

**TESIS**

**PERBANDINGAN RANCANGAN SISTEM PEMBANGKIT  
LISTRIK TENAGA SURYA BERBASIS DATA PROTOTYPE *SUN  
TRACKER* DAN SOFTWARE *PVSYST***

*Comparison of Solar Power Plant System Design Based on Sun  
Tracker Prototype Data and Pvsyst Software*

**MUHAMMAD SAYYID GHULAM RASYIQ  
D032 19 2 007**



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO  
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2024**



## **PENGAJUAN TESIS**

# **PERBANDINGAN RANCANGAN SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA BERBASIS DATA PROTOTIPE *SUN TRACKER* DAN *SOFTWARE PVSYST***

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister

Program Studi Ilmu Teknik Elektro

Disusun dan diajukan oleh

**MUHAMMAD SAYYID GHULAM RASYIQ  
D032192007**

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2024**



# TESIS

## PERBANDINGAN RANCANGAN SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA BERBASIS DATA PROTOTIPE *SUN TRACKER* DAN *SOFTWARE PVSYS*T

**MUHAMMAD SAYYID GHULAM RASYIQ**

**D032192007**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi Program Magister Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik

Universitas Hasanuddin

Pada Tanggal 5 Februari 2024

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

UNIVERSITAS HASANUDDIN

Menyetujui,

Pembimbing Utama



Dr. Ir. Yusran, S.T., M.T.  
NIP. 19750404 200012 1 001

Pembimbing Pendamping



Dr. Ir. Ikhlas Kita, S.T., M.T.  
NIP. 19760914 200801 1 006

Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin



Dr. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T., IPM  
NIP. 19730926 200012 1 002

Ketua Program Studi  
S2 Teknik Elektro



Dr. Eng. Wardi, S.T., M.Eng.  
NIP. 19720828 199903 1 003



## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Muhammad Sayyid Ghulam Rasyiq  
Nomor Pokok Mahasiswa : D032192007  
Program Studi : Teknik Elektro

Dengan ini saya menyatakan bahwa, tesis berjudul “Perbandingan Rancangan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Berbasis Data Prototipe *Sun Tracker* dan *Software Pvsyst*” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Dr. Ir. Yusran, ST., MT. sebagai pembimbing utama dan Dr. Ir. Ikhlas Kitta, ST., MT. sebagai pembimbing pendamping). Karya ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apapun kepada perguruan tinggi manapun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam daftar pustaka pada tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah dipublikasikan di *The 1<sup>st</sup> International Conference on Research in Engineering and Science Technology 2023* sebagai artikel dengan judul “*Effective hours and voltage measurements of solar panels using a sun tracker based on a time algorithm: a case study on Ambon Island, Maluku*”.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 26 Februari 2024

Yang Menyatakan,



Muhammad Sayyid Ghulam Rasyiq



## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah Subhanahu Wa Ta'ala atas segala rahmat dan karunia-Nya yang Allah berikan sehingga penulisan tesis ini dapat diselesaikan. Tak lupa pula shalawat dan salam semoga tetap tercurahkan kepada Nabi Muhammad Shallallahu 'alaihi wasallam, yang telah menyinari dunia ini dengan keindahan ilmu dan akhlak yang diajarkan kepada seluruh umatnya dan sebaik-baik tauladan bagi yang mengharapkan rahmat dan hidayah-Nya.

Bukan hal yang mudah untuk mewujutkan gagasan-gagasan yang terdapat dalam penulisan tesis ini, berkat bimbingan, arahan dan motivasi berbagai pihak maka tesis ini bisa disusun sebagaimana kaidah-kaidah yang dipersyaratkan, dan untuk itu penulis menyampaikan terimakasih kepada:

1. Kedua orang tua, bapak tercinta Sumariyono dan ibunda tercinta Siti Arfah Pelu, terima kasih atas segala doa, kasih sayang, bimbingan dan dukungannya yang tak henti-henti selama saya menempuh pendidikan. Kalian merupakan anugerah terindah yang Allah Subhanahu wa ta'ala hadiahkan dalam hidup saya. Semoga anak mu ini bisa menjadi anak yang terus membanggakan dan membahagiakan kalian di dunia dan akhirat. Serta penghargaan yang besar juga saya sampaikan kepada saudara-saudari Tercinta Dian Ekayanti Astari, Nur Afifah Zhafira, dan Abdullah Abu Tholhah atas segala doa, motivasi dan dukungan yang tak ternilai.
2. Istri Tercinta Awalina Cahyani yang selalu memberikan semangat dan dukungan terus menerus serta senantiasa mendampingi saya hingga saya dapat menyelesaikan studi ini.
3. Dr. Ir. Yusran, ST., MT., sebagai pembimbing utama dan Dr. Ir. Ikhlas Kitta, S.T., M.T., sebagai pembimbing pendamping yang telah meluangkan waktu untuk membimbing, mengarahkan, memberikan masukan dan ilmunya dengan penuh rasa sabar dan tanggungjawab dalam penyelesaian tesis ini.



4. Bapak Dr. Abdul Haris, S.Pi., M.Si. selaku Kepala Dinas Energi Dan Sumber Daya Mineral Provinsi Maluku yang selalu memberi dukungan dan motivasi. Serta rekan-rekan pada Dinas Energi Dan Sumber Daya Mineral Provinsi Maluku yang telah membantu, mendoakan dan memberikan dukungan yang luar biasa.
5. Rektor Universitas Hasanuddin dan Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin serta Ketua Program Studi Magister (S2) Teknik Elektro Universitas Hasanuddin yang telah memfasilitasi saya menempuh program magister serta seluruh dosen dan staf Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
6. Teman-teman seperjuangan Program Magister Teknik Elektro Universitas Hasanuddin angkatan 2019 terkhusus program studi Teknik Energi yang telah banyak membantu dalam perkuliahan, administrasi dan lain-lain. Terima kasih juga atas kerjasamanya yang baik selama ini.

Akhir kata penulis memohon maaf yang sebesar-besarnya atas segala kesalahan yang penulis buat, baik yang disengaja maupun tidak disengaja selama berkuliah di Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Semoga Allah subhana wa ta'ala mengampuni segala kesalahan kita semua. Semoga segala sesuatu yang telah dihasilkan dalam pelaksanaan tesis ini dapat bermanfaat buat kita semua.

