*;  $SF$  = *safety factor* = 1,25.

### 2.2.2 Aspek Ekonomis

#### Biaya Investasi *Solar Rooftop*

Secara umum biaya investasi awal (*Cost*) pemasangan PLTS Atap pada Gedung Teknik Mesin Polinema, terdiri dari: biaya kajian *feasibility study* (FS), *engineering design*, belanja alat dan komponen, biaya konstruksi, biaya instalasi ME (Mekanikal Elektrikal), akomodasi, transportasi, dan biaya umum lainnya (Hajir, dkk, 2022).

#### Biaya *Operation and Maintenance* (OM)

Biaya pemeliharaan dan operasional (M) PLTS Atap selama setahun, dihitung menggunakan Persamaan (5).

$$M = 1\% \times C, \quad (5)$$

dimana,  $C$  adalah biaya investasi.

#### Biaya Siklus Hidup

*Life Cycle Cost* (LCC) atau Biaya siklus hidup proyek merupakan total anggaran yang dikeluarkan selama periode umur proyek. LCC dihitung mengikuti Persamaan (6) berikut:

$$LCC = C + M_{pw}, \quad (6)$$

dengan,  $M_{pw}$  adalah biaya nilai sekarang untuk total biaya OM selama  $n$  tahun atau selama usia proyek.  $M_{pw}$  dapat dituliskan seperti pada Persamaan (7).

$$M_{pw} = M \left[ \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right], \quad (7)$$

dimana,  $i$  = suku bunga acuan.

### Biaya Energi *Solar Rooftop*

Perhitungan biaya energi pemasangan *solar rooftop* yang disebut *Cost of Energy* (CoS) tergantung beberapa faktor biaya, yaitu : biaya siklus hidup (LCC), *Capital Recovery Factor* (CRF) atau faktor pemulihan modal dan produksi energi tahunan PLTS Atap ( $\Sigma E$ ). Faktor pemulihan modal ini dihitung berdasarkan Persamaan (8), yaitu:

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}, \quad (8)$$

dimana;  $i$  = suku bunga acuan,  $n$  = periode/usia proyek. Sehingga *Cost of Energy* (COE) dapat diperoleh dari Persamaan (9) berikut:

$$COE = \frac{LCC \times CRF}{\Sigma E}, \quad (9)$$

### 2.2.3 Aspek Kelayakan

Parameter kelayakan investasi instalasi *solar rooftop* ini dapat ditentukan oleh perhitungan *Net Present Value* (NPV), *Indek keuntungan* atau *Profitability Index* (PI) dan periode balik modal atau *Pay Back Period* (PBP) (Al Bahar & Maulana, 2018).

#### *Net Present Value* (NPV)

*Net Present Value* (NPV) merupakan seluruh *cash flow* bersih yang dinilai sekarang berdasar *discount factor* (DF). Faktor diskonto (DF) pada tahun ke- $n$  dapat dihitung dengan Persamaan (10). Sedangkan, NPV dihitung sebagaimana Persamaan (11).

$$DF = \frac{1}{(1+i)^n}, \quad (10)$$

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{NCF_t}{(1+i)^t} - C, \quad (11)$$

Suatu investasi proyek dinilai layak jika  $NPV > 0$  atau *NPV* bernilai positif.

#### *Profitability Index* (PI)

*Indek keuntungan/Profitability Index* adalah total kas bersih nilai sekarang (PVNCF<sub>t</sub>) dibagi modal awal (C). Sehingga, Persamaan (12) merupakan rumus dari *Profitability Index* (PI).

$$PI = \frac{PVNCF_t}{C}, \quad (12)$$

Suatu investasi pemasangan *solar rooftop* ini dikatakan layak, jika  $PI > 1$  atau *Profitability Index* bernilai positif.

### Pay Back Period (PBP)

Periode balik modal (*Pay Back Period*) merupakan rentang waktu yang dibutuhkan agar modal/investasi dapat kembali. *Pay Back Period* (PBP) dapat dianalisis dengan *kurva NPV* atau dengan menggunakan Persamaan (13).

$$PBP = \frac{LCC}{P}, \quad (13)$$

dimana,  $P$  (*profit*) adalah laba bersih selama setahun. Laba bersih merupakan nilai jual listrik dikurangi biaya operasi dan perawatan ( $M$ ) selama satu tahun. Suatu investasi dinilai layak, jika  $PBP < n$ , atau tahun kembali modal dibawah umur proyek ( $n$ ). Semakin jauh dibawah umur proyek semakin besar potensi keuntungan suatu proyek.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1 Estimasi Potensi Energi Radiasi Matahari

Pengambilan data radiasi matahari di lokasi dilakukan melalui pengukuran langsung (data primer) dan data *meteonorm* yang ada pada *software pvsyst* (data sekunder). Berdasarkan hasil simulasi *software PVsyst* intensitas radiasi global matahari atau *Global Horizontal Irradiation/irradiance* (GHI) dalam satuan kWh/m<sup>2</sup>/day disajikan pada Gambar 2.

