

**ANALISIS PENGARUH WAKTU PEMBERSIHAN DEBU DAN CURAH
HUJAN PADA PANEL SURYA TERHADAP PRODUKSI ENERGI DI
PLTS PRKKE-BRIN SERPONG**

(Skripsi)

Oleh

Viona Rosmiati

2017041063



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG**

2025

ABSTRAK

ANALISIS PENGARUH WAKTU PEMBERSIHAN DEBU DAN CURAH HUJAN PADA PANEL SURYA TERHADAP PRODUKSI ENERGI DI PLTS PRKKE-BRIN SERPONG

Oleh

VIONA ROSMIATI

Akumulasi debu pada permukaan panel surya dapat menurunkan efisiensi konversi energi pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh waktu pembersihan dan curah hujan terhadap kinerja energi pada panel surya. Pengamatan dilakukan pada 4 modul surya (PV1, PV2, PV3 dan PV4) dengan waktu pembersihan berbeda selama periode pengamatan, data yang dikumpulkan meliputi intensitas radiasi matahari, dan energi keluaran dari masing-masing modul, terdapat pula data rekaman curah hujan yang terjadi di lokasi penelitian selama periode pengamatan berlangsung. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa PV3, yang dibersihkan satu kali dalam empat minggu, menghasilkan energi tertinggi dibandingkan PV1 dan PV2 yang dibersihkan lebih sering, sedangkan PV4 yang tidak dibersihkan sama sekali menghasilkan energi terendah. Curah hujan dengan intensitas tinggi (sampai 278,2 mm/h pada hari ke-25) juga berperan penting dalam membersihkan debu secara alami pada permukaan panel. Dengan demikian, kombinasi antara waktu pembersihan yang disesuaikan dengan iklim cuaca serta curah hujan yang intens dapat membantu menjaga efisiensi kinerja panel surya secara optimal.

Kata Kunci: PLTS, Modul PV, Curah Hujan, Pembersihan, Energi, Soiling.

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE EFFECT OF DUST CLEANING TIME AND RAINFALL ON SOLAR PANELS ON ENERGY PRODUCTION AT THE PRKKE-BRIN SERPONG SOLAR POWER PLANT

By

VIONA ROSMIATI

Dust accumulation on the surface of solar panels can reduce energy conversion efficiency in solar power plants (PLTS). This study aims to analyze the effect of cleaning time and rainfall on the energy performance of solar panels. Observations were conducted on four solar modules (PV1, PV2, PV3, and PV4) with different cleaning intervals during the observation period. The data collected included solar radiation intensity and energy output from each module, as well as rainfall records at the research site during the observation period. The results showed that PV3, which was cleaned once every four weeks, produced the highest energy compared to PV1 and PV2, which were cleaned more frequently, while PV4, which was not cleaned at all, produced the lowest energy. High-intensity rainfall (up to 278.2 mm/h on the 25th day) also played an important role in naturally cleaning dust from the panel surface. Thus, a combination of cleaning times adjusted to the weather and intense rainfall can help maintain optimal solar panel performance efficiency.

Keywords: Solar Power Plant, PV Module, Rainfall, Cleaning, Energy, Soiling.

**ANALISIS PENGARUH WAKTU PEMBERSIHAN DEBU DAN CURAH
HUJAN PADA PANEL SURYA TERHADAP PRODUKSI ENERGI DI
PLTS PRKKE-BRIN SERPONG**

Oleh

Viona Rosmiati

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar
SARJANA SAINS**

Pada

**Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Lampung**



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG**

2025

Judul Skripsi : Analisis Pengaruh Waktu Pembersihan Debu dan
Curah Hujan pada Panel Surya Terhadap Produksi
Energi di PLTS PRKKE-BRIN Serpong

Nama Mahasiswa : **Viona Rosmiati**

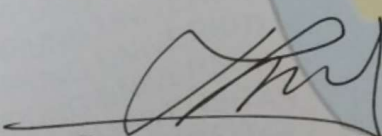
Nomor Pokok Mahasiswa : 2017041063

Jurusan : Fisika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

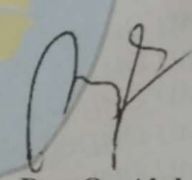
MENYETUJUI

1. **Komisi Pembimbing**



Drs. Amir Supriyanto, M.Si.

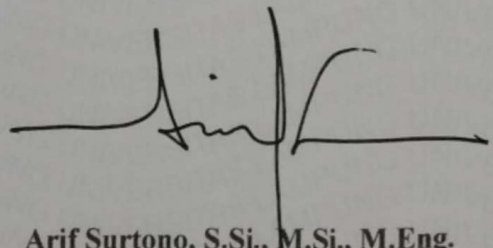
NIP. 196504071991111001



Dr. -Ing. Drs. Oo Abdul Rosyid, M.Sc.

NIP. 196506251991031002

2. **Ketua Jurusan Fisika**



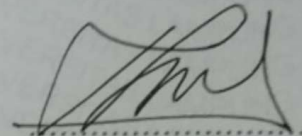
Arif Surtono, S.Si., M.Si., M.Eng.

NIP.197109092000121001

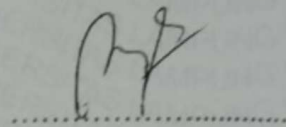
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

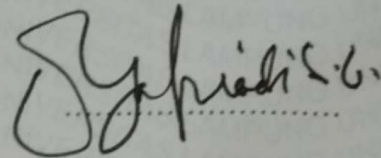
Ketua : Drs. Amir Supriyanto, M.Si



Sekretaris : Dr. -Ing. Drs. Oo Abdul Rosyid, M.Sc.



Penguji Bukan Pembimbing : Drs. Syafridi, M.Si.



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si.

NIP. 197110012005011002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 15 Desember 2025

PERNYATAAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Viona Rosmiati
NPM : 2017041063
Jurusan : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa dalam skripsi saya dengan judul “Analisis Pengaruh Waktu Pembersihan Debu dan Curah Hujan pada Panel Surya Terhadap Produksi Energi di PLTS PRKKE-BRIN Serpong” adalah benar hasil karya saya sendiri, baik ide, hasil serta analisisnya. Apabila ada pernyataan saya yang tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai hukum yang berlaku.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan penuh kesadaran untuk dapat digunakan sebagaimana mestinya.

Bandar Lampung, 15 Desember 2025

Yang Menyatakan,



VIONA ROSMIATI
NPM. 2017041063

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Kota Metro, Provinsi Lampung pada 06 Oktober 2002 sebagai anak ke dua dari tiga bersaudara dari pasangan Bapak Hariman dan Ibu Dem Sita. Penulis memulai pendidikan sekolah dasar di SDN 4 Metro Barat pada tahun 2008 -2010 kemudian dilanjutkan di SDN5 Metro Pusat pada 2010-2014, kemudian melanjutkan pendidikan sekolah menengah pertama di MTSS Diniyyah Putri Lampung pada tahun 2014-2017. Penulis melanjutkan Pendidikan di MASS Diniyyah Putri Lampung pada tahun 2017-2020. Penulis terdaftar sebagai mahasiswa baru Universitas Lampung pada Jurusan Fisika FMIPA melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN) pada tahun 2020. Selama menjadi mahasiswa penulis aktif sebagai anggota dan sekretaris Himpunan Mahasiswa Fisika pada bidang Dana dan Usaha pada tahun 2021-2022 dan sebagai anggota Koperasi Mahasiswa Universitas Lampung pada Tahun 2021-2023. Aktif juga sebagai asisten praktikum di Laboratorium jurusan fisika. Penulis menempuh kegiatan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di PT.PLN (Persero) Tanjung Karang Kota Bandar Lampung pada tahun 2022 dan melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Hanura Kecamatan Teluk Pandan Kabupaten Pesawaran pada tahun 2023. Penulis juga mengikuti Program Kreatifitas Mahasiswa (PKM-GFT) pada tahun 2022. Selain itu penulis pernah menjadi anggota pada penelitian Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) pada tahun 2023.

MOTTO

“Sesungguhnya beserta kesulitan ada kemudahan, maka apabila engkau telah selesai (dengan suatu kebajikan), teruslah bekerja keras (untuk kebajikan yang lain)” - **(QS. Al-Insyirah:6-7)**

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya” - **(QS. Al-Baqarah: 286)**

“Long Story Short, I Survived” – **Taylor Swift**

“You Should Believe in yourself and don’t let anyone bring you down”- **Mark Lee**

“Ini akan berlalu,meskipun saat-saat yang sulit datang aku bertahan dan berpikir bahwa itu akan berlalu”- **Lee Haechan**

“Hidup Bukan Saling Mendahului, Bermimpilah Sendiri-Sendiri”
- **Hindia**

“Dalam setiap paragraf skripsi ini tersimpan cerita tentang perjuangan, keraguan,dan harapan karena ilmu bukan hanya tentang apa yang dipahami, tapi juga tentang bagaimana kita tumbuh dalam proses memahaminya”

PERSEMBAHAN

Dengan penuh rasa syukur kepada Allah SWT, ku persembahkan skripsi ini
kepada:

Ibu Dem Síta

Ibuku tercinta, yang dengan keteguhan hatinya selalu mendampingi setiap langkahku, yang tidak pernah berhenti menjadi sumber kekuatan dan kasih tanpa batas.

Bapak Haríman dan Bapak Juair

ayah kandungku yang telah memberikan kehidupan serta pelajaran berarti, dan ayah tiriku yang dengan kesabarannya mengajarkan arti kehadiran dan tanggung jawab.

Uníversítas Lampung

Almamater tercinta.

KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT atas segala rahmat, taufiq dan hidayah-Nya. Sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Analisis Pengaruh Waktu Pembersihan Debu dan Curah Hujan pada Panel Surya Terhadap Produksi Energi di PLTS PRKKE-BRIN Serpong” dengan baik. Skripsi ini dibuat untuk mendapatkan gelar sarjana sains pada Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung. Dengan segala kerendahan hati, penulis menyadari bahwa penyusunan skripsi ini masih terdapat kesalahan dan masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang bersifat membangun penulis harapkan untuk memperbaiki skripsi ini. Semoga skripsi ini bermanfaat tidak hanya untuk penulis tetapi juga untuk para pembaca.

Bandar Lampung, 15 Desember 2025

Penulis,

Viona Rosmiati

SANCAWACANA

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT atas segala rahmat, taufiq dan hidayah-Nya. Sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian ini dengan judul “Analisis Pengaruh Waktu Pembersihan Debu dan Curah Hujan pada Panel Surya Terhadap Produksi Energi di PLTS PRKKE-BRIN Serpong”. Dalam penyusunan skripsi ini, penulis menyadari tidak sedikit hambatan dan kesulitan yang dihadapi, namun berkat bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, akhirnya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulis mengucapkan banyak terimakasih kepada:

1. Bapak Drs. Amir Supriyanto, M.Si., Selaku Dosen Pembimbing I yang telah memberikan bimbingan, arahan serta semangat selama pengerjaan skripsi ini kepada penulis.
2. Bapak Dr. –Ing. Drs. Oo Abdul Rosyid, M.Sc., Selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan kesempatan dan arahan penuh di lapangan selama pengerjaan skripsi ini kepada penulis.
3. Bapak Drs. Syafriadi M.Si., Selaku Dosen Pembahas yang telah memberikan arahan, Kritik dan saran yang membangun selama pengerjaan Skripsi ini kepada penulis.
4. Bapak Arif Surtono, S.Si., M.Si., M.Eng. selaku ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung dan Dosen Pembimbing Akademik yang telah memberikan dukungan selama penulis menjadi mahasiswa Universitas Lampung.
5. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si. selaku Dekan Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.
6. Bapak dan Ibu Dosen serta staff Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung yang telah memberikan banyak ilmu dan pengalaman berharga serta motivasi kepada penulis selama perkuliahan.

7. Abang dan Adik Penulis, M. Rizki dan Dhani Wira Saputra yang telah memberikan do'a dan semangat penuh kepada penulis.
8. Sahabat sejak kecil, Andira Zaliani yang telah memberi semangat, dukungan dan tawa, terimakasih selalu kebersamai dan menjadi bagian penting dalam perjalanan ini serta selalu percaya bahwa penulis mampu menyelesaikan skripsi ini.
9. Teman-teman dekat penulis, Hanin Zakiyah Shafa, Sephia Wulandari dan Lola Febriyana yang selalu memberikan bantuan serta semangat dan dukungan agar penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
10. Staf dan teman-teman di BRIN Serpong yang telah membantu dan kebersamai penulis dalam menyelesaikan penelitian ini.
11. Teman-teman Fisika angkatan 2020 yang tidak dapat disebutkan satu persatu, yang telah kebersamai hari dan memberikan semangat kepada penulis selama masa perkuliahan.
12. Idola K-Pop penulis member group NCT, BTS dan Seventeen yang selalu ada untuk menghibur dan memberikan semangat kepada penulis melalui kata-kata motivasi dan karya lagu mereka yang menemani penulis bertahan hingga saat ini.
13. Terakhir untuk diri sendiri yang telah berjuang, bertahan dan terus melangkah meski menghadapi berbagai rintangan, terimakasih untuk tidak menyerah dan percaya terhadap proses dan tetap berupaya agar bisa menyelesaikan skripsi ini.

Demikian yang dapat penulis sampaikan. Semoga Allah SWT membalaskan segala kebaikan dengan hal yang lebih baik dan mempermudah segala urusan.
Aamiin.

Bandar Lampung, 15 Desember 2025
Penulis,

Viona Rosmiati

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
HALAMAN JUDUL	iii
LEMBAR PERSETUJUAN	iv
LEMBAR PENGESAHAN	v
PERNYATAAN	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
MOTTO	viii
PERSEMBAHAN	ix
KATA PENGANTAR	x
SANCAWACANA	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvi
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat penelitian	4
1.5 Batasan Masalah	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Terkait	5
2.2 Landasan Teori	7
2.2.1 Daya Listrik	7
2.2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)	9
2.2.3 Jenis-Jenis Modul Surya	10
2.2.4 Faktor yang Mempengaruhi Kinerja Modul Surya	12
2.2.5 Resistance Temperatur Detector (RTD)	13

2.2.6 <i>Scanning Electron Microscop</i> dan <i>Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy</i> (SEM-EDS)	14
2.2.7 <i>Data Logger</i>	15
2.2.8 <i>Weather Station</i>	15
3.2.9 Performance Ratio (PR).....	16
III. METODE PENELITIAN	14
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	14
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	14
3.3 Prosedur Penelitian.....	19
3.3.1 Tahap Pemasangan Alat Ukur dan Pengoperasian Sistem Pengamatan	20
3.4 Tahapan Pengumpulan Data.....	21
3.4.1 Pengambilan Data Dengan <i>Data Logger</i>	21
3.4.2 Pengambilan Data Dengan <i>Weather Station</i>	23
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	25
4.1 Realisasi Pemasangan <i>Set Up</i> Penelitian	25
4.2 Pengamatan Modul Surya Berdasarkan Variasi Pembersihan Secara Berkala	28
4.3 Pengaruh Intensitas Hujan Terhadap Pembersihan Debu Pada Modul Surya	34
4.4 Karakterisasi Pada Debu	37
4.5 Identifikasi Kerusakan Modul.....	41
V. SIMPULAN DAN SARAN	43
5.1 Simpulan.....	43
5.2 Saran.....	44
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Pembangkit Listrik Tenaga Surya.....	9
2. Komponen Utama PLTS	10
3. Jenis - Jenis Panel Surya	11
4. Contoh Hot Spot Pada Modul Surya.....	13
5. Diagram Alir Penelitian	20
6. Skema Set Up Penelitian	21
7. Grafik Solar Radiation	22
8. Grafik Output daya	23
9. Grafik Performance Ratio	23
10. Grafik Weather Station.....	24
11. String Pemasangan Modul PV.....	25
12. Pemasangan Modul Surya pada String.....	28
13. Pengamatan Data Secara Real Time	29
14. Grafik Total Radiasi Matahari	31
15. Grafik Total Energi	31
16. Nilai Performance Ratio (PR).....	33
17. Grafik Curah Hujan.....	35
18. Debu Pada Permukaan Modul	37
19. Hasil Karakterisasi Debu.....	40
20. Spektrum Energi	40
21. Retak Pada Bagian Dalam Sel PV2	41

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Alat dan Bahan	14
2. Data Pengamatan Terhadap Modul Surya.....	22
3. Data Weather Station	24
4. Spesifikasi Modul PV	26
5. Hasil Pengujian Modul Pada Kondisi STC	26
6. Hasil Olah Data Logger.....	30
7. Hasil Karakterisasi Sampel Debu pada SEM dan EDS	38

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi bagi masyarakat Indonesia semakin meningkat seiring dengan pertumbuhan populasi penduduk dan urbanisasi yang pesat, energi merupakan salah satu sumber yang mendukung aktivitas perekonomian baik untuk kebutuhan konsumsi maupun aktivitas produksi dari berbagai sektor (Damayanti *et al.*, 2020). Menurut penelitian konsumsi energi listrik mencapai 1.173 kWh perkapita pada tahun 2022 dan diperkirakan akan terus meningkat, energi listrik menjadi salah satu kebutuhan primer yang vital terutama dalam sektor rumah tangga, industri dan transportasi (Solikah and Bramastia, 2024). Sumber energi seperti batu bara yang sifatnya terbatas tidak dapat memenuhi seluruh kebutuhan konsumsi energi yang terus meningkat, oleh karena itu pemerintah menargetkan penggunaan energi baru terbarukan (EBT) yang ada di Indonesia seperti panas bumi, energi air, energi angin, energi arus laut, bioenergi (bioethanol, biodiesel, biomassa), energi nuklir serta energi surya (Al Hakim, 2020).

Energi surya telah menjadi salah satu sumber energi terbarukan yang sangat diminati belakangan ini, terutama dikawasan tropis seperti Indonesia, Indonesia memiliki wilayah dengan iklim tropis dan dua musim yaitu musim hujan serta musim kemarau. Dengan intensitas sinar matahari yang tinggi sepanjang tahun pada musim kemarau, pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) menawarkan solusi yang efisien dan semakin diminati karena jumlah ketersediannya melimpah serta ramah lingkungan untuk memenuhi kebutuhan energi yang terus meningkat. Beberapa faktor iklim seperti suhu, radiasi matahari, dan kelembapan berkontribusi pada perubahan kinerja dari panel surya, selain itu kondisi cuaca yang buruk, seperti hujan deras, mendung tebal, angin kencang, badai dan juga

kabut juga dapat menghalangi sinar matahari untuk mencapai panel surya sehingga mengurangi produksi listrik secara keseluruhan (Nurhasanah *et al.*, 2023).

Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) menggunakan panel surya atau yang lebih dikenal sebagai solar panel yang berfungsi mengubah energi dari cahaya matahari menjadi listrik melalui efek fotovoltaiik. Penggunaan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dinilai lebih efisien karena penggunaan lahan yang lebih sedikit dibandingkan dengan pembangkit jenis lainnya, pembangkit ini banyak diminati di area perkotaan dan perkantoran karena dapat memanfaatkan area atap sebagai lokasi pemasangannya, tetapi terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi kinerja dari panel surya diluar kendali dari panel surya itu sendiri, beberapa faktor tersebut seperti intensitas cahaya matahari, arah dan sudut matahari, *shading* atau bayangan, tegangan dan arus masukan, cuaca dan kondisi lingkungan serta debu kotoran dan polusi (Effendi *et al.*, 2020).

Energi listrik yang dihasilkan dari PLTS di Indonesia mudah dipengaruhi oleh cuaca dan kondisi lingkungan, terutama debu. Cuaca adalah kondisi udara di atmosfer yang tidak stabil dan berubah-ubah pada titik tertentu. Kondisi hujan, suhu udara, tutupan awan, penguapan, kelembapan, dan kecepatan angin biasanya digunakan untuk menentukan kategori cuaca di suatu tempat setiap hari. Di Indonesia, ada beberapa jenis cuaca: cuaca panas, yang disebabkan oleh panas matahari karena posisinya tegak lurus di atas bumi dengan intensitas sinar matahari yang tinggi; cuaca cerah, di mana sinar matahari jernih dan udara segar; dan cuaca sejuk, di mana angin bertiup, suhu udara rendah, dan kelembapan udara yang tinggi; dan cuaca hujan, disebabkan oleh uap air yang terkandung di uap air. Dan cuaca berawan, yang berarti ketika langit tertutup awan atau mendung (Purnomo *et al.*, 2023).

Debu merupakan partikel padat yang tersuspensi di udara yang berasal dari tanah, polusi industri, aktivitas manusia seperti asap kendaraan, asap pembakaran sampah dan proses alam lainnya, debu memiliki sifat tidak berflokulasi dan cenderung mengendap dibawah pengaruh gravitasi, meskipun partikel – partikelnya kecil tetapi berterbangan diudara untuk waktu yang lama, ukuran

partikel debu juga sangat berpengaruh pada dampak kesehatan manusia jika masuk kedalam saluran pernafasan, debu juga sering digunakan sebagai indikator pencemaran lingkungan yang dapat mempengaruhi kesehatan dan keselamatan kerja manusia (Aini,2015).

Debu dapat menempel pada permukaan panel surya sehingga mengurangi intensitas cahaya matahari serta kinerja pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) terutama di iklim tropis. Penurunan efisiensi akibat debu dapat berkisar antara 2% sampai dengan 25% tergantung pada tingkat ketebalan dan jenis partikel debu, bahkan partikel kecil dengan ukuran $<0,05 \mu\text{m}$ dapat memiliki dampak yang lebih besar karena dapat menutupi area lebih luas pada permukaan solar panel, akumulasi debu yang tidak merata dapat menyebabkan panas terlokalisasi pada panel surya, serta mempercepat degradasi material pada modul surya. Partikel debu yang bersifat abrasif dapat merusak permukaan modul secara perlahan (Yap *et al.*, 2015).

Pada penelitian ini penulis melakukan pengamatan modul surya dengan empat intensitas waktu pembersihan yang berbeda disetiap modul untuk mengetahui perbedaan energi yang dihasilkan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan di atas, rumusan masalah yang menjadi aspek utama dalam melakukan penelitian adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh waktu pembersihan panel surya terhadap energi yang dihasilkan?
2. Bagaimana pengaruh curah hujan terhadap pembersihan debu pada panel surya?
3. Bagaimana hubungan antara waktu pembersihan dan curah hujan terhadap energi yang dihasilkan?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui pengaruh waktu pembersihan pada panel surya terhadap hasil energi.
2. Mengetahui pengaruh curah hujan terhadap pembersihan debu pada panel surya.
3. Mengetahui hubungan antara waktu pembersihan dan curah hujan terhadap hasil energi.

1.4 Manfaat penelitian

Manfaat penelitian adalah sebagai berikut.

1. Mendukung penggunaan energi baru terbarukan (EBT) dalam meningkatkan efisiensi pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) sehingga mengurangi ketergantungan pada energi fosil.
2. Memberikan kontribusi ilmiah dalam memahami dampak dari akumulasi debu pada efisiensi pembangkit listrik tenaga surya (PLTS).
3. Berkontribusi pada keberlanjutan lingkungan dengan mempromosikan energi bersih yang lebih efisien dan andal.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Penelitian ini berlokasi pada Pusat Riset Konversi dan Konservasi Energi (PRKKE) BRIN Serpong, Tangerang Selatan.
2. Pengambilan data pada penelitian ini dilakukan dalam jangka waktu 31 hari.
3. Perangkat utama penelitian ini adalah panel surya dan alat pembersih.
4. Pengambilan data dilakukan dengan menggunakan laptop, inverter, *data logger*, SEM dan EDS, multimeter, serta *weither station*.
5. Metode yang digunakan adalah pengamatan, pengukuran dan analisis.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

Penelitian ini merupakan pengembangan dari penelitian – penelitian terdahulu. Beberapa penelitian terkait dengan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) yang dapat digunakan sebagai acuan penelitian guna kemudian dapat dikembangkan kembali untuk penelitian yang akan datang. Sebelumnya, penelitian yang dilakukan oleh (Asmara, 2021) yaitu tinjauan hasil pengukuran keluaran *photovoltaic* (PV) terhadap pengaruh kekotoran debu dan beban. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi pengaruh kekotoran debu terhadap paparan permukaan panel surya (*photovoltaic*) pada sudut kemiringan 30°. Metode yang digunakan pada pengujian ini adalah eksperimen langsung dengan menggunakan alat ukur digital dan manual dengan objek *photovoltaic* yang berbeda yaitu permukaan bersih dan kotor sebagai media pantul. Hasil akhir penelitian ini menunjukkan bahwa, pada daya keluaran eksperimen yang dilakukan dengan kombinasi antara jenis panel surya yang tidak terpapar oleh debu dan terpapar oleh debu pada sudut kemiringan 30° dengan rata – rata daya keluaran mencapai 5,52 W (permukaan tidak berdebu) dan 2,88 W (permukaan berdebu). Debu pada permukaan dan beban pada panel surya berpengaruh signifikan terhadap performansi panel surya untuk system instalasi tetap (statik).

Selanjutnya penelitian yang dilakukan oleh (Talawo *et al.*, 2022) dengan judul pengaruh polutan pada permukaan panel surya terhadap kinerja panel surya kapasitas 10 Wp juga menjadi referensi penulis. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja panel surya terhadap lama waktu pengisian baterai, arus, tegangan serta daya pada kondisi permukaan panel surya bersih kering, bersih

basah, terpolusi basah dan terpolusi kering. Penelitian ini menggunakan metode eksperimen langsung dilapangan dengan menggunakan panel surya berkapasitas 10 Wp (*Watt Peak*) sebagai objek penelitian serta polutan larut dan polutan tak larut. Hasil akhir yang didapatkan dari penelitian ini yaitu kinerja panel surya pada kondisi bersih kering memperoleh daya paling tinggi yaitu 5,42 Watt dan waktu pengisian baterai paling cepat selama 6 jam. Kemudian kondisi bersih basah memperoleh daya rata – rata 4,86 Watt dan dengan waktu pengisian baterai selama 6 jam 10 menit. Kondisi terpolusi basah memperoleh daya sekitar 4,77 Watt dan waktu pengisian baterai selama 6 jam 14 menit dan pada kondisi terakhir yaitu terpolusi kering memperoleh daya sekitar 4,43 Watt dengan waktu pengisian baterai terlama yaitu selama 6 jam 20 menit.

Selanjutnya penelitian yang dilakukan oleh (Nurhasanah *et al.*, 2023) yaitu dengan judul kajian perubahan iklim terhadap efisiensi panel surya sebagai sumber energi alternatif di Indonesia. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui serta memahami mengenai perubahan iklim yang ada di Indonesia sehingga dapat berdampak terhadap efisiensi penggunaan panel surya. Metode penelitian yang digunakan dalam pengambilan data adalah penelitian kualitatif dengan metode kajian pustaka, dimana peneliti mendapatkan data dari berbagai artikel ilmiah yang telah terpublikasi sebelumnya, hal ini didasarkan pada hasil survei penelitian berbasis tinjauan literatur dan panduan energi terbarukan dari beberapa sumber. Hasil penelitian yang didapatkan selama penelitian ini pada musim kemarau adalah nilai solar panel surya akan meningkat selama musim kemarau dari juli sampai dengan oktober sedangkan pada musim hujan seperti desember akan mencapai nilai terendah. Selain itu, kapasitas produksi panel surya sangat bervariasi tergantung pada musim yang terjadi, selain elemen utama radiasi matahari, suhu lingkungan adalah salah satu aspek lain yang berdampak pada efisiensi panel surya.