Penulis

MUHAMMAD SAYYID GHULAM RASYIQ



## ABSTRAK

**MUHAMMAD SAYYID GHULAM RASYIQ.** *Perbandingan Rancangan Sistem Plts Berbasis Data Prototipe Sun Tracker dengan Software Pvsyst* (dibimbing oleh **Yusran** dan **Ikhlas Kitta**)

Konsumsi listrik di Indonesia meningkat sebesar 16.286.469 MWh dari tahun 2019 hingga 2021. Hal ini menyebabkan pencemaran lingkungan berupa peningkatan emisi karbon akibat penggunaan pembangkit listrik yang didominasi oleh penggunaan bahan bakar fosil. Penelitian ini bertujuan untuk 1.Merancang prototipe panel surya yang mengikuti pergerakan matahari; 2.Mengukur daya dan waktu efektif penyinaran matahari; 3.Merancang sistem PLTS menggunakan *software PVsyst*; 4.Menganalisa perbedaan hasil perancangan panel surya menggunakan data langsung prototipe dan *software PVsyst* di Pulau Ambon. Penelitian ini menggunakan panel *monocrystalline* serta sistem pelacakan matahari dengan arduino uno berbasis algoritma waktu. Perancangan sistem menggunakan skema kebutuhan listrik pada Pulau Tiga dengan perkiraan kebutuhan energi listrik harian sebesar 158,07 kWh. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kapasitas PLTS yang dibutuhkan sebesar 42 & 44 kWp menggunakan simulasi *Software PVsyst* dan 40 kWp menggunakan data hasil pengukuran langsung menggunakan prototipe *sun tracker*. Potensi Daya sebesar 4,75 Wh/Wp perhari serta waktu efektif radiasi matahari di Pulau Ambon berada pada jam 08.00 pagi hingga 17.30 WIT dengan tegangan efektif sirkuit terbuka ( $V_{oc}$ ) 18 – 21,5 Volt.

**Kata kunci** : pembangkit listrik tenaga surya, *sun tracker* berbasis algoritma waktu, *PVsyst*, arduino uno



## ABSTRACT

**MUHAMMAD SAYYID GHULAM RASYIQ.** *PV System Design Comparison Based On Sun tracker Prototype Data and PVsyst Software* (supervised by **Yusran dan Ikhlas Kitta**)

Electricity consumption in Indonesia increased by 16.286.469 MWh from 2019 to 2021. This causes environmental pollution, such as carbon emissions due to using power plants dominated by fossil fuels. Considering its facts, This research aims to determine the comparison of solar panel systems between manual calculations based on direct measurements in the field using prototype and PVsyst software simulation. 1.Design a solar panel prototype that follows the sun's movement; 2.Measure the power and effective time of solar radiation; 3.Design solar power plant system using PVsyst; 4.Analyzing differences in solar panel design using data results from prototype and PVsyst software on Ambon Island. This research uses a monocrystalline panel and a sun tracking system with arduino uno based on time algorithm. The system uses an electricity demand scheme on Tiga Island with an estimated daily electrical consumption of 158,07 kWh. The results show that solar power plant capacity is 42 & 44 kWp using PVsyst software and 40 kWp using direct measurement using prototype sun tracker. The power potential is 4,75 Wh/Wp with effective time and open circuit voltage ( $V_{oc}$ ) of solar radiation on Ambon Island is 08.00 to 17.30 (GMT +9) and 18 – 12,5 V.

**Keywords** : solar power plant, sun tracker based on time algorithm, *PVsyst*, arduino uno



## DAFTAR ISI

<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xiv</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>	<b>xvi</b>
<b>DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN .....</b>	<b>xvii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1    Latar Belakang.....	1
1.2    Rumusan Masalah.....	2
1.3    Tujuan Penelitian .....	2
1.4    Manfaat Penelitian .....	3
1.5    Batasan Masalah .....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>4</b>
2.1    Panel Surya dan Prinsip Kerja .....	4
2.2    Pembangkit Listrik Tenaga Surya.....	4
2.3    Komponen PLTS .....	5
2.4    Konfigurasi PLTS .....	9
2.5 <i>Sun Tracking</i> .....	11
2.6 <i>Sun Tracking</i> Sistem Pasif .....	13
2.7 <i>Sun Tracking</i> Sistem Aktif.....	14
2.8    Sistem Loop Terbuka dan Tertutup .....	15
2.10 <i>Software PVsyst</i> .....	20
2.11   Penelitian Terkait.....	21
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>27</b>
Jenis Penelitian .....	27
Lokasi Penelitian.....	27
Tahapan Penelitian.....	28



3.4	Rancangan Prototipe .....	29
3.5	Pengolahan Data .....	36
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>		<b>39</b>
4.1	Prototipe PLTS <i>Sun Tracker</i> .....	39
4.2	Perkiraan Kebutuhan Energi .....	49
4.3	Simulasi <i>Software PVsyst</i> .....	57
4.3.1	Data <i>PVsyst</i> .....	64
4.3.2	Rancangan <i>PVsyst</i> Sistem Panel Surya Pulau Tiga .....	67
4.4	Rancangan <i>PVsyst</i> Sistem Panel Surya Kebun Cengkeh.....	70
4.5	Perbandingan <i>PVsyst</i> Pulau Tiga dan Pulau Ambon .....	73
4.6	Rancangan Sistem Panel Surya Manual .....	74
4.7	Perbandingan <i>Software PVsyst</i> dan Data Prototipe .....	76
4.8	Konfigurasi Sistem PLTS .....	77
4.9	Kendala Penelitian .....	77
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>		<b>79</b>
5.1	Kesimpulan .....	79
5.2	Saran .....	80
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>81</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>		<b>85</b>



## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1</b> Panel surya <i>monocrystalline</i> (Kencana et al., 2018).....	6
<b>Gambar 2</b> Panel surya <i>polycrystalline</i> (Kencana et al., 2018).....	6
<b>Gambar 3</b> Thin film panel surya (Kencana et al., 2018) .....	7
<b>Gambar 4</b> Rak panel surya (Extension Energy Program, 2009).....	7
<b>Gambar 5</b> Penangkal petir (Extension Energy Program, 2009) .....	8
<b>Gambar 6</b> Inverter PLTS (Extension Energy Program, 2009) .....	8
<b>Gambar 7</b> Konfigurasi PLTS tanpa baterai (Extension Energy Program, 2009) 10	
<b>Gambar 8</b> Konfigurasi PLTS baterai (Extension Energy Program, 2009).....	10
<b>Gambar 9</b> Pin ATMEGA328P.....	17
<b>Gambar 10</b> Layout arduino uno R3 .....	19
<b>Gambar 11</b> Lokasi pengambilan data potensi PLTS .....	28
<b>Gambar 12</b> Lokasi sampel perkiraan beban .....	28
<b>Gambar 13</b> Desain prototipe <i>sun tracker</i> .....	29
<b>Gambar 14</b> Rangkaian alat pengukur potensi PLTS .....	30
<b>Gambar 15</b> Diagram komponen prototipe .....	31
<b>Gambar 16</b> Sudut tempuh <i>sun tracker</i> .....	31
<b>Gambar 17</b> Algoritma program prototipe <i>sun tracker</i> .....	32
<b>Gambar 18</b> Algoritma <i>software pvsyst</i> .....	37
<b>Gambar 19</b> Prototipe PLTS <i>sun tracker</i> .....	39
<b>Gambar 20</b> Grafik tegangan 17 Maret 2023 .....	40
<b>Gambar 21</b> Grafik tegangan 18 Maret 2023 .....	40
<b>Gambar 22</b> Grafik tegangan 19 Maret 2023 .....	41
<b>Gambar 23</b> Grafik tegangan 20 Maret 2023 .....	41
<b>Gambar 24</b> Grafik tegangan 21 Maret 2023 .....	42
<b>Gambar 25</b> Grafik tegangan 22 Maret 2023 .....	42
<b>Gambar 26</b> Grafik tegangan 23 Maret 2023 .....	43
<b>Gambar 27</b> Grafik tegangan 24 Maret 2023 .....	44
<b>Gambar 28</b> Grafik tegangan 25 Maret 2023 .....	44
<b>Gambar 29</b> Grafik tegangan 26 Maret 2023 .....	45