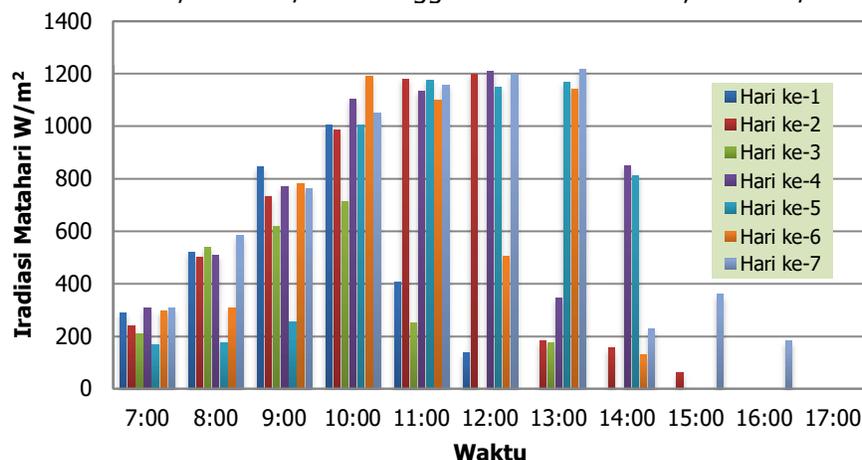
Site <b>Gedung Mesin Polinema (Indonesia)</b>						
Data source	Meteonorm 7.2, Sat=100%					
	Horizontal global irradiation	Horizontal diffuse irradiation	Temperature	Wind Velocity	Linke Turbidity	Relative Humidity
	kWh/m <sup>2</sup> .day	kWh/m <sup>2</sup> .day	°C	m/s	[-]	%
January	3.46	2.31	25.0	1.80	3.947	80.4
February	3.63	2.30	24.7	2.30	3.852	81.5
March	3.70	2.54	25.1	1.39	3.803	80.8
April	4.23	2.37	25.4	1.50	3.992	79.6
May	4.51	2.02	25.8	1.71	3.648	75.6
June	4.67	2.10	24.8	2.00	3.648	75.6
July	4.63	1.97	24.6	2.30	3.803	72.0
August	4.95	2.44	24.7	2.40	3.900	69.8
September	5.08	2.73	25.2	2.30	4.374	69.6
October	5.14	2.75	26.4	2.09	4.835	69.4
November	5.42	2.62	26.1	1.60	5.219	75.1
December	3.77	2.55	25.5	1.39	5.142	78.2
<b>Year</b>	<b>4.44</b>	<b>2.39</b>	<b>25.3</b>	<b>1.9</b>	<b>4.180</b>	<b>75.6</b>
	Paste	Paste	Paste	Paste		
<b>Horizontal global irradiation year-to-year variability 5.1%</b>						

**Gambar 2. Estimasi GHI di Gedung Teknik Mesin Polinema**

Perencanaan sistem instalasi *solar rooftop* ini menggunakan nilai median dari hasil simulasi pada tahun 2021, yaitu 4,44 kWh/m<sup>2</sup>/hari. Temperatur lingkungan yang digunakan adalah 26,6 °C.

Selanjutnya untuk mendukung hasil data estimasi tersebut maka dilakukan pengukuran langsung radiasi matahari di lokasi *rooftop* gedung teknik mesin polinema dengan alat *solar powermeter* yang dilakukan pada bulan Maret 2021 selama 7 hari. Hasil pengukuran dapat

dilihat pada Gambar 3. Hasil pengukuran radiasi harian yang dilakukan selama 10 jam yaitu mulai pukul 07:00 hingga pukul 17:00 WIB. Hasilnya menunjukkan nilai minimum = 2,496 kWh/m<sup>2</sup>; maksimum = 7,039 kWh/m<sup>2</sup> sehingga rata-rata adalah 5,079 kWh/m<sup>2</sup>.