Selanjutnya penelitian yang dilakukan oleh (Pratama and Ahmad, 2024) dengan judul analisis pengaruh polutan debu terhadap pembangkitan daya pada sistem pembangkit tenaga surya juga menjadi referensi penulis dalam penelitian ini. Penelitian ini memiliki tujuan menganalisis pengaruh polutan seperti debu atau

kotoran lainnya yang dapat menutupi permukaan panel surya serta mengurangi jumlah sel matahari yang dapat ditangkap oleh *photovoltaic* (PV) sehingga berpengaruh terhadap kinerja panel surya dan akan menyebabkan kerusakan serta mengurangi masa pakai panel surya. metode yang dilakukan pada penelitian ini adalah penelitian secara langsung di lapangan dengan pengujian sebanyak 6 kali dan dengan 3 macam kondisi, dengan kondisi pertama yaitu permukaan panel surya bersih, selanjutnya permukaan panel surya terpapar debu dengan volume 5gr, dan kondisi yang terakhir yaitu permukaan panel surya terpapar debu dengan volume 10gr. Penelitian ini telah menguji kinerja masing – masing panel dengan 3 (tiga) kondisi permukaan panel surya dengan lama waktu 6 jam/hari selama 3 hari. Hasil akhir dari penelitian ini adalah kondisi panel surya dengan keadaan bersih mendapatkan hasil daya tertinggi dengan rata – rata 9,25 Watt, dan pada panel surya dengan paparan debu bervolume 10gr mendapatkan daya dengan rata – rata ter rendah dengan nilai 7,72 Watt.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Daya Listrik

Daya listrik adalah kemampuan suatu rangkaian untuk mengkonsumsi energi dalam satuan waktu. Daya listrik adalah jumlah energi listrik yang digunakan atau diserap oleh suatu alat listrik dalam satu detik, yang diukur dalam watt (W). Daya listrik juga dapat didefinisikan sebagai usaha atau energi listrik yang digunakan oleh suatu sistem listrik untuk dapat mengubahnya menjadi energi lain seperti panas, cahaya, atau magnetik. Daya listrik didapatkan dengan persamaan

$$P = V.I \quad (2.1)$$

Dimana:

P = daya listrik (Watt)

V = tegangan listrik (Volt)

I = arus listrik (Ampere)

Daya listrik dibagi menjadi tiga bagian yaitu:

- a. Daya aktif (P) juga dikenal sebagai *Active Power*, adalah daya yang sebenarnya digunakan oleh konsumen untuk kebutuhan sehari-hari pada peralatan yang menggunakan sumber listrik. Konsumen harus membayar

sesuai dengan kebutuhan serta konsumsi energi listrik yang digunakan, daya listrik ini tercatat berdasarkan kilometer-jam atau kWh meter.

- b. Daya reaktif (Q) adalah daya yang muncul dari pembentukan medan magnet pada beban induktif dan tidak digunakan oleh konsumen. Ini hanya ada pada jaringan listrik. Daya reaktif terbagi menjadi dua yaitu daya reaktif panas dan daya reaktif mekanik.
- c. Daya Semu (S) atau daya kompleks terdiri atas daya aktif dan daya reaktif. Daya semu dihasilkan oleh generator pada sistem pembangkit listrik atau nilai daya listrik yang dihasilkan melalui suatu penghantar (Toba et al., 2023).

Tegangan listrik adalah perbedaan energi listrik atau potensial antara dua titik dalam rangkaian. Tegangan ini menggerakkan arus listrik melalui penghantar, seperti kawat atau komponen elektronik. Tegangan listrik sederhananya didefinisikan sebagai tekanan atau dorongan yang mendorong elektron-elektron untuk bergerak di dalam jaringan. Tegangan listrik meningkat sesuai dengan perbedaan potensial antara dua titik. Tegangan listrik diukur dalam satuan volt (V), seperti 1,5 volt atau 9 volt pada baterai.

Arus listrik terjadi ketika ada perbedaan potensial atau tegangan antara dua titik dalam rangkaian listrik. Elektron bergerak dari titik potensial yang lebih tinggi ke titik potensial yang lebih rendah, menciptakan arus listrik. Arus listrik adalah energi yang digunakan untuk menggerakkan lampu, komputer, dan perangkat elektronik lainnya saat Anda menggunakannya setiap hari. Arus listrik diukur dengan satuan ampere (A), yang menunjukkan banyaknya muatan yang mengalir melalui suatu titik dalam waktu tertentu (Hilmansyah Susanta, 2024)

Ada dua jenis arus listrik berdasarkan arah aliran listriknya yaitu, *Direct Current* (DC) merupakan Arus listrik yang mengalir satu arah atau pada arah yang sama Contoh sumber arus searah adalah seperti baterai, aki, sel surya dan pencatu daya (*Power Supply*), sedangkan *Alternating Current* (AC) merupakan arus listrik yang mengalir dengan arah arus yang selalu beubah-ubah disebut dengan arus bolak-

balik. Contoh sumber arus bolak-balik adalah listrik PLN dan listrik yang dibangkitkan oleh generator listrik (Ilmi, 2019)

2.2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Energi surya merupakan sumber energi paling berlimpah di bumi ini terutama pada daerah tropis seperti negara kita serta dapat diubah sebagai energi listrik yaitu dengan menggunakan sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS). PLTS merupakan salah satu dari banyaknya bentuk energi terbarukan yang tersedia di Indonesia, pembangkit ini terkenal ramah lingkungan karena memanfaatkan sumber energi berupa cahaya matahari dan memiliki potensi besar untuk dikembangkan. PLTS menggunakan modul *photovoltaic* (PV) atau panel surya sebagai media penyerapan cahaya matahari untuk diubah menjadi listrik, pembangkit dengan teknologi ini merupakan salah satu kandidat yang akan menggantikan energi fosil sebagai penyedia energi dilingkungan perumahan, industri serta bangunan umum lainnya (Cui *et al.*, 2020).

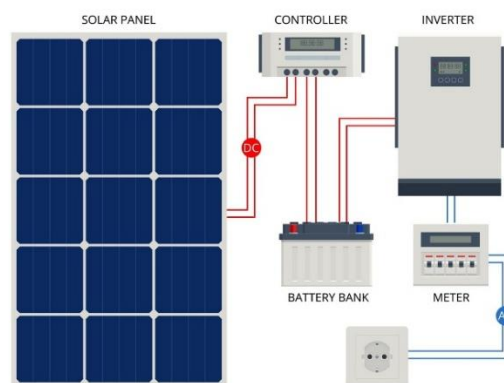


Gambar 1. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (*Pristiandaru, 2020*)

Prinsip kerja dari pembangkit ini yaitu, dari cahaya matahari yang mengandung energi berupa foton, Ketika foton mengenai permukaan sel surya elektron – electron yang terdapat di dalam nya akan tereksitasi dan menimbulkan tegangan listrik. Arus listrik yang dihasilkan dari sel surya berupa arus searah atau *direct current* (DC) sebagai pengisi baterai, selanjutnya arus tersebut akan diubah menjadi arus bolak – balik atau *alternating current* (AC) menggunakan inverter (Subandi and Slamet, 2015). Inverter merupakan sebuah perangkat elektronik yang memiliki prinsip kerja untuk merubah arus listrik searah atau *direct current*

(DC) menjadi arus bolak – balik atau *alternating current* (AC) selain sebagai pengkonversi daya inverter juga berfungsi sebagai penyingkronisasi frekuensi dan tegangan listrik dan jaringan serta sebagai pemantauan efisiensi sistem PV, inverter bekerja dengan mengalihkan arus DC dari baterai aki (*accumulator*) atau baterai panel surya melalui rangkaian sakelar elektronik untuk menghasilkan gelombang AC (Syururi *et al.*, 2022).

Sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) terdiri atas berbagai komponen utama yang bekerja secara sinergi untuk mengkonversi energi matahari menjadi energi listrik yang siap digunakan. Komponen – komponen ini meliputi panel surya (solar panel), inverter, system penyimpanan energi (*battery*), kabel penghuvung, struktur montase (*mounting system*) dan *charge controller*, selain itu PLTS juga memerlukan komponen tambahan seperti, pengontrol daya, pengukur kinerja, sekering dan pemutus sekering serta system pemantauan. Setiap komponen memiliki peranan masing – masing dalam memastikan efisiensi dan keadaan sistem (Pijoh *et al.*, 2024).



Gambar 2. Komponen Utama PLTS (Sirkora, 2023)

2.2.3 Jenis-Jenis Modul Surya

Modul *photovoltaic* (PV) yang umumnya digunakan memiliki berbagai macam jenis dan juga karakteristik serta keunggulan yang berbeda. Berikut merupakan beberapa diantaranya:

- a. Monokristalin (*Monocrystalline*) merupakan jenis PV yang terbuat dari silikon kristal tunggal dengan struktur yang seragam, modul PV ini memiliki efisiensi hasil tinggi dengan rata – rata 14% sampai 17%. Memiliki

keunggulan kinerja yang baik dan umur pakai lebih panjang, kelemahan dari PV ini adalah biaya produksi yang tinggi dan kurang efektif jika dipasang pada tempat yang kekurangan sinar matahari.

- b. Polikristaline (*polycrystalline*) merupakan modul PV yang terbuat dari silikon yang terdiri atas banyaknya kristal kecil, modul PV ini memiliki efisiensi yang lebih rendah dibandingkan dengan modul monokristaline yaitu pada 12% hingga 14% sehingga ini termasuk dalam kelemahannya. Modul ini memiliki keunggulan berupa proses produksi yang lebih sederhana dan biaya yang lebih murah.
- c. Amorphous (*Amorphous Silicon Solar Panel*) merupakan modul yang menggunakan bahan silikon amorf atau silikon dengan bentuk non kristal sebagai bahan utamanya. Modul ini memiliki efisiensi paling rendah dibanding jenis lainnya yaitu dengan rata – rata 4% hingga 6%, memiliki keunggulan berupa ukuran yang tipis sehingga memiliki kinerja lebih baik dalam kondisi cahaya yang rendah dan biaya produksi rendah (Bahagiya *et al.*, 2024).