<b>Gambar 30</b> Grafik tegangan 27 Maret 2023 .....	45
<b>Gambar 31</b> Grafik tegangan 28 Maret 2023 .....	46
<b>Gambar 32</b> Grafik tegangan 29 Maret 2023 .....	46
<b>Gambar 33</b> Grafik tegangan 30 Maret 2023 .....	47
<b>Gambar 34</b> Grafik tegangan 31 Maret 2023 .....	47
<b>Gambar 35</b> Grafik tegangan 1 April 2023 .....	48
<b>Gambar 36</b> Grafik 17 Maret - 1 April 2023.....	49
<b>Gambar 37</b> Karakteristik penggunaan listrik .....	56
<b>Gambar 38</b> Tampilan awal <i>pvsyst</i> .....	58
<b>Gambar 39</b> <i>Project pvsyst</i> .....	58
<b>Gambar 40</b> Penentuan lokasi data matahari .....	59
<b>Gambar 41</b> Penentuan lokasi berdasarkan map.....	59
<b>Gambar 42</b> Titik kordinat lokasi data matahari .....	60
<b>Gambar 43</b> Data matahari.....	60
<b>Gambar 44</b> Orientasi panel surya .....	61
<b>Gambar 45</b> Pengisian kebutuhan energi listrik.....	62
<b>Gambar 46</b> Pemilihan baterai .....	63
<b>Gambar 47</b> Pemilihan spesifikasi panel surya.....	63
<b>Gambar 48</b> Pengisian data lengkap .....	64
<b>Gambar 49</b> Grafik jalur rotasi matahari.....	64
<b>Gambar 50</b> Baterai.....	66
<b>Gambar 51</b> Hasil simulasi <i>pvsyst</i> Pulau Tiga .....	67
<b>Gambar 52</b> Produksi listrik per kWp/hari.....	68
<b>Gambar 53</b> Rasio performa sistem .....	69
<b>Gambar 54</b> Loss diagram sistem .....	69
<b>Gambar 55</b> Hasil simulasi <i>pvsyst</i> Pulau Ambon.....	70
<b>Gambar 56</b> Produksi listrik per kWp/hari.....	71
<b>Gambar 57</b> Rasio performa sistem .....	72
<b>58</b> Loss diagram sistem.....	72
<b>59</b> Grafik daya .....	74
<b>60</b> <i>Scalling</i> daya 400 kWp.....	75



**Gambar 61** Konfigurasi PLTS 40 kWp ..... 78



## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 1</b> Spesifikasi arduino uno R3 (ALLEGRO microsystems 2020) .....	18
<b>Tabel 2</b> Layout arduino uno R3.....	19
<b>Tabel 3</b> Kelebihan dan kekurangan sumbu ganda dan tunggal .....	25
<b>Tabel 4</b> Kelebihan dan kekurangan sensor cahaya dan tanpa sensor .....	26
<b>Tabel 5</b> Spesifikasi panel surya .....	33
<b>Tabel 6</b> Spesifikasi mikrokontroler .....	33
<b>Tabel 7</b> Spesifikasi sensor arus .....	34
<b>Tabel 8</b> Spesifikasi modul sd card.....	34
<b>Tabel 9</b> Spesifikasi modul real time clock.....	35
<b>Tabel 10</b> Spesifikasi modul liquid crystal display.....	35
<b>Tabel 11</b> Spesifikasi driver motor .....	35
<b>Tabel 12</b> Spesifikasi motor penggerak .....	36
<b>Tabel 13</b> Spesifikasi adaptor power supply .....	36
<b>Tabel 14</b> Konsumsi energi komponen prototipe .....	39
<b>Tabel 15</b> Data konsumsi listrik perhari .....	50
<b>Tabel 16</b> Penggunaan listrik rumah tangga besar .....	50
<b>Tabel 17</b> Penggunaan listrik rumah tangga kecil .....	51
<b>Tabel 18</b> Penggunaan listrik mesjid .....	51
<b>Tabel 19</b> Penggunaan listrik sekolah dasar .....	52
<b>Tabel 20</b> Penggunaan listrik sekolah menengah pertama.....	52
<b>Tabel 21</b> Penggunaan listrik balai desa .....	53
<b>Tabel 22</b> Penggunaan listrik instalasi air bersih .....	53
<b>Tabel 23</b> Penggunaan listrik kios .....	53
<b>Tabel 24</b> Penggunaan listrik penyimpanan ikan.....	54
<b>Tabel 25</b> Rincian perkiraan penggunaan listrik dalam satu hari .....	55
<b>Tabel 26</b> Proyeksi kebutuhan energi hingga 2033 .....	57
Data radiasi matahari.....	65
Spesifikasi baterai.....	66
Perbandingan PVsyst Pulau Tiga dan Pulau Ambon.....	73



**Tabel 30** Perbandingan *software PVsyst* dan Prototipe..... 76

**Tabel 31** Konfigurasi PLTS..... 77



## DAFTAR LAMPIRAN

<b>Lampiran 1</b> Publikasi.....	86
<b>Lampiran 2</b> Perkiraan Kebutuhan Energi.....	95
<b>Lampiran 3</b> Dokumentasi Prototipe PLTS <i>Sun Tracker</i> .....	97
<b>Lampiran 4</b> <i>PVsyst report</i> PLTS 42 kWp .....	99
<b>Lampiran 5</b> <i>PVsyst report</i> PLTS 44 kWp .....	106
<b>Lampiran 6</b> Data prototipe PLTS 17 – 19 Maret 2023.....	113
<b>Lampiran 7</b> Data prototipe PLTS 20 – 22 Maret 2023.....	127
<b>Lampiran 8</b> Data prototipe PLTS 23 – 25 Maret 2023.....	142
<b>Lampiran 9</b> Data prototipe PLTS 26 – 28 Maret 2023.....	156
<b>Lampiran 10</b> Data prototipe PLTS 29 – 31 Maret 2023.....	170
<b>Lampiran 11</b> Data prototipe PLTS 1 April 2023.....	184



## DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

Lambang/singkatan	=	Arti dan keterangan
$L_{ST}$	=	garis bujur
$L_{Loc}$	=	waktu standar meridian
$EoT$	=	persamaan waktu
B	=	perpindahan waktu standar
n	=	hari berjalan dalam tahun
$\delta$	=	sudut deklansi
d	=	hari dalam tahun
$\alpha$	=	sudut ketinggian
$\varphi$	=	ketinggian lokasi peletakan
LST	=	waktu lokal matahari
$P_{med}$	=	nilai tengah daya
$I_{med}$	=	nilai tengah arus
$V_{med}$	=	nilai tengah tegangan
PLTS	=	pembangkit listrik tenaga surya
NZE	=	<i>net zero emission</i>
SAPV	=	<i>stand alone PV</i>
LDR	=	<i>light dependent sensor</i>
$I_{mpp}$	=	arus maksimal
$V_{mpp}$	=	tegangan maksimal
SoC	=	<i>State of Charge</i>