**Gambar 3. Data Pengukuran Radiasi Matahari Secara Langsung di Lokasi**

Hasil pengukuran radiasi matahari (Gambar 3) mempunyai rata-rata lebih tinggi dari perhitungan estimasi dari aplikasi *software*. Hal ini dikarenakan cakupan data pengukuran langsung hanya dilakukan selama 7 hari saja sehingga sebaran datanya kurang mencukupi untuk digunakan sebagai data masukan dalam suatu studi kelayakan. Namun demikian, pengukuran data radiasi langsung, diperlukan dalam rangka untuk mengetahui kondisi real lokasi yang direncanakan dibangun PLTS Atap, seperti tata letak bangunan, pengaruh *shadow*, kondisi angin, dll. Dari hasil rentang pengukuran radiasi secara langsung menunjukkan bahwa lokasi ini mempunyai potensi untuk dilakukan pemasangan *solar rooftop*.

### 3.2 Analisis Lokasi

Gedung Teknik Mesin Politeknik Negeri Malang terdiri dari dua blok yaitu blok 4 Lantai dan blok 8 Lantai, yang terhubung menjadi satu. Dimana masing-masing blok tersebut mempunyai luasan atap cor (*rooftop*) adalah sekitar 750 m<sup>2</sup> dan 250 m<sup>2</sup>, sehingga diprediksi berpotensi untuk dipasang panel surya hingga diatas 100 kWp. Pemasangan PLTS Atap *on grid* direncanakan berada di *roof top* pada blok bawah (4 lantai). Hal ini dikarenakan; lokasi yang lebih luas, kemudahan instalasi dan perawatan, dan berada di atas bengkel mesin. Gambar 4 menunjukkan rencana lokasi instalasi *solar rooftop* gedung teknik mesin Polinema.



**Gambar 4. Rencana Lokasi Pemasangan *Solar Rooftop On-Grid***

### 3.3 Perhitungan Beban Listrik Bengkel Mesin

Kebutuhan listrik di bengkel mesin perkakas dihitung berdasarkan jumlah mesin, daya per mesin dan jam total operasi. Bengkel mesin ini terletak dalam satu ruangan dimana hanya terdapat beberapa jenis mesin perkakas, yaitu: mesin bubut dan mesin *milling*. Adapun rincian kebutuhan listrik dari mesin mesin tersebut ditunjukkan dalam Tabel 1.

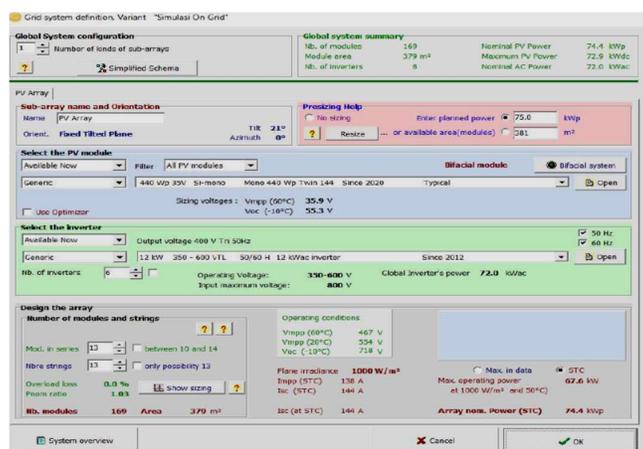
**Tabel 1. Daya listrik yang dibutuhkan Bengkel Mesin**

No	Item	Jumlah	Daya/Unit	Tot. Daya	Durasi/Hari	Daya
			(Watt)	(kW)	(Jam)	(kWh)
1	Mesin Bubut Maximat V13	10	2400	24	8	<b>192</b>
2	Mesin Milling Aviera F3	4	2800	11,2	8	<b>89,6</b>
3	Mesin Milling F4/CH 2400	4	2500	10	8	80
4	Mesin Bor Aciera 22 STA e	1	1100	1,1	8	8,8
5	Mesin Bubut Celtic NCC 14	3	2100	6,3	8	<b>50,4</b>
6	Mesin Bubut Celtic NDC 14	3	2100	6,3	8	50,4
7	Mesin Bubut Simonet DZ 450	2	1300	2,6	8	20,8
8	Lampu TL	96	18	1,7	8	13,8
Total		123	14318	63,2	64	505,8