Gambar 3. Jenis - Jenis Panel Surya (*Energy*, 2022)

Sel surya monofasial hanya mengumpulkan foton dari radiasi yang mencapai sisi depan perangkat. Modul surya bifasial mengumpulkan foton dari radiasi yang mengenai dan radiasi albedo yang mencapai sisi belakang dan depan modul surya secara bersamaan. sebagai ide baru untuk meningkatkan output energi sistem fotovoltaiik (PV), menunjukkan bahwa menggunakan perangkat konsentrator yang meningkatkan radiasi albedo dan radiasi langsung dari atap dan lingkungan sekitar modul dapat menghasilkan peningkatan 50% dalam pembangkitan listrik.

Akibatnya, ditunjukkan bahwa sel surya bifacial dapat meningkatkan densitas daya modul fotovoltaik (PV) sambil mengurangi biaya yang terkait (Guerrero-Lemus et al., 2016)

2.2.4 Faktor yang Mempengaruhi Kinerja Modul Surya

Kinerja pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) sangat bergantung pada beberapa faktor seperti pada faktor lingkungan dan kebersihan, terutama pada intensitas cahaya, suhu sekitar serta debu. Intensitas cahaya matahari berperan secara langsung dalam menentukan jumlah energi yang dapat diserap oleh modul *photovoltaic* (PV), dimana semakin tinggi intensitas cahaya maka semakin besar energi listrik yang akan dihasilkan (Utomo *et al.*, 2022). Sementara itu suhu lingkungan juga memengaruhi efisiensi konversi energi menjadi listrik, peningkatan suhu pada modul dapat menyebabkan penurunan efisiensi konversi energi atau yang dikenal sebagai derating suhu (Hadianto *et al.*, 2023). Hal tersebut menjadi tantangan utama pada pengoperasian PLTS, terutama pada iklim tropis yang memiliki intensitas cahaya tinggi namun juga suhu lingkungan yang relative panas.

Selain intensitas cahaya dan suhu, kinerja PLTS juga sangat dipengaruhi oleh faktor akumulasi debu pada permukaan modul *photovoltaic* (PV). Debu yang menumpuk dapat mempengaruhi masuknya cahaya matahari ke permukaan modul, sehingga dapat mengurangi jumlah energi yang terserap dan mengurangi efisiensi konversi energi (Pratama and Ahmad, 2024). Debu merupakan partikel halus yang tersebar di atmosfer dan dapat berasal dari berbagai sumber baik alami atau dari aktivitas manusia. Terdapat berbagai jenis debu di lingkungan sekitar, mulai dari debu mineral yang berasal dari erosi tanah, batuan atau pasir kemudian debu organik yang berasal dari dekomposisi tanaman, debu biologis yang meliputi mikroorganisme seperti bakteri, virus dan sebagainya, hingga debu industri yang terjadi akibat aktivitas industri seperti pembakaran bahan bakar fosil sampai dengan pertambangan (Wijaya *et al.*, 2023)

Beberapa faktor lain seperti *Hot Spot* juga dapat mempengaruhi kinerja pada modul *photovoltaic* (PV). *Hot spot* sendiri merupakan titik panas atau pemanasan lokal yang terjadi pada modul surya yang disebabkan oleh beberapa faktor seperti

kerusakan sel pada modul surya seperti keretakan pada sel atau kecacatan saat produksi. *Hot spot* dapat juga disebabkan oleh bayangan yang terbentuk dari objek seperti tumbuhan bangunan, debu serta kotoran. Salah satu contoh *hot spot* yang sering terjadi adalah kotoran burung yang menempel pada modul surya seperti pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Contoh Hot Spot Pada Modul Surya (Rosyid et al., 2025)

Kotoran burung tersebut berpotensi menyebabkan *hot spot* atau peningkatan suhu pada modul pv. Peningkatan suhu pada pv dapat mengakibatkan terjadinya penurunan daya yang dihasilkan serta dapat mengakibatkan terjadinya penurunan efisiensi pada kinerja modul, bahkan dapat menyebabkan terbakarnya sel pada modul yang tertutup oleh kotoran tersebut.

2.2.5 Resistance Temperatur Detector (RTD)

Sensor dapat didefinisikan sebagai perangkat yang dapat menerima dan merespon sinyal dalam bentuk besaran fisik atau kimia, yang kemudian dapat dikonversi menjadi besaran listrik melalui sirkuit elektronik. Sirkulasi listrik harus memiliki kemampuan untuk mengalirkan, memperkuat, dan mengubah jumlah listrik yang ada. Berbagai jenis sensor suhu termasuk termokopel, termistor (juga dikenal sebagai resistor termal atau resistor sensitif termal), dan RTD. Sensor suhu mendeteksi parameter fisik seperti resistansi atau tegangan keluaran melalui perubahan suhu. Nilai resistansi Detektor Suhu Resistansi (RTD) menurun seiring

penurunan suhu. RTD adalah termometer yang menggunakan Koefisien Suhu Resistansi (TCR) untuk mengukur suhu. TCR adalah koefisien suhu-resistansi yang menunjukkan seberapa sensitif RTD terhadap perubahan suhu. Semakin tinggi nilai TCR bahan, semakin sensitif bahan terhadap perubahan suhu. Dengan demikian, meningkatkan suhu dapat meningkatkan nilai resistansi. Kemudian, RTD dihubungkan ke serangkaian jembatan *Wheatstone*. Jembatan ini biasanya berupa jembatan 2WCB, 3WCB, dan 4WCB, yang berfungsi untuk mengubah resistansi bahan yang digunakan untuk membuat RTD terhadap tegangan sebagai keluaran (Singgih et al., 2020)

Pyranometer adalah alat ilmiah yang digunakan untuk mengukur intensitas radiasi matahari yang jatuh pada suatu bidang datar. Pyranometer memiliki sensor yang dapat menangkap fluks elektromagnetik dari sinar matahari baik tersebar maupun langsung dan kemudian mengonversi ukuran fisik tersebut menjadi sinyal daya per satuan luas, atau watt per meter persegi. Instrument ini biasanya digunakan dalam sistem fotovoltaik dan stasiun cuaca untuk memantau kondisi radiasi surya yang diterima secara real-time. Ini adalah parameter penting dalam perhitungan efisiensi pembangkitan energi surya dan dalam analisis klimatologi. Agar hasil sensor akurat dan sesuai dengan keadaan sebenarnya, pyranometer harus dikalibrasi terhadap alat standar karena keluarannya terdiri dari parameter listrik. Faktor-faktor seperti akurasi, presisi, dan atribut seperti histeresis dievaluasi untuk menentukan seberapa andal pyranometer berbasis fotovoltaik dapat melakukan pengukuran dibandingkan dengan instrumen konvensional (Megantoro et al., 2022).

2.2.6 Scanning Electron Microscop dan Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDS)

SEM (*Scanning Electron Microscope*) dan EDS (*Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*) adalah teknik yang secara luas digunakan untuk melihat morfologi permukaan, struktur, dan kandungan dalam berbagai jenis sampel, termasuk polimer, logam, bahan organik, anorganik, dan alam. Metode pengamatan ini menggunakan berkas elektron dengan pancaran energi tinggi untuk memindai objek. Hasilnya adalah gambar dan komposisi sampel. Panjang gelombang berkas

elektron yang digunakan sebagai sumber jauh lebih pendek dari panjang gelombang cahaya, sehingga citra yang dihasilkan oleh metode ini memiliki resolusi dan detail gambar yang lebih baik daripada yang dihasilkan oleh mikroskop optik. Oleh karena itu, metode ini memiliki keunggulan yang lebih besar dan sangat disukai dibandingkan dengan mikroskop optik. Metode ini dapat digunakan untuk membuat gambar tiga dimensi dengan resolusi dan perbesaran yang jauh lebih besar. Pengondisian sampel harus dilakukan sehingga menjadi konduktif dan dapat mengalirkan elektron untuk menghasilkan gambar yang baik (Sahdiah & Kurniawan, 2023)

2.2.7 Data Logger

Data logger merupakan perangkat elektronik yang dikenal dapat mengumpulkan dan merekam data dari objek yang direkam melalui sensor *internal* dan *eksternal*, seperti sensor tegangan, suhu dan arus. *Data logger* biasanya digunakan untuk menyimpan data dalam waktu yang lama dan mengumpulkan data tentang parameter listrik dan meteorologi. Rekaman dan pengumpulan data dilakukan secara *real-time* kemudian disimpan pada kartu MMC/SD. Ini digunakan untuk melindungi data apabila *data logger* rusak (Taqwin et al., 2023)

2.2.8 Weather Station

Weather Station adalah alat atau perangkat yang memberikan informasi tentang cuaca di sekitar kita. Misalnya menunjukkan suhu, tekanan barometrik, kelembapan, intensitas cahaya, dan nilai curah hujan. Untuk beroperasi secara konsisten, *Weather Station* membutuhkan sumber daya, terutama sumber daya listrik. Selain itu, untuk menghindari kehilangan sumber daya, ada sumber daya cadangan yang dapat digunakan untuk memasok energi ke *Weather Station*. Panel surya adalah komponen utama dalam sistem pembangkit listrik tenaga surya dan berfungsi untuk menghasilkan energi langsung dari cahaya matahari. Dengan menggunakan sensor arus dan sensor tegangan, sistem pencatatan data keluaran panel surya berbasis mikrokontroler dapat memantau langsung parameter keluaran panel surya, seperti tegangan, arus, dan daya. Ini memungkinkan pemantauan

langsung keluaran panel surya dan pengukuran kinerjanya dalam kondisi lingkungan tertentu. Penggunaan panel surya sebagai sumber energi listrik selain Perusahaan Listrik Negara (PLN) dapat dipantau dan dikendalikan secara jarak jauh untuk mendapatkan data dalam kondisi *real time*. Penggunaan kedua sumber ini harus dikelola dengan hati-hati dengan menggunakan server web dan mikrokontroler. Untuk mengetahui kondisi penggunaan sumber energi listrik, gunakan fitur cuaca seperti cerah, berawan, dan hujan (Hermansyah et al., 2020).