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik menjadi salah satu permasalahan yang harus diperhatikan. Konsumsi listrik di Indonesia bertumbuh dengan pesat dimana pada tahun 2019 konsumsi energi listrik di Indonesia sebesar 289.340.820 MWh dan meningkat menjadi 305.627.280 MWh pada tahun 2021 (Directorate General of Electricity 2022). Pembangkit listrik di Indonesia didominasi oleh pembangkit listrik berbahan bakar fosil sebesar 55,82% dari total kapasitas terpasang 69.039 MW di Indonesia pada tahun 2022 (PT.PLN, 2023). Pembangkit listrik berbahan bakar fosil menjadi penyebab utama emisi karbon dan pencemaran lingkungan termasuk gas rumah kaca dan polusi udara (Islam et al., 2020).

Undang-Undang No.16 Tahun 2016 tentang *Paris Agreement on Climate Change* menargetkan pengurangan 29% emisi gas rumah kaca oleh pemerintah. Sumber energi terbarukan menjadi salah satu solusi untuk mencapai target tersebut. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral di Indonesia menargetkan bauran energi terbarukan sebesar 23% dari total energi yang terpasang di Indonesia pada tahun 2025 hingga mencapai *Net Zero Emission* (NZE) pada tahun 2060 (The Ministry of Energy and Mineral Resources, 2019). Hal tersebut menyebabkan pengurangan penggunaan pembangkit listrik berbahan bakar fosil hingga pada saat NZE tahun 2060 pembangkit listrik berbahan bakar fosil tidak beroperasi lagi.

Panel surya sebagai salah satu energi terbarukan yang dapat mengkonversi cahaya matahari menjadi energi listrik tanpa menghasilkan emisi karbon. Panel surya dapat menjadi salah satu solusi untuk mengurangi emisi karbon dengan potensi radiasi matahari di Indonesia sebesar 4,80 kWh/m<sup>2</sup>/hari, menjadi peluang besar untuk menghasilkan energi listrik (Singh and Banarjee, 2015). Berdasarkan

annya panel surya yang sering digunakan terbagi dua yaitu panel surya statis dan dinamis. Panel surya statis biasanya dipasang berhadapan dengan arah matahari. Panel surya dinamis menggunakan sistem pelacakan matahari yang



memungkinkan panel surya untuk bergerak mengikuti arah gerakan matahari sepanjang hari (Vieira et al., 2016).

Studi pada paper (Vieira et al., 2016) merekam data tegangan dan performa daya panel surya selama 8 hari menggunakan panel surya statis dengan sistem pelacakan satu sumbu. Data yang terkumpul digunakan untuk membandingkan performa antara panel surya statis dan panel surya dinamis dengan sistem pelacakan satu sumbu. Berbeda dengan paper (Vieira et al., 2016), studi ini akan mengumpulkan data tegangan dari panel surya selama 16 hari untuk mengukur tegangan dan jam efektif panel surya di Kota Ambon.

## 1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah berdasarkan latar belakang di atas adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana merancang prototipe panel surya yang dapat mengikuti pergerakan matahari?
2. Bagaimana hasil pengukuran potensi serta jam efektif panel surya?
3. Bagaimana menganalisa pembangkit listrik tenaga surya menggunakan *software PVsyst*?
4. Bagaimana perbandingan hasil perancangan panel surya menggunakan data hasil pengukuran prototipe dengan hasil perancangan *software PVsyst*?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah :

1. Merancang prototipe panel surya yang dapat mengikuti arah pergerakan matahari.
2. Mengetahui daya, tegangan, dan waktu efektif melalui pengukuran langsung menggunakan prorotipe yang telah dibuat.
3. Merancang sistem pembangkit listrik tenaga surya menggunakan *software PVsyst*.

menganalisa perbandingan hasil perancangan panel surya menggunakan data pengukuran langsung dan *software PVsyst*.



## 1.4 Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian ini diharapkan bermanfaat bagi para peneliti, pengembang, pemerintah, maupun para mahasiswa sebagai bahan referensi baik dalam pengembangan serta keilmuan terkait energi terbarukan terkhusus panel surya.

## 1.5 Batasan Masalah

Permasalahan pada penelitian ini dibatasi pada:

1. Pengukuran potensi secara langsung menggunakan prototipe mengambil nilai batas atas daya, tegangan, dan jam efektif dari panel surya.
2. Simulasi perancangan pada *software PVsyst* dilakukan menggunakan skema yang sama dengan perancangan menggunakan data hasil pengukuran prototipe.
3. Penelitian ini berfokus pada perbandingan rancangan sistem PLTS menggunakan *software PVsyst* dengan perhitungan manual berdasarkan data yang dihasilkan prototipe sehingga skema beban yang digunakan bebas sebagai dasar perhitungan.



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Panel Surya dan Prinsip Kerja

Panel surya adalah sebuah alat yang dapat mengkonversi energi dalam bentuk sinar matahari menjadi energi listrik. Panel surya biasanya disebut dengan *photovoltaic* terbuat dari bahan semi-konduktor pada umumnya silikon. Prinsip kerja panel surya yaitu dengan cara mengubah energi foton dari radiasi cahaya matahari menjadi energi listrik. Silikon terdiri atas 2 lapisan PN Junction yang diperoleh dengan cara menyuntikan unsur yang bervalensi 3 pada sisi kiri dan unsur bervalensi 5 pada sisi kanan sehingga pada bagian kiri terbentuk silikon yang tidak murni lagi dan dinamakan Jenis N. Pada silikon murni terdapat dua macam pembawa muatan yang seimbang, muatan positif dinamakan hole dan muatan negatif dinamakan elektron. Didalam batang silikon itu terjadi pertemuan antara bagian P dan bagian N. Bila bagian P dihubungkan dengan kutub positif dari sebuah baterai sedangkan kutub negatif dihubungkan dengan bagian N, maka terjadi hubungan yang dinamakan “Forward Bias”. Dalam keadaan tersebut timbul arus listrik yang disebabkan oleh kedua macam pembawa muatan. Elektron yang bergerak dapat menimbulkan energi listrik. Pergerakan elektron tersebut disebabkan oleh energi matahari yang diterima oleh panel surya (Subandi dan Suyanto, 2020).