Pada Tabel 1 di atas tampak bahwa total konsumsi listrik pada bengkel mesin perkakas Teknik Mesin Polinema adalah 505,8 kWh/hari. Selanjutnya dari Tabel 1 tersebut direncanakan pembagian daya listrik dari PLN dan *Solar rooftop* yang akan dipasang. Rencana pembangkitan dari PLTS Atap ini akan mensuplai listrik sebagian mesin perkakas sebesar 332 kWh (blok abu-abu). Sehingga total kebutuhan listrik di bengkel akan disuplai oleh sistem *on-grid* yaitu *solar rooftop* sebesar 65,64 % dan sisanya dari PLN sebesar 34,36 % (173,82 kWh). Hasil perhitungan kebutuhan beban listrik ini selanjutnya digunakan untuk menentukan kapasitas, sistem instalasi dan komponen *solar rooftop* dengan *software PVSyst*.

### 3.4 Estimasi Komponen *Solar Rooftop On-Grid*

Estimasi data teknis instalasi *solar rooftop* sistem *on-grid* (spesifikasi dan jumlah panel, area *PV Array*, spesifikasi dan jumlah inverter) dapat dilakukan dengan memasukkan semua parameter input (GHI, koordinat lokasi, *tilt angle*, *planned power*, dll) yang ada pada *interface software PVSyst 6.88* (Gambar 5). Semua data input berdasarkan dari informasi *data sheet*, *rule of thumb* dan standar yang berlaku dalam perencanaan PLTS.



**Gambar 5. Data Processing pada Interface PVsyst**

Gambar 5 menunjukkan informasi teknis sistem *solar rooftop on-grid* yang digunakan untuk mensuplai kebutuhan listrik bengkel mesin perkakas sebesar 332 kW/hari atau 121,5 MWh/tahun. Hasil estimasi sistem PLTS Atap tersebut terdiri dari; panel surya 169 unit, tipe *Monocrystalline* 440 Wp, kemiringan PV/*azimuth* adalah 21°/0°, rangkaian modul  $P_{nom}$  dapat memproduksi listrik sebesar 74,4 kWp. Luasan area yang dibutuhkan berdasarkan simulasi adalah 379 m<sup>2</sup>. Sehingga dengan kebutuhan luasan *solar rooftop* tersebut, maka rencana lokasi sebagaimana yang tampak dalam Gambar 4 adalah layak, karena lokasi yang tersedia mempunyai luasan sekitar 750 m<sup>2</sup>. Adapun detail *data report* hasil simulasi PVsyst mengenai spesifikasi panel surya (*PV-Module*) dan *Inverter* dapat dilihat dalam Gambar 6.

PV Array Characteristics			
<b>PV module</b>	Si-mono	Model	<b>Mono 440 Wp Twin 144 half-cells bifacial</b>
Original PVsyst database		Manufacturer	Generic
Number of PV modules	In series	13 modules	In parallel 13 strings
Total number of PV modules	Nb. modules	169	Unit Nom. Power 440 Wp
Array global power	Nominal (STC)	<b>74.4 kWp</b>	At operating cond. 67.6 kWp (50°C)
Array operating characteristics (50°C)	U mpp	489 V	I mpp 138 A
Total area	Module area	<b>379 m<sup>2</sup></b>	Cell area 336 m <sup>2</sup>
<b>Inverter</b>		Model	<b>12 kWac inverter</b>
Original PVsyst database		Manufacturer	Generic
Characteristics	Operating Voltage	350-600 V	Unit Nom. Power 12.0 kWac
			Max. power (=>25°C) 14.0 kWac
Inverter pack	Nb. of inverters	6 units	Total Power 72 kWac
			Pnom ratio 1.03

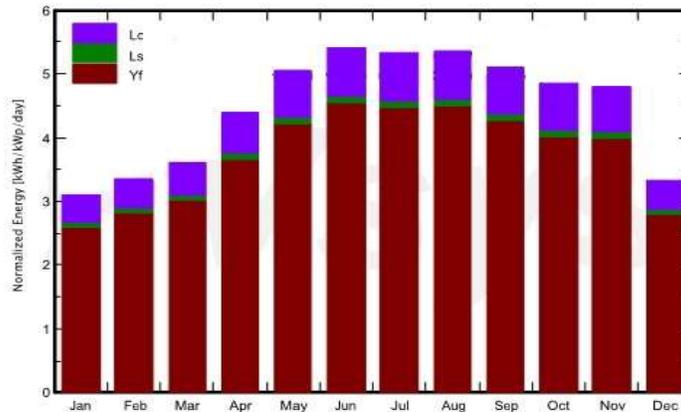
**Gambar 6. Data Report Spesifikasi PV-Modul dan Inverter**