3.2.9 Performance Ratio (PR)

PR merupakan salah satu metrik yang digunakan untuk mengukur efisiensi kinerja suatu sistem pembangkit tenaga listrik, terutama dalam hal pembangkit listrik tenaga surya (PLTS). PR menunjukkan hubungan antara keluaran energi sistem yang sebenarnya dan keluaran energi maksimum teoretis yang dapat dihasilkan dalam kondisi ideal. Dengan kata lain, PR menunjukkan seberapa efektif sistem mengubah energi matahari menjadi energi listrik yang dapat digunakan dengan mempertimbangkan semua kerugian, seperti panas, kerusakan bagian, dan kotoran di modul surya. PR adalah perbandingan efisiensi sistem saat beroperasi di lapangan dengan efisiensi modul pada kondisi STC. Nilai PR dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

Performance Ratio (PR)

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \quad (2.2)$$

Y_f – Final Yield (Y_f)

$$Y_f = \frac{E_{AC}}{P_0} \quad (2.3)$$

Y_r – Reference Yield

$$PR = \frac{H_T}{G_{STC}} \quad (2.4)$$

Dimana,

PR = Performance Ratio

Y_f = Jumlah energi listrik yang dihasilkan

Y_r = Total radiasi matahari yang diterima

E_{AC} = daya output terukur dari panel (kWh)

P_0 = kapasitas terpasang PV (kWp)

H_T = radiasi kumulatif (kWh/m²)

G_{STC} = irradiansi referensi pada kondisi STC

Rasio kinerja ini sangat penting untuk memantau kondisi dan efisiensi sistem energi surya dan untuk menemukan penurunan kinerja karena kotoran, kerusakan, atau gangguan teknis lainnya (Umar Mukhtar et al., 2025).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini akan dilaksanakan pada bulan Januari 2025 sampai dengan bulan Mei 2025 di Pusat Riset Konversi dan Konservasi Energi, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) berlokasi digedung 625 KST BJ Habibie Kawasan PUSPITEK, Serpong.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

Dalam pelaksanaan penelitian ini terdapat alat dan bahan yang digunakan antara lain sebagai berikut:

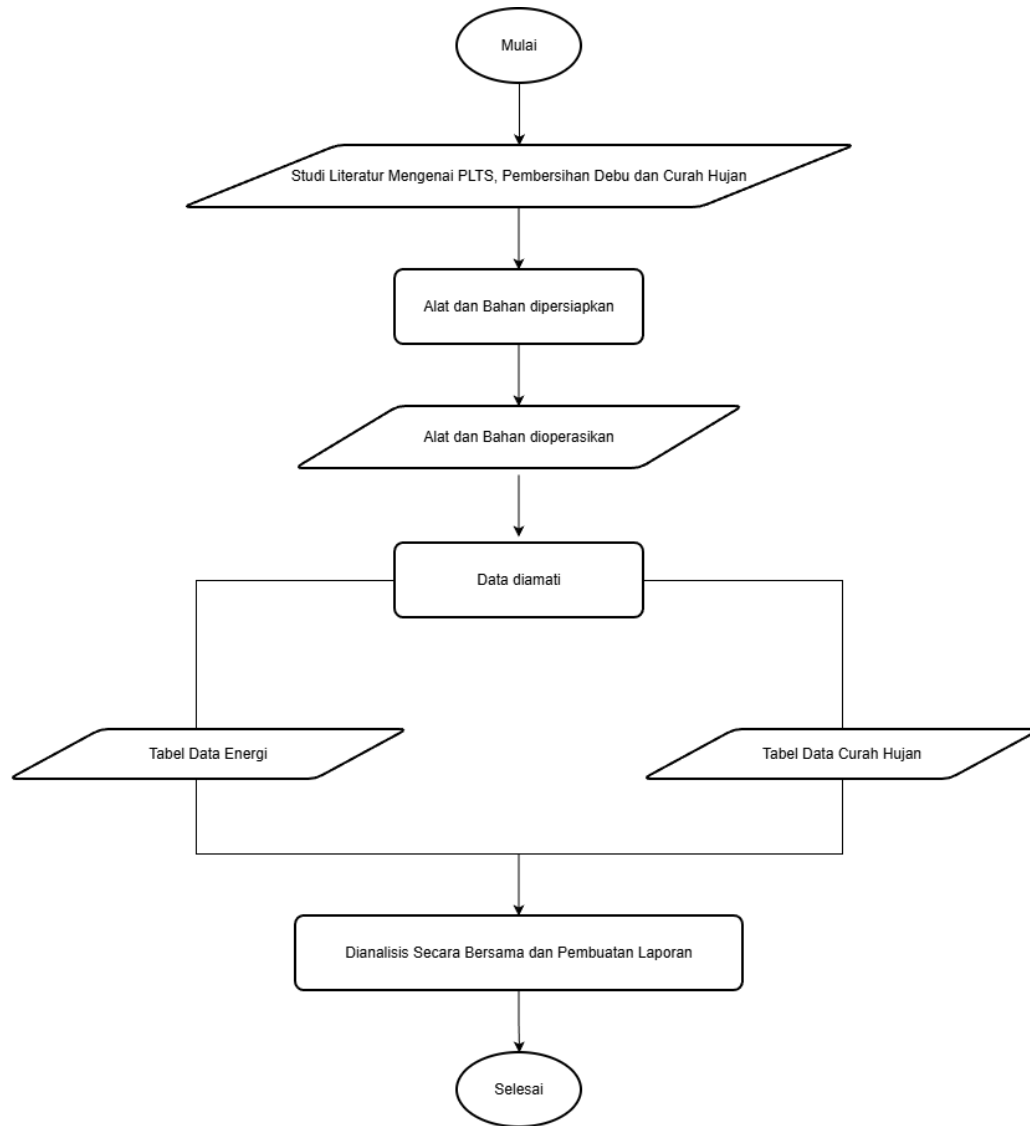
Tabel 1. Alat dan Bahan

No	Nama	Fungsi
1.	Laptop	Untuk mengolah dan menganalisis data
2.	Panel Surya	Untuk mengamati dan mengukur kinerja PLTS
3.	Multimeter	Untuk mengukur tegangan, arus, serta daya yang dihasilkan
4.	Inverter	Untuk konversi energi DC menjadi AC
5.	Data Longger	Untuk merekam data kinerja panel surya secara otomatis
7.	Alat Pembersih Panel (Kain <i>Microfiber</i> dan Spons)	Untuk membersihkan panel surya selama periode penelitian
8.	Kabel dan Konektor	Untuk menghubungkan panel surya dengan alat pengukur

No.	Nama	Fungsi
9.	<i>Pyranometer</i> (Radiasi Meter)	Untuk mengukur intensitas radiasi matahari
10.	<i>Weather Station</i>	Untuk mendeteksi cuaca di lingkungan penelitian
11.	Resistensi Detektor Suhu (RTD)	Mengukur Perubahan Suhu
12.	SEM (<i>Scanning Electron Microscope</i>)	Untuk menganalisis struktur permukaan suatu benda
13.	EDS (<i>Energy Dispersive X-ray Spectroscopy</i>)	Untuk mengidentifikasi dan mengukur kandungan unsur pada sampel
14.	MCB (<i>Miniature Circuit Breaker</i>)	Untuk pemutus arus listrik secara otomatis saat terjadi gangguan seperti beban berlebih atau korsleting.

3.3 Prosedur Penelitian

Penelitian ini mencakup beberapa tahapan seperti, persiapan alat dan bahan, pengumpulan data, pengolahan data hingga analisis yang digunakan untuk memperoleh hasil yang diinginkan. Langkah – Langkah yang dilakukan pada penelitian ini ditunjukkan dalam diagram alir penelitian pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Diagram Alir Penelitian

3.3.1 Tahap Pemasangan Alat Ukur dan Pengoperasian Sistem Pengamatan

Pada tahap ini dilakukan *instalasi* alat yang digunakan untuk menunjang jalannya penelitian, skema pemasangan alat penelitian dapat dilihat pada **Gambar 6**.



Gambar 6. Skema *Set Up* Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perbandingan energi listrik yang dihasilkan dari modul surya yang dibersihkan secara berkala dan yang tidak dibersihkan. alat yang digunakan berupa panel surya yang berfungsi sebagai penyerap radiasi matahari dengan bantuan weather station dan sensor suhu untuk mendeteksi suhu serta cuaca dilingkungan sekitar, data tersebut terhubung pada kabel MC4 yang terpasang pada inverter serta kabel kabel yang di satukan pada mcb box, kemudian data tersebut di catat secara realtime dengan menggunakan data logger yang kemudian akan diolah dengan menggunakan PC. Selama pengambilan data berlangsung, dilakukan juga pembersihan berkala terhadap panel surya dengan jangka waktu berbeda yaitu, PV1 dibersihkan satu minggu sekali, PV2 dibersihkan dua minggu sekali, PV3 dibersihkan 4 minggu sekali dan PV4 tidak dibersihkan.