#### 2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah kesatuan peralatan yang berfungsi mengubah energi matahari menjadi energi listrik siap pakai. PLTS komponen utama sel surya yang berfungsi mengkonversi tenaga matahari menjadi energi listrik. Panel surya biasanya dibuat dalam sebuah modul terdiri dari sel surya yang biasanya disusun secara seri maupun paralel. Sel surya mulai



populer akhir-akhir ini dikarenakan menipisnya cadangan energi fosil dan isu terkait pemanasan global. Bahan energi utama yang dibutuhkan dalam hal ini energi matahari sangatlah murah serta ramah lingkungan dan didapatkan secara gratis di alam. PLTS adalah salah satu energi terbarukan yang memiliki peran penting dalam memenuhi kebutuhan energi kedepannya dikarenakan penggunaan bahan bakar pada pembangkit-pembangkit konvensional akan terus berkurang dalam jangka waktu yang panjang seperti minyak bumi, gas dan batu bara yang makin menipis. PLTS memiliki fleksibilitas tinggi dalam pemasangannya karena relevan diberbagai tempat seperti perkantoran, pabrik, perumahan dan lainnya (Safitri Rihayat dan Riskina, 2019). Penangkapan maksimal energi matahari sangatlah penting bagi sel surya dimana energi matahari yang akan dikonversi menjadi energi listrik oleh panel surya. Banyak faktor yang dapat mempengaruhi keluaran energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya diantaranya bahan panel surya, cuaca, suhu, orientasi panel serta sudut datang sinar matahari (Al-Rousan Isa and Desa, 2018). Terlepas dari masalah pemeliharaan, penggunaan pelacak matahari aktif dapat memungkinkan pengumpulan dan distribusi energi yang terkontrol dan kompeten sehingga meningkatkan keuntungan efisiensi sistem panel surya hingga 30% dari panel surya statis (Sumathi et al., 2017).

### 2.3 Komponen PLTS

Pembangkit Listrik Tenaga Surya memiliki komponen sebagai berikut :  
(Extension Energy Program, 2009)

1. Modul Surya sebagai jantung dari sistem PLTS yang berfungsi mengkonversikan energi matahari menjadi energi listrik.

Adapun beberapa jenis panel surya sebagai berikut :

- a. Panel surya *monocrystalline* adalah panel surya berbahan dasar silikon tunggal (*mono*) sehingga elektron mempunyai ruang mengalir yang lebih lancar menyebabkan arus listrik yang dihasilkan lebih besar. Oleh karena

itu efisiensi panel surya jenis *monocrystalline* sebesar 15-20% (Kencana, et al. 2018). Biaya produksi panel surya jenis ini lebih tinggi dibandingkan jenis *polycrystalline* dikarenakan menggunakan silikon murni. Warna sel



pada panel surya jenis ini cenderung berwarna gelap dikarenakan terbuat dari silikon murni.



**Gambar 1** Panel surya monocrystalline (Kencana et al., 2018)

- b. Panel surya *Polycrystalline* adalah panel surya yang dibuat dengan bahan dasar multicrystal atau campuran sehingga elektron yang mengalir kurang bebas menyebabkan arus yang dihasilkan lebih rendah. Biaya produksi panel surya jenis ini lebih murah dibandingkan jenis *monocrystalline* dikarenakan menggunakan bahan campuran selain silikon. Warna panel surya jenis ini cenderung berwarna biru dengan efisiensi sebesar 12-16% (Kencana et al., 2018).



**Gambar 2** Panel surya polycrystalline (Kencana et al., 2018)

- c. Panel surya Thin-Film memiliki fisik yang tipis dan fleksibel serta lebih portable dalam pemasangannya dibandingkan dengan *monocrystalline* dan *polycrystalline* serta memiliki bobot yang ringan. Panel surya jenis ini terbuat dari beberapa jenis material yang didominasi oleh *Cadmium Telluride* (CdTe) atau *Copper Indium Gallium Selenida* (CIGS). Panel surya jenis ini memiliki warna hitam dan biru. Panel surya jenis ini biasanya digunakan menyatu pada bagian bangunan seperti jendela atau teras. Panel surya jenis ini memiliki efisiensi sebesar 5-10% (Chopra Paulson and Dutta, 2004).





**Gambar 3** Thin film panel surya (Kencana et al., 2018)

- d. Bifacial Solar Panel adalah jenis solar panel yang konfigurasi fisiknya dibuat transparan dibagian belakang sehingga dapat menyerap sinar matahari dari dua arah yaitu depan dan belakang, panel surya ini menghasilkan listrik yang lebih besar.
2. Rak Pemasangan pada umumnya dipasang pada atap atau tiang sebagai penyangga modul surya, seiring dengan pengaplikasian PLTS rak penyangga juga dipasang pada tanah maupun tembok dari sebuah bangunan. Pada umumnya rak penyangga dapat disesuaikan poisinya. Hingga saat ini terdapat banyak rak penyangga panel surya yang dapat mengikuti arah datangnya sinar matahari dimana dapat meningkatkan energi keluaran hingga 40%.



**Gambar 4** Rak panel surya (Extension Energy Program, 2009)

Kabel berfungsi mengamankan seluruh kabel dari modul surya yang ada di luar, dimana kabel dari setiap modul hubungkan ke dalam kotak kabel



sebagai kotak pengatur dan dipasangkan sekering yang berguna saat terjadi fault dan dilakukan pemeliharaan.

4. Pelindung Petir berfungsi untuk membantu melindungi PLTS dari lonjakan arus yang disebabkan oleh sambaran petir.



**Gambar 5** Penangkal petir (Extension Energy Program, 2009)

5. Alat Ukur dan Instrumentasi berfungsi mengukur energi yang disalurkan dari atau menuju jaringan serta mengukur dan menampilkan kinerja sistem PLTS seperti daya modul, kapasitas baterai, penggunaan daya, dan lain-lain.
6. Inverter berfungsi :
  - Mengubah daya DC yang berasal dari modul PV atau Baterai menjadi daya AC.
  - Menjaga frekuensi siklus daya listrik AC sebesar 60 Hz.
  - Mengurangi fluktuasi tegangan.
  - Menjaga agar gelombang AC sesuai untuk digunakan beban AC.



**Gambar 6** Inverter PLTS (Extension Energy Program, 2009)

7. Saklar Pengaman berfungsi untuk memutuskan listrik untuk keperluan pemeliharaan ataupun saat terjadi kesalahan sistem, dimana saklar pengaman dipasang pada beberapa titik.



8. Baterai berfungsi sebagai penyimpan kelebihan daya yang dihasilkan oleh PLTS.
9. Pengontrol Pengisian Baterai berfungsi untuk menghentikan pengisian baterai pada saat kapasitas baterai sudah penuh agar menghindari kelebihan pengisian yang dapat memperpendek umur baterai.