Gambar 6 juga memberikan informasi mengenai spesifikasi dan jumlah inverter yang direkomendasikan. Inverter yang terpasang pada *Solar Rooftop on-grid* ini menggunakan *inverter pure sine wave* dengan kapasitas 12 kW tegangan input inverter max 800VAC dan arus input inverter maksimal sebesar 22Amp. Jadi untuk memenuhi kapasitas modul surya 74,4 kWp dibutuhkan 6 inverter jaringan kW dengan total kapasitas inverter 72 kW.

### 3.5 Estimasi Produksi Listrik oleh *Solar Rooftop*

Energi listrik tahunan yang dihasilkan oleh *solar rooftop* dalam satuan kWh/kWp/hari dapat dilihat pada bagan Gambar 7. Warna *barchart* merah tua (*Yf*) adalah daya listrik luaran inverter, warna hijau (*LS*) adalah *energy losses* sistem komponen instalasi pembangkit,

sedangkan kehilangan energi yang terjadi pada sistem panel surya ditunjukkan oleh warna ungu ( $L_c$ ).



**Gambar 7. Distribusi Produksi Energi Listrik yang dihasilkan Solar Rooftop**

Produksi listrik oleh *solar rooftop* selama setahun (Gambar 6 & Gambar 7) adalah 101,6 MWh, atau kWh/kWp/Tahun. Kehilangan energi yang terjadi adalah  $L_c = 0,64$  kWh/kWp/hari,  $L_s = 0,09$  kWh/kWp/hari dan  $Y_f = 3,74$  kWh/kWp/hari. Sehingga diketahui nilai *Performance Ratio*,  $PR = 0,8363$  dan *Solar Fraction*,  $SF = 60,39$  %.

### 3.6 Analisis Biaya dan Investasi

#### 3.6.1 Belanja Alat dan Instalasi

Biaya investasi awal (*Cost*) pemasangan *solar rooftop* kapasitas 74,4 kWp terdiri dari: *engineering design* (FS & DED), panel surya, inverter, instalasi pekerjaan konstruksi dan ME, biaya umum, akomodasi, transportasi, dan lain sebagainya. Secara rinci biaya investasi tertuang dalam Rancangan Anggaran Belanja (RAB), seperti pada Tabel 2 berikut.

**Tabel 2. Rancangan Anggaran Belanja Proyek**

No	Nama Barang	Qty.	Satuan	Harga (Rp)	Total (Rp)
1	<i>Engineering Desain</i>	1	Jasa	30.000.000	30.000.000
2	Pekerjaan ME & konstruksi	75	/kWh	3.000.000	225.000.000
3	Mobilisasi	1	Jasa	10.000.000	10.000.000
4	Sertifikat Laik operasi	1	Berkas	40.000.000	40.000.000
5	Modul PV 440 Wp	169	Unit	4.200.000	709.800.000
6	Kerangka panel	1	Borongan	25.000.000	25.000.000
7	<i>On-Grid</i> Inverter 12 kW	6	Unit	29.440.000	176.640.000
8	Kabel Penghantar PV	1	Borongan	10.000.000	10.000.000
9	Kabel Instalasi	1	Borongan	10.000.000	10.000.000
10	Ruang kontrol	1	Borongan	20.000.000	20.000.000
11	Konektor	1	Borongan	5.000.000	5.000.000
12	Komponen Lainnya	1	Borongan	20.000.000	20.000.000
<b>Total</b>					<b>1.281.440.000</b>

Sehingga dari Tabel 2 dapat diketahui bahwa investasi awal (*cost*) adalah  $C = \text{Rp. } 1.281.440.000,00$