3.4 Tahapan Pengumpulan Data

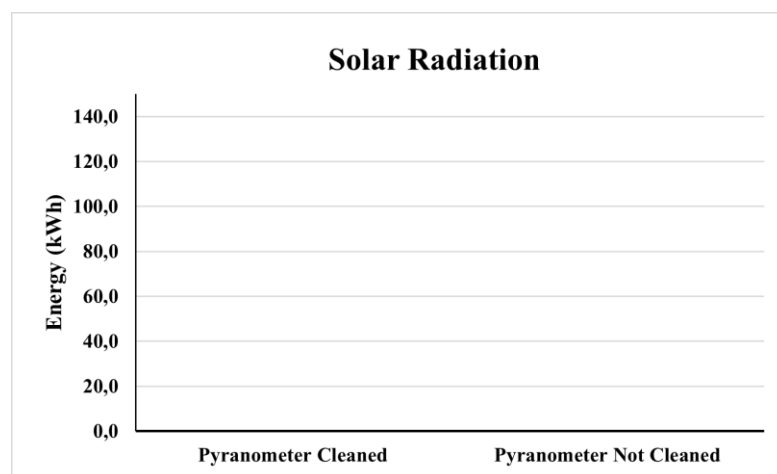
3.4.1 Pengambilan Data Dengan *Data Logger*

Setelah selesai pemasangan *set up* penelitian, kemudian dilakukan pengamatan terhadap modul surya dengan mengumpulkan beberapa data yang diperlukan seperti iradiasi, arus, tegangan, serta temperatur yang dihasilkan dari *data logger*. Pengamatan dilakukan dengan penjemuran modul surya dengan waktu pembersihan berbeda pada setiap modulnya. Adapun data pengamatan pada modul surya ditunjukkan pada **Tabel 2**.

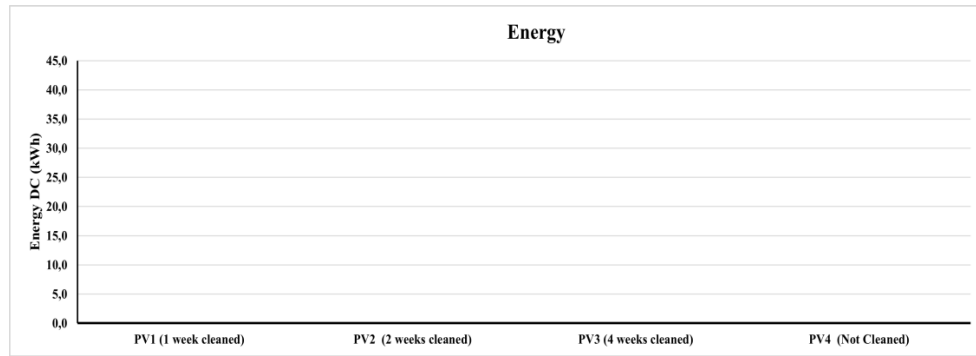
Tabel 2. Data Pengamatan Terhadap Modul Surya

No.	Solar Radiation Pyr Clean	Solar Radiation Pyr Not Clean	PV1 (1 week)		PV2 (2 week)		PV3 (4 week)		PV4 (not clean)	
	W/m ²	W/m ²	V	I	V	I	V	I	V	I
1.										
2.										
3.										
4.										
5.										
dst.										

Data hasil dari pengamatan modul surya tersebut akan dihasilkan berbandingan energi antara *pyranometer* dan modul surya yang dibersihkan serta tidak dibersihkan. Hasil dari *pyranometer* tersebut berupa *solar radiation* atau radiasi matahari yang terlihat seperti **Gambar 7**.

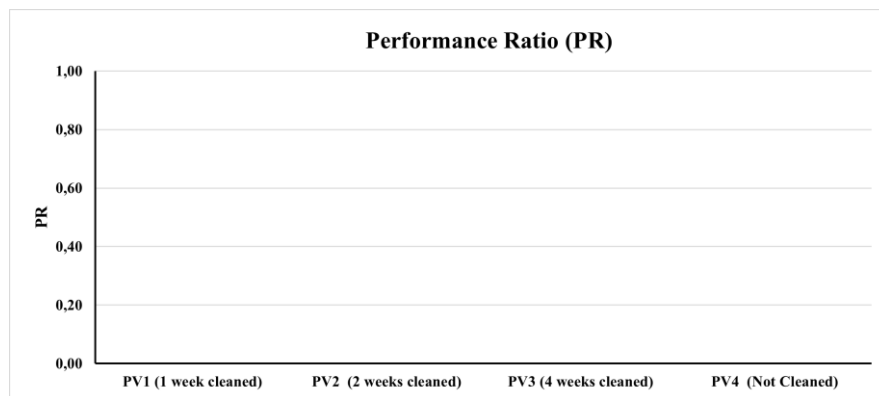
**Gambar 7.** Grafik *Solar Radiation*

Sedangkan hasil dari modul surya berupa energi atau daya dapat dilihat pada **Gambar 8**.



Gambar 8. Grafik Output daya

Kemudian dilakukan perhitungan antara *Solar Radiation* dan *Output* energi untuk mendapatkan grafik dari Performance Ratio (PR) Adapun hasilnya ditunjukkan pada **Gambar 9**.



Gambar 9. Grafik *Performance Ratio*

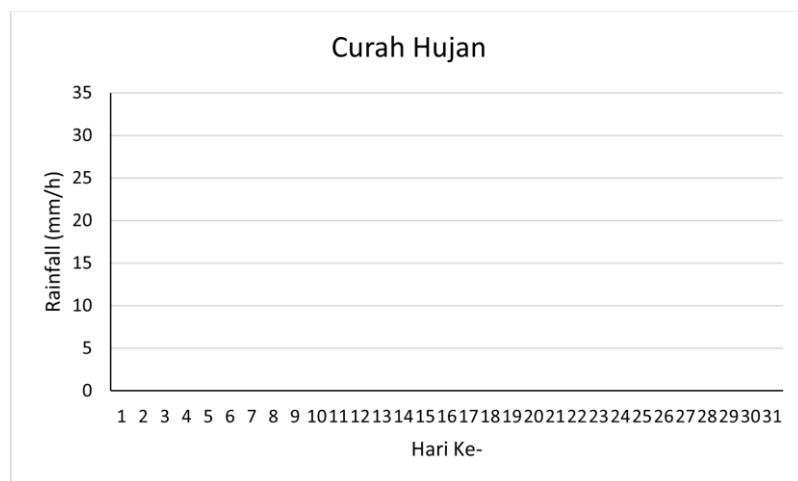
3.4.2 Pengambilan Data Dengan *Weather Station*

Pengamatan ini juga memerlukan data berupa catatan cuaca dilingkungan sekitar seperti suhu, kelembapan, hujan, serta angin untuk mengetahui kemungkinan debu berterbangan ataupun terkikis oleh angin dan hujan yang terjadi. Data tersebut dapat dilihat seperti pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Data *Weather Station*

Hari Ke-	Rainfall (mm/h)
1.	
2.	
3.	
4.	
5	
Dst.	

Dari hasil pengamatan tersebut bisa di dapatkan hasil pengamatan berupa curah hujan serta suhu dilingkungan sekitar seperti pada **Gambar 10.**

**Gambar 10.** Grafik *Weather Station*

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Berdasarkan hasil pengamatan dan pembahasan mengenai intensitas curah hujan dan pembersihan debu secara berkala terhadap energi yang dihasilkan oleh modul surya pada penelitian ini, maka didapatkan beberapa simpulan sebagai berikut.

1. Waktu pembersihan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap jumlah energi yang dihasilkan oleh setiap modul surya. PV3 menghasilkan jumlah energi yang lebih besar dibandingkan dengan PV1 dan PV2, menunjukkan bahwa frekuensi pembersihan yang terlalu sering tidak selalu sebanding dengan jumlah energi yang dihasilkan.
2. Hujan dengan intensitas tinggi, seperti yang terjadi pada hari ke-25 dengan nilai mencapai 278,2 mm/h, berperan efektif dalam membersihkan debu yang menempel sehingga dapat meningkatkan kembali efisiensi penyerapan energi pada modul. Sebaliknya, pada periode tanpa hujan atau dengan intensitas hujan yang rendah, debu cenderung tetap menumpuk di permukaan panel dan menyebabkan penurunan kinerja modul.
3. Secara keseluruhan, kombinasi antara waktu pembersihan dan curah hujan berperan penting untuk menjaga kinerja panel surya. Diperlukan strategi pemeliharaan yang dapat disesuaikan dengan kondisi lingkungan serta pemeriksaan secara berkala terhadap panel surya

5.2 Saran

Saran yang diberikan untuk penelitian selanjutnya sebagai berikut.

1. Melakukan pembersihan modul sesuai dengan iklim lingkungan sekitar seperti mengurangi pembersihan manual pada lingkungan dengan curah hujan tinggi, sedangkan peningkatan pembersihan manual saat musim kemarau tiba untuk tetap menjaga performa.
2. Pengembangan sistem pembersihan manual seperti pembersihan dengan mengandalkan teknologi pembersihan otomatis yang dapat membantu meminimalkan akumulasi debu tanpa harus melakukan pembersihan manual
3. Melakukan pemantauan jangka panjang agar dapat menganalisis pengaruh musim hujan dan kemarau terhadap performa modul surya.