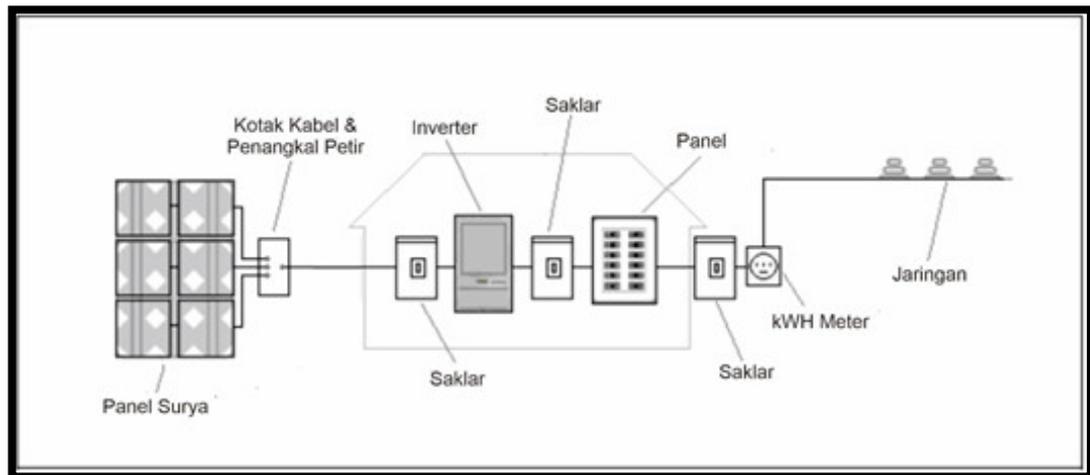
Perancangan PLTS dimulai dengan pengumpulan data untuk mengevaluasi jumlah peralatan yang digunakan pada sebuah bangunan atau peralatan yang akan disuplai listriknya oleh PLTS. Serta melakukan penjadwalan penggunaan peralatan listrik tersebut dari peralatan fleksibel hingga peralatan tetap pakai berdasarkan jam operasinya agar mendapatkan konsumsi energi rata-rata harian yang akan menjadi acuan dasar dalam perancangan PLTS (Akinsipe Moya dan Kaparaju, 2020).

## 2.4 Konfigurasi PLTS

Terdapat tiga jenis PLTS yang sering digunakan yaitu PLTS *off-grid*, PLTS *On-grid*, serta PLTS *Hybrid*. PLTS *off-grid* adalah PLTS yang berdiri sendiri tanpa interkoneksi dengan pembangkit lainnya dimana PLTS jenis ini menggunakan baterai, PLTS *on-grid* adalah PLTS yang interkoneksi dengan jaringan listrik pada daerah tersebut. Pada umumnya PLTS *on-grid* tidak menggunakan baterai. PLTS *hybrid* adalah PLTS yang dikombinasikan dengan pembangkit listrik jenis lainnya seperti PLTA, PLTD, dan sebagainya (Tetra Tech Inc, 2018).

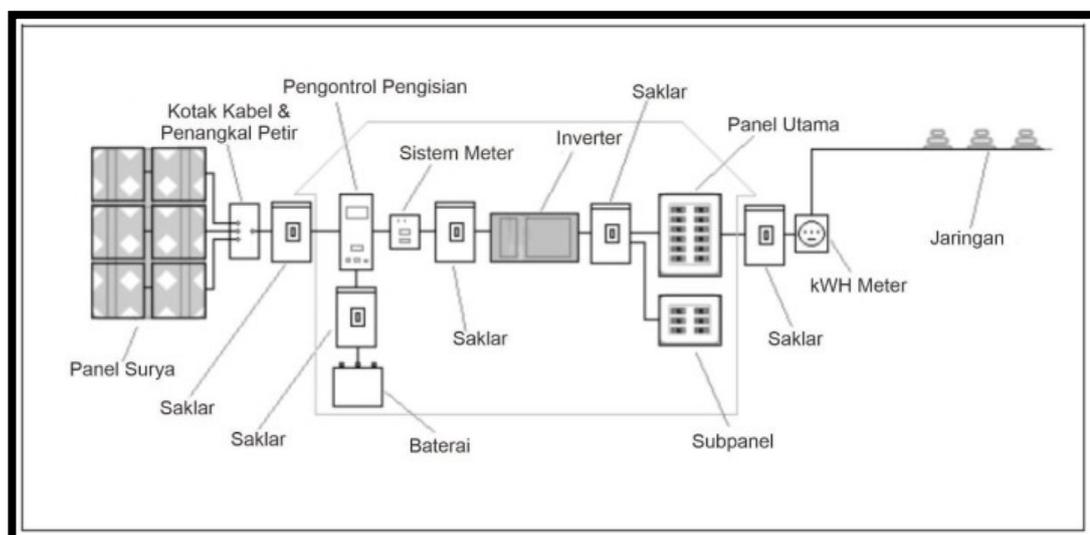
Konfigurasi PLTS menggunakan baterai dan tanpa menggunakan baterai memiliki perbedaan beberapa komponen, antara lain sebagai berikut : (Extension Energy Program, 2009)





**Gambar 7** Konfigurasi PLTS tanpa baterai (Extension Energy Program, 2009)

Pada konfigurasi PLTS tanpa baterai seperti yang diperlihatkan pada **Gambar 7** Panel surya langsung terhubung ke beban melalui inverter dan panel hubung yang mengontrol jalur listrik. Kelebihan daya yang dihasilkan oleh panel surya pada sistem ini akan dialirkan kedalam jaringan listrik, begitupun saat panel surya pada sistem ini mengalami kekurangan daya maka akan disuplai oleh jaringan listrik dengan menggunakan kWh Meter dua arah. Fungsi inverter pada **Gambar 7** yaitu untuk mengubah listrik arus searah (DC) menjadi listrik arus bolak balik (AC).



**Gambar 8** Konfigurasi PLTS baterai (Extension Energy Program, 2009)

Pada sistem PLTS menggunakan baterai seperti yang ditampilkan pada **Gambar 8** daya tidak terpakai yang dihasilkan pada panel surya akan disimpan



kedalam baterai dengan menggunakan pengontrol pengisian untuk mengatur pengisian pada baterai seperti memutus arus listrik ke baterai jika energi dalam baterai sudah penuh. Inverter pada **Gambar 8** berfungsi untuk mengubah arus listrik searah (DC) yang dihasilkan oleh panel surya menjadi arus listrik bolak balik (AC). Konfigurasi ini biasa juga disebut dengan *Stand-Alone PV* jika tidak terhubung dengan jaringan lainnya. *Stand-Alone PV* (SAPV) adalah salah satu metode sistem PLTS yang berdiri sendiri tanpa adanya pembangkit lain yang mempengaruhi sistem. Sistem SAPV mengubah tenaga surya menjadi listrik ke beban tanpa terhubung langsung ke beban dimana sistem ini terhubung ke perangkat penyimpanan dan perangkat penyimpanan meneruskan daya ke beban (Irwan et al., 2015).