### 3.6.2 Analisis Ekonomi Proyek

Parameter analisis ekonomis pada proyek *solar rooftop* terdiri dari: biaya *operation and maintenance* ( $M$ ), *present value* dari biaya pemeliharaan dan operasional ( $M_{pw}$ ), *Life Cycle Cost* (LCC), *Capital Recovery Factor* (CRF) dan *Cost of Energy* (COE). Selain investasi awal ( $C$ ) dihitung, terdapat beberapa parameter *input* yang perlu ditentukan dalam proyek, yaitu: 1) Umur proyek,  $n = 25$  tahun, berdasarkan waktu garansi pabrikan untuk panel surya; 2) Suku bunga acuan BI tahun 2021,  $i = 3,5\%$ ; 3) Tarif jual listrik,  $e = 1.440,7$  Rp/kWh, mengacu pada Permen ESDM No.26/2021 mengenai aturan tarif exim (ekspor-impor) listrik dari dan ke PLN untuk pemasangan PLTS Atap adalah 1:1. Sedangkan laba bersih ( $P$ ) dari *solar rooftop* di gedung Teknik Mesin selama setahun adalah nilai jual listrik dikurangi biaya operasi dan perawatan ( $M$ ) dalam satu tahun. Sehingga keuntungan pemasangan *solar rooftop* ini adalah  $(101.600 \text{ kWh} \times 1.440,7 \text{ Rp/kWh}) - \text{Rp. } 12.814.400 = \text{Rp. } 133.560.720,-$ . Berdasarkan Persamaan 5 s.d. Persamaan 9 serta beberapa parameter tersebut di atas, maka hasil perhitungan analisis ekonomi proyek *solar rooftop* ditunjukkan dalam Tabel 3, berikut.

**Tabel 3. Rekapitulasi Analisis Ekonomi Proyek**

Analisis Ekonomi			
Nama	Simbol	Nilai	Satuan
Biaya Investasi	$C$	1.281.440.000	Rp.
Biaya O&M ( <i>Operation &amp; Maintenance</i> )	$M$	12.814.400	Rp.
Umur Proyek	$n$	25	Tahun
Suku Bunga	$i$	3,5	%
Tarif Jual Listrik	$e$	1440,70	Rp/kWh
Produksi Energi PLTS per tahun	$E$	101.600	kWh
Laba bersih pertahun	$P$	133.560.720	Rp.
Biaya sekarang O&M selama $n$ tahun	$M_{pv}$	211.200.721	Rp.
Biaya Siklus Hidup ( <i>Life Cycle Cost</i> )	$LCC$	1.492.640.721	Rp.
Faktor Pemulihan Modal	$CRF$	0,0607	
Biaya Energi ( <i>Cost of Energy</i> )	$COE$	891	Rp/kWh

Beberapa hasil perhitungan ekonomi tersebut akan menjadi dasar untuk menganalisa suatu kelayakan proyek, seperti; umur proyek, suku bunga, biaya investasi dan biaya siklus hidup (*Life Cycle Cost*).

### 3.7 Analisis Kelayakan Proyek

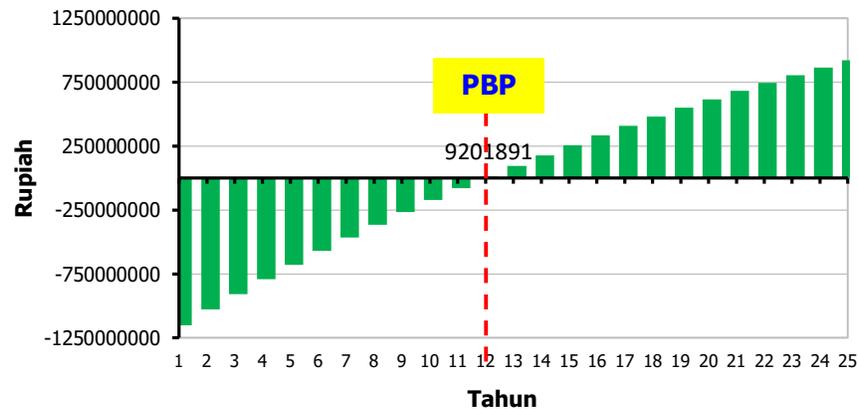
Kelayakan investasi pemasangan *solar rooftop* dapat ditentukan dari perhitungan *Net Present Value* (NPV), *Profitability Index* (PI) dan *Pay Back Period* (PBP). Berdasarkan Persamaan 10 s.d. Persamaan 13 maka hasil perhitungan dari parameter tersebut, disajikan dalam Tabel 4.