DAFTAR PUSTAKA

- Al Hakim, R. R. (2020). Model Energi Indonesia, Tinjauan Potensi Energy Terbaru Untuk Ketahanan Energi Di Indonesia: Literatur Review. *ANDASIH Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 1(1), 1–11. <https://jurnal.umitra.ac.id/idex.php/ANDASIH/article/view/374/253>
- Bahagiya, M. U., Haryani, Winarto, A. T., & Khoiruddin, A. (2024). Implementasi Panel Surya Sebagai Sumber Listrik Tambahan Pada Pondok Pesantren Al Muhammad Sebagai Upaya Penghematan Biaya Tagihan Listrik Pln. *Scientica Jurnal Ilmiah Sains Dan Teknologi*, 2(7), 236–240.
- Cui, Y., Zhu, J., Meng, F., Zoras, S., McKechnie, J., & Chu, J. (2020). Energy assessment and economic sensitivity analysis of a grid-connected photovoltaic system. *Renewable Energy*, 150, 101–115. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.127>
- Damayanti, F., Sasana, H., & Destiningsih, R. (2020). Analisis Faktor-Faktor Pendorong Total Konsumsi Energi Akhir Di Indonesia. *Directory Journal of Economic*, 2, 501–514.
- Elsa Effendi, N., Abrianto, H., & Darmawan Sidik, A. (2020). Analisa Pengaruh Kondisi Panel Surya Kotor Dengan Panel Surya Bersih Terhadap Energi Listrik Yang Dihasilkan. *Jurnal Cahaya Mandalika (JCM)*, 1025–1040.
- Guerrero-Lemus, R., Vega, R., Kim, T., Kimm, A., & Shephard, L. E. (2016). Bifacial solar photovoltaics - A technology review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1533–1549. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.041>
- Hadianto, Alim, N., Lateko, A. H., & Adriani. (2023). Analisis Pengaruh Suhu Kerja pada Panel Surya terhadap Daya Keluaran dari Panel. *Vertex Elektro*, 15(1), 32–39.
- Hermansyah, H., Kasim, K., & Yusri, I. K. (2020). Solar Panel Remote Monitoring and Control System on Miniature Weather Stations Based on Web Server and ESP32. *International Journal of Recent Technology and Applied Science*, 2(1), 1–24. <https://doi.org/10.36079/lamintang.ijortas-0201.56>

- Hilmansyah Susanta, M. (2024). Pengukuran Tegangan Dan Arus Listrik Menggunakan Sensor Ina 219. *Jurnal Ilmiah Sains Dan Teknologi*, 3(1), 326–332.
- Ilmi, U. (2019). Studi Persamaan Regresi Linear Untuk Penyelesaian Persoalan Daya Listrik. *Jurnal Teknik*, 11(1), 1083. <https://doi.org/10.30736/jt.v11i1.291>
- Megantoro, P., Syahbani, M. A., Perkasa, S. D., Muzadi, A. R., Afif, Y., Mukhlisin, A., & Vigneshwaran, P. (2022). Analysis of instrumentation system for photovoltaic pyranometer used to measure solar irradiation level. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 11(6), 3239–3248. <https://doi.org/10.11591/eei.v11i6.4390>
- Nurhasanah, A. F., Sudarti, S., & Yushardi, Y. (2023). Kajian Perubahan Iklim Terhadap Efisiensi Panel Surya Sebagai Sumber Energi Alternatif Di Indonesia. *OPTIKA: Jurnal Pendidikan Fisika*, 7(2), 366–375. <https://doi.org/10.37478/optika.v7i2.3284>
- Panji Asmara, B. (2021). Tinjauan Pengukuran Keluaran Photovoltaic (PV) Terhadap Pengaruh Kekotoran Debu Dan Beban. *SemanTECH (Seminar Nasional Teknologi, Sains Dan Humaniora)*, 3(1), 208–212. <http://jurnal.poligon.ac.id/index.php/semantech/article/view/786>
- Pijoh, F., Brahmana Duta P. K., & Purba Parulian Lasman. (2024). Pembangkit Listrik Tenaga Surya untuk Energi RamahLingkungan yang Berkelanjutan. *Industrial & System Engineering Journals*, 2(2), 201–207.
- Pratama, E. A., & Ahmad, R. N. (2024). Analisis Pengaruh Polutan Debu Terhadap Pembangkitan Daya Pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya. 3, 1–19. <https://eprints.ums.ac.id/id/eprint/121708>
- Pristiandaru, D. L. (2020). Inspirasi Energi :PLTS Dan PLTB Berlipat Ganda 5 Tahunterakhir,Tapi Itu Belum Cukup. Retrieved From Kompas.Com :https://www.kompas.com/global/read/2020/08/31/173646570/inspirasiEnergi-Plts-Dan-Pltb-Berlipat-Ganda-5-Tahun-Terakhir-Tapi-Itu?utm_source=Various&utm_medium=Referral&utm_campaign=BottomMobile
- Purnomo, S., Arief, Y. Z., Jaenul, A., & Wilyanti, S. (2023). Analisis Pengaruh Cuaca Terhadap Efisiensi Panel Surya Grid Tie Menggunakan Konfigurasi Micro Inverter Dan String Inverter Terhadap Energi Yang Dihasilkan. *Jurnal Media Elektro*, XII(2), 100–110. <https://doi.org/10.35508/jme.v12i2.12648>
- Qiro'atul Aini, S. (2015). Hubungan Paparan Debu dengan Kapasitas Vital Paru Pekerja Batu Bara The Relationship between Dust Exposure and Vital Capacity of Lung in Coal Workers. *J Agromed Unila*, 2(4), 493–499.

- Rosyid, O. A., Sibagariang, Y. P., Sudrajat, A., Hasan, M., Lande, N. M., Priyadi, A., Faradilla, A., Hartadhi, Sunarna, S., & Ambarita, H. (2025). Effects of cleaning interval of PV module and pyranometer on PV system performances in tropical climate of Indonesia. *Results in Engineering*, 25, 103959. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.103959>
- Sahdiah, H., & Kurniawan, R. (2023). Optimasi Tegangan Akselerasi pada SEM-EDX untuk Pengamatan Morfologi Sampel Biologi. *Jurnal Sains Dan Edukasi Sains*, 6(2), 117–123.
- Singgih, S., Toifur, M., & Suryandari, S. (2020). Experimental Design in Constructing Low Temperature Sensor Based on Resistance Temperature Detector (RTD). *Indonesian Journal of Science and Education*, 4(2), 99. <https://doi.org/10.31002/ijose.v4i2.2758>
- Sirkora, G. (2023). Info Lengkap: Fungsi Inverter Pada Sistem Energi Surya. Retrieved From SUN Energy: <https://Sunenergy.Id/Fungsi-Inverter-Pada-Sistem-Energi-Surya>
- Solikah, A. A., & Bramastia, B. (2024). Systematic Literature Review : Kajian Potensi dan Pemanfaatan Sumber Daya Energi Baru dan Terbarukan Di Indonesia. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 5(1), 27–43. <https://doi.org/10.14710/jebt.2024.21742>
- Subandi, & Slamet, H. (2015). Pembangkit Listrik Energi Matahari Sebagai Penggerak Pompa Air Dengan Menggunakan Solar Cell. *Jurnal Teknologi Technoscientia*, 7(2), 157–163. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-457-2.X5000-8>
- Syururi, M. A., Kaloko, B. S., & Cahyadi, W. (2022). Rancang Bangun Inverter 600 Watt dengan Metode Sinusoidal Pulse Width Modulation. *Jurnal Teknik Elektro Dan Komputer*, 11(3), 147–154.
- Talawo, D. C. P., Ilham, J., & Amali, L. M. K. (2022). Pengaruh Polutan pada Permukaan Panel Surya Terhadap Kinerja Panel Surya Kapasitas 10 Wp. *Jambura Industrial Review*, 2(1), 31–38. <https://doi.org/10.37905/jirev.2.1.31-38>
- Taqwin, R. A., Tadeus, Y., Mangkusasmito, F., & Putranto, A. B. (2023). Rancang Bangun Sistem Data Logger Dan Monitoring Untuk Instalasi Panel Surya Grid Tie (Gti) Inverter 600 W Dengan Interfacing Blynk. *Berkala Fisika*, 26(1), 25–33.
- Toba, F., Suoth, V. A., Kolibu, H. S., Mosey, H. I. R., As'ari, & Pandara, D. P. (2023). Analisis Perbandingan Daya Listrik Saat Sebelum Dan Sesudah Variasi Kapasitor Pada Beban Listrik Rumah Tangga. *Jurnal MIPA*, 13(1), 11–17. <https://doi.org/10.35799/jm.v13i1.48968>

- Umar Mukhtar, Paniran, & Rosmaliati. (2025). Analisis Performa Rasio Daya Yang Dihasilkan Pn Modul Pada Array Box 881 Di PLTS 7 Mwp. *Dielektrika*, 12(1), 41–46. <https://doi.org/10.29303/dielektrika.v12i1.400>
- Utomo, B. R., Isdhianto, I., Kusnanto, H., Iwan, M., Sarwono, E., & Hassan, H. K. (2022). Analisa Pengaruh Intensitas Cahaya terhadap Kinerja Modul Photovoltaic Cell. *Creative Research in Engineering*, 2(2), 72. <https://doi.org/10.30595/serie.v2i2.14171>
- Wijaya, R. P., Budianto, B. H., & Wibowo, H. (2023). Prevalensi , Intensitas , dan Faktor Resiko Tungau Debu Rumah pada Penderita Alergi di Purwokerto, Kabupaten Banyumas. *BioEksakta: Jurnal Ilmiah Biologi Unsoed*, 5(1), 18–25.
- Yap, W. K., Galet, R., & Yeo, K. C. (2015). Quantitative Analysis of Dust and Soiling on Solar PV Panels in the Tropics Utilizing Image-Processing Methods. *2015 Asia-Pacific Solar Research Conference, 2014*, 10.