## 2.5 Sun Tracking

*Sun Tracking* adalah salah satu metode pelacakan matahari dengan menggunakan motor penggerak panel surya agar posisi panel surya senantiasa tegak lurus terhadap posisi matahari. Pelacakan matahari memiliki ambang batas yang optimal agar proses pelacakan lebih hemat energi. Penggunaan sumbu ganda dalam *sun tracking* tidak selamanya paling optimal, terkadang penggunaan satu sumbu dengan metode pelacakan kutub bisa lebih optimal daripada menggunakan dua sumbu pada penggerakannya. Penggunaan metode *sun tracking* satu sumbu dapat menjadi lebih efisien dikarenakan penggunaan energi listrik yang digunakan untuk menggerakkan matahari lebih sedikit dibandingkan menggunakan dua sumbu kutub dikarenakan menggunakan dua motor penggerak. Penggunaan satu penggerak pada proses *sun tracking* harus dikombinasikan dengan metode pelacakan kutub arah terbit dan terbenamnya matahari guna meningkatkan efisiensi yang dihasilkan panel surya (Achkari et al., 2021). Sistem *Open Loop Sun Tracking* dapat dirancang menggunakan tiga sumbu dengan mikrokontroler seperti Raspberry pi atau Arduino Uno dengan bantuan sensor cahaya atau sensor posisi transversal &

nal. Dengan menggunakan tiga sumbu diketahui kerugian daya akibat  
 angan posisis matahari sebesar  $0,06^\circ$  tegak lurus dengan posisi matahari  
 jadi kerugian daya sebesar kurang dari 1% dan untuk penyimpangan



sebesar  $0,36^\circ$  menyebabkan kerugian daya sebesar 3% (Barbon et al., 2021). Secara eksperimental penerapan pelacak surya berbasis sensor ke panel PV dapat meningkatkan penangkapan energi matahari dibandingkan dengan *sun tracker* tanpa menggunakan sensor (Fathabadi, 2016).

Sistem pelacakan surya melacak posisi matahari dan mempertahankan modul panel surya pada sudut yang menangkap cahaya terbanyak. Perancangan sistem pelacakan surya untuk memperbaiki modul panel surya agar dapat melacak pergerakan matahari melintasi langit untuk menangkap jumlah maksimum sinar matahari. Sistem pelacak harus ditempatkan pada posisi yang dapat menangkap cahaya terbanyak pada sudut terbaik agar memaksimalkan hasil keluaran energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya. (Al-Rousan Isa dan Desa, 2018)

Salah satu parameter terpenting adalah rata-rata radiasi matahari harian yang berkisar antara 4-7 KWh/m<sup>2</sup> di seluruh dunia. *Greenwich Time* dan *Solar Time* adalah parameter dasar dalam bidang energi matahari. *Greenwich Time* adalah waktu yang berdasarkan rotasi bumi di sekitarnya selama 1 hari. Penentuan waktu ini berdasarkan meridian yang melewati kota Greenwich di Inggris yang merupakan salah satu garis bujur yang digunakan sebagai acuan titik penentu waktu dunia. Waktu di semua wilayah dihitung berdasarkan penambahan atau pengurangan terhadap *Greenwich Time*. Parameter waktu matahari merupakan waktu nyata yang dilihat berdasarkan posisi matahari di langit. Waktu matahari dapat dihitung sebagai berikut :

$$\text{Solar Time} = \text{Waktu standar} + 4 (L_{ST} - L_{oc}) + EoT \quad (1)$$

$$L_{Loc} = \text{Zona Waktu} \times 15^\circ \quad (2)$$

$$EoT = 229.2(0.000075 + 0.00186 \cos B - 0.032077 \sin B - 0.014615 \cos 2B - 0.04089 \sin 2B) \quad (3)$$

$$B = \frac{(n - 1) \times 360}{365} \quad (4)$$



Waktu Standar = waktu lokal suatu wilayah  
 = Garis bujur

$L_{Loc}$	= Waktu standar meridian
$EoT$	= Persamaan waktu
B	= Perpindahan waktu standar
n	= hari berjalan dalam tahun

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa sekitar 20-50% lebih banyak energi matahari yang dapat ditangkap dengan menggunakan *sun tracker* tergantung pada lokasi geografis (Fathabadi, 2016).

## 2.6 Sun Tracking Sistem Pasif

*Solar Tracking* sistem pasif menggunakan suhu matahari untuk memanaskan cairan dalam tabung yang terpasang pada modul fotovoltaik. Pemanasan cairan bertujuan untuk menguapkan gasnya. Gas yang diuapkan dapat mendorong cairan yang lebih berat ke salah satu sisi tabung sehingga menggeser beban ke sisi modul panel surya dan menyebabkan tekanan yang menghasilkan putaran atau gerakan. Pada *Zomeworks Track Racks* output yang dihasilkan modul panel surya menggunakan *sun tracker* lebih banyak 25% dibandingkan modul statis panel surya. Pada sistem ini *sun tracking* tidak menggunakan motor penggerak dalam menggerakkan panel surya melainkan hanya menggunakan tabung yang berisi cairan (Al-Rousan Isa dan Desa, 2018). Pelacak pasif lebih sederhana dibandingkan dengan pelacak aktif akan tetapi efisiensi yang dihasilkan tidak sebesar pelacak aktif.

*Sun Tracker* sistem pasif dengan menggunakan tiga jenis gas yaitu pengencer, metanol dan aseton menunjukkan efisiensi daya yang lebih besar pada *Zomework* sebesar 23,33% daripada sistem *Sun tracker* statis (Narendrasinh Parmar dan Gautam, 2015).

*Sun Tracker* sistem pasif menggunakan strip bimetal aluminium / baja yang dikendalikan oleh peredam cairan kental. Dua strip bimetalik yang terdiri atas aluminium dan baja digunakan untuk merancang pelacak surya dan dipasang pada kayu. Metode ini meningkatkan efisiensi sebesar 23,3% (Clifford dan Clifford, 2004).



## 2.7 Sun Tracking Sistem Aktif

*Solar Tracking* sistem aktif adalah sistem pelacakan matahari yang menggunakan pengontrol, roda gigi dan motor penggerak dalam mengarahkan panel surya sehingga tegak lurus terhadap posisi matahari. Ada 4 klasifikasi *Solar Tracking* sistem aktif yaitu panel surya segitga, pelacakan sumbu tunggal, pelacakan sumbu ganda dan sel *spin*. Sistem pelacakan sumbu tunggal adalah pelacak paling sederhana dan termurah namun efektivitasnya rendah karena modul panel surya hanya dapat diarahkan secara horizontal ataupun vertikal. Pada sistem dua sumbu modul panel surya bebas digerakkan secara vertikal maupun horizontal. Pada sistem pelacakan vertikal dibuat dua panel surya yang saling bertolak belakang sehingga kedua modul dapat menerima cahaya. Sistem pelacakan sel *spin* menempatkan panel surya pada bingkai kerucut (Garg et al., 2015).

*Sun Tracker* dibagi menjadi dua jenis yaitu sumbu tunggal dan sumbu ganda. Sumbu tunggal hanya memiliki satu sumbu gerak sehingga hanya dapat melacak matahari dengan satu arah yang merupakan jalur matahari. *Sun Tracker* sumbu ganda memiliki dua sumbu gerak sehingga lebih leluasa dalam mengarahkan posisi panel surya dan dapat melacak matahari dalam dua arah yaitu pergerakan matahari harian dan musiman. Pada sistem tunggal dapat meningkatkan daya keluaran modul panel surya hingga 20% dan untuk sistem ganda memiliki efisiensi yang lebih tinggi hingga 33% dibandingkan panel surya statis (Fathabadi, 2016).