**Tabel 4. Rekomendasi Kelayakan Ekonomi Proyek**

Analisis Kelayakan Investasi <i>Solar Rooftop</i>					
Nama	Simbol	Nilai	Satuan	Syarat	Keterangan
<i>Net Present Value</i>	$NPV$	919.842.956	Rp.	$NPV > 0$	<b>Layak</b>
<i>Profitability Index</i>	$PI$	1,72		$PI > 1$	<b>Layak</b>
<i>Pay Back Period</i>	$PBP$	11,18	Tahun	$PBP < n$	<b>Layak</b>

Hasil perhitungan Tabel 4 menunjukkan semua parameter merekomendasikan bahwa PLTS Atap atau *solar rooftop* di gedung Teknik Mesin Polinema tersebut adalah layak (*feasible*)

untuk dilaksanakan, dengan *Pay Back Period* adalah 11,18 tahun atau 11 tahun 3 bulan. Sedangkan, Gambar 8 menunjukkan *cash flow* proyek *solar rooftop* selama periode 25 tahun.



**Gambar 8. Cash Flow NPV dari Proyek Solar Rooftop Selama Periode 25 Tahun**

Analisis dari *cash flow rate* yang ditunjukkan Gambar 8 tersebut menunjukkan bahwa investasi akan balik modal pada tahun ke-12. Bahkan kalau dilihat secara detail pada tahun ke-12 ini sudah mendapatkan keuntungan sekitar Rp. 9.201.891,-.

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan kajian aspek teknis diperoleh bahwa instalasi PLTS Atap (*Solar Rooftop*) yang direncanakan terdiri dari modul PV 440 Wp sebanyak 169 unit dan *On-Grid Inverter* 12 kW sebanyak 6 unit. Sistem PLTS Atap menghasilkan daya 74,4 kWp/hari. Sehingga, menghasilkan energi listrik mencapai 101,6 MWh/tahun. Sedangkan dari aspek ekonomi menunjukkan bahwa dengan investasi awal sebesar Rp. 1.281.440.000,00 maka diperoleh *Net Present Value* sebesar Rp. 919.842.956,00 dan *Profitability Index* adalah 1,72. Sedangkan *Pay Back Periode* dapat dicapai pada 11 tahun 3 bulan. Berdasarkan parameter NPV, PI dan PBP menunjukkan bahwa pemasangan *Solar rooftop* di gedung Teknik Mesin Polinema layak untuk dilaksanakan.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada semua pihak di Lab. Energi Surya, atas segala fasilitas peralatan dan *software* yang sehingga dapat dilakukan studi kelayakan PLTS Atap di Gedung Jurusan Teknik Mesin, Polinema.

#### DAFTAR RUJUKAN

Al Bahar, A. K., & Maulana, A. T. (2018). Perencanaan dan Simulasi Sistem PLTS Off-Grid untuk Penerangan Gedung Fakultas Teknik Unkris. *Jurnal Ilmiah Elektrokrisna*, 6 (3), 97-107.

- Alfaridzi, S. M., Nugroho, A., & Sinuraya, E. W. (2020). Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Dengan Menggunakan Software ETAP V.12.6 Di Departemen Teknik Industri Universitas Diponegoro. *TRANSIENT*(9), 143-147.
- Ali, M., & Windarta, J. (2020). Pemanfaatan Energi Matahari Sebagai Energi Bersih yang Ramah Lingkungan. *JEBT: Jurnal Energi Baru & Terbarukan*, 01 (02), 68-77.
- Ali, M., Karnoto, K., & Darmanto, N. A. (2020). STUDI Instalasi Fotovoltaik Sebagai Penunjang Catu Daya listrik di Gedung Teknik Sipil dan Gedung Teknik Geologi Universitas Diponegoro Menggunakan Software PVSyst 6.81. *TRANSIENT*, 9 (2), 210-215.
- Asrori, A., Harijono, A., Faizin, A., Dani, A., & Kriswitono, K. (2021). Aplikasi Home Solar System sebagai Penerangan untuk TPQ-AI Murtadho di Kota Malang. *Jurnal Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat UNSIQ*, 08 (01), 99-106.
- Asrori, A., Mashudi, I., & Suyanta, S. (2019). Pengujian Rasio Kinerja Instalasi Panel Surya Tipe Silikon-Kristal pada Kondisi Cuaca Kota Malang. *JETM: Jurnal Energi dan Teknologi Manufaktur*, 02 (02), 11-18.
- Duffie, J., & Beckman, W. (2021). *Solar Engineering of Thermal Processes* (Vol. 2nd). Singapore: John Wiley & Sons. Inc.
- EBTKE. (2021). *Implementasi Peraturan Menteri ESDM tentang PLTS Atap*. diakses: 28 Mei 2021, <https://drive.esdm.go.id/wl/?id=5XQv80ogkSp0tLQsY4wJNUPVSPpcgGtz>
- Fuaddin, D., & Daud, A. (2020). Rancangan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya On-Grid Kapasitas 20 kWp untuk Residensial. *Jurnal Energi*, 10 (1), 53-57.
- Hajir, N., Haddin, M., & Suprajitno, A. (2022). Analisa Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap dengan Sistem Hybrid di PT. Koloni Timur. *Elektrika*, 14 (01), 20-25.
- Haq, I. N., Pradipta, J., Sheba, M. R., Persada, A. W., Soelami, F. N., & Leksono, E. (2021). Simulasi Energi dan Keekonomian Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) untuk Fungsi Peak Load Shaving pada Bangunan di Lingkungan Kampus ITB. *Journal of Science and Applicative Technology*, 05 (01), 179-186.
- Hidayat, F., Rusirawan, D., & Tanjung, I. R. (2019). Evaluasi Kinerja PLTS 1000 Wp di Iteas Bandung. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, 7 (1), 195-208.
- Hidayat, M. N., Rahmat, A. N., & Ronilaya, F. (2019). Feasibility Analysis of a Renewable Autonomous Power Supply System at a Coastal Area in Indonesia. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 10 (3), 175-181.