Penggolongan *Sun Tracker* diklasifikasikan menjadi dua jenis yaitu menggunakan sensor dan tanpa menggunakan sensor. *Sun Tracker* berbasis sensor memiliki algoritma loop tertutup dimana sensor cahaya digunakan untuk memberikan sinyal umpan balik yang sesuai untuk melacak matahari menggunakan sistem kontrol. Sudut posisi matahari yang benar yang diperoleh sensor digunakan untuk dasar arah gerakan panel surya sehingga mengarah tepat tegak lurus terhadap matahari. (Fathabadi, 2016). *Sun Tracker* yang menggunakan dua sensor *light dependent resistor* (LDR) untuk memberikan sinyal umpan balik terhadap sudut n yang benar sehingga tegak lurus terhadap matahari.



*Sun Tracker* tanpa sensor pelacak menggunakan motor stepper 1 yang disambungkan ke gearbox azimuth yang akan memutar modul panel surya. sudut deklinasi dapat dihitung pada persamaan (5).

$$\delta = \sin^{-1} \left( \sin(23,45^\circ) \sin \left( \frac{360}{365} (d - 81) \right) \right) \quad (5)$$

Keterangan :

$\delta$  = Sudut deklinasi

$d$  = Hari dalam tahun (1 Januari sebagai  $d=1$ )

Perhitungan sudut ketinggian menggunakan persamaan (6).

$$\alpha = \sin^{-1} \left( \sin(\delta) \sin(\varphi) + \cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(15^\circ(LST - 12)) \right) \quad (6)$$

Keterangan :

$\alpha$  = Sudut inklinasi

$\varphi$  = Garis lintang

LST = Waktu matahari puncak

Contoh perhitungan sudut deklinasi dan inklinasi pada tanggal 4 Juni 2023 (hari ke-154) lokasi Kebun Cengkeh, Ambon dengan titik koordinat  $-3,679455^\circ$  LS,  $128,196166^\circ$ BB dimana waktu matahari puncak berada pada jam 13.00 WIT dapat dilihat sebagai berikut:

$$\delta = \sin^{-1} \left( \sin(23,45^\circ) \sin \left( \frac{360}{365} (154 - 81) \right) \right) = 21,7^\circ \quad (7)$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left( \sin(21,7) \sin(-3,679) + \cos(21,7) \cos(-3,679) \cos(15^\circ(13 - 12)) \right) = 58,2^\circ \quad (8)$$

Sehingga didapatkan sudut deklinasi ( $\delta$ ) sebesar  $21,7^\circ$  dan sudut inklinasi ( $\alpha$ ) sebesar  $58,2^\circ$  pada lokasi tersebut.

## 2.8 Sistem Loop Terbuka dan Tertutup

Sistem loop terbuka dan tertutup dapat digunakan dalam algoritma pelacakan

Penggunaan loop tertutup lebih baik daripada loop terbuka dikarenakan meminimalisir kesalahan. Sistem pelacakan matahari loop tertutup dapat menggunakan sensor, dimana sensor ini dapat membaca posisi matahari sepanjang



hari. Posisi matahari yang dibaca oleh sensor dimasukkan dalam persamaan matematika untuk membuat perhitungan. Hasil perhitungan tersebut digunakan sebagai arah gerakan motor selanjutnya. Sedangkan untuk sistem loop terbuka menggunakan motor atau aktuator sebagai perangkat kontrol untuk mengikuti matahari berdasarkan persamaan matematika. Sistem ini menggunakan kontrol berdasarkan algoritma tanggal dan waktu tanpa menggunakan sensor dan informasi umpan balik dalam mengevaluasi hasil atau tindakan pelacakan. Sistem loop terbuka lebih sederhana dan lebih murah dibandingkan dengan sistem loop tertutup (Al-Rousan Isa dan Desa, 2018).

Perancangan dan pengimplementasian sistem pelacakan loop terbuka dapat menggunakan empat sensor LDR yang membaca cahaya. LDR digunakan untuk menentukan posisi dan arah panel surya. Perbedaan antara sinyal arus yang diukur oleh LDR di setiap kelompok digunakan untuk memicu pergerakan motor DC. Pengujian panel statis dan panel dinamis menggunakan sistem *sun tracker* selama beberapa hari dengan cuaca cerah mendapatkan hasil energi keluaran panel surya menggunakan *sun tracker* lebih besar 27% daripada panel surya statis (Seme et al., 2017).

## 2.9 Mikrokontroler

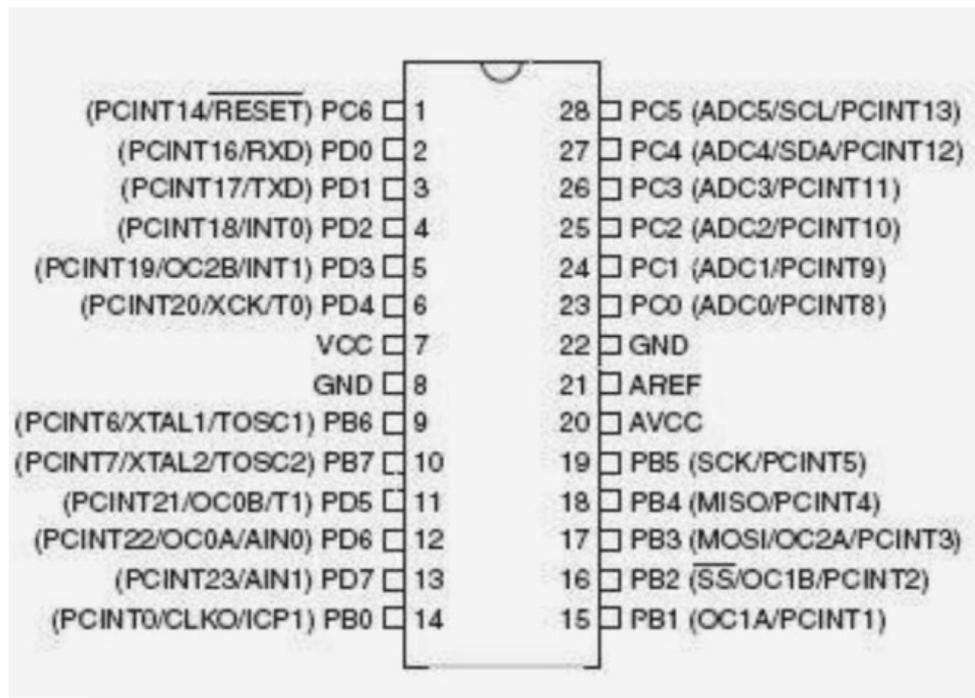
Mikrokontroler adalah sebuah *chip* yang berfungsi sebagai pengontrol rangkaian elektronik. Mikroprosesor dapat digunakan dalam mengontrol pelacakan matahari dengan menggunakan algoritma dan persamaan untuk menentukan posisi matahari ataupun menggunakan sensor dalam penentuan posisi matahari. Mikroprosesor berperan sebagai otak dalam