- Husnayain, F., & Luthfy, D. (2020). Analisis Rancang Bangun PLTS On-Grid Hibrid Baterai dengan Pvsyst pada Kantin Teknik FTUI. *ELECTRICES*, 2(1), 21-29.
- Jufrizel, J., & Irfan, M. (2017). Perencanaan Teknis dan Ekonomis Pembangkit Listrik Tenaga Surya Sistem On-Grid. *Seminar Nasional Teknologi Informasi, Komunikasi dan Industri (SNTIKI) .9*, pp. 430-436. Pekanbaru: Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Sultan Syarif Kasim Riau.
- Kalogirou, S. (2009). *Solar energy engineering : processes and systems*. London: Academic Press publications.
- Manullang, V. R., Nugroho, A., & Sinuraya, E. W. (2020). Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Menggunakan Software Homer Di Departemen Teknik Industri Universitas Diponegoro. *9(2)*, 148-156.
- Muslim, S., Khusnul, A., & Azhiimah, N. (2020). Analisis Kritis Terhadap Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Tipe Photovoltaic (PV) sebagai Energi Alternatif Masa Depan. *Rang Teknik Journal*, 03(01), 119-130.
- Parastiwi, A., Putri, R. I., Adhisuwignjo, S., & Rifa'i, M. (2018). *Photovoltaic Terapan: Teknologi dan Implementasi*. Malang: Polinema Press.
- Putri, R., Meliala, S., & Zuraida. (2020). Penerapan Instalasi Panel Surya Off Grid Menuju Energi Mandiri Di Yayasan Pendidikan Islam Dayah Miftahul Jannah . *Journal of Electrical Technology*, 05(03), 117-120.
- Rafli, R., Ilham, J., & Salim, S. (2022). Perencanaan dan Studi Kelayakan PLTS Rooftop Pada Gedung Fakultas Teknik UNG. *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 4(1), 8-15.
- Rega, M., Sinaga, N., & Windarta, J. (2021). Perencanaan PLTS Rooftop untuk Kawasan Pabrik Teh PT Pagilaran Batang. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, 09(04), 888-901.
- Saadah, S., & Utami, S. (2019). Perancangan Sistem Grid Tie Inverter pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya. *ELKOMIKA*, 7(2), 339-350.
- Sianipar, R. (2014). Dasar Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya. *JETri*, 11(02), 61-78.
- Syahrial, S., Waluyo, W., & Fakhruallah, A. F. (2018). Studi Kapasitas Daya Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida Angin dan Surya Berkapasitas 6 kW berdasarkan Skenario Cuaca. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, 6(1), 61-78.

- Tambunan, J. M., Joko, P., Bangkit, S., Azis, H., Pawenary, P., & Yayi, S. (2020). Aplikasi Lampu Penerangan Rumah Tinggal Sederhana (Solar Home System) Berbasis Tenaga Surya Di SMA Pancaran Berkas Jakarta Barat. *Terang: Jurnal Pengabdian Pada Masyarakat Menerangi Negeri*, 02 (02), 117-125.
- Zou, C., Zhao, Q., Zhang, G., & Xiong, B. (2016). Energy revolution: From a fossil energy era to a new energy era. *Natural Gas Industry B*, 1-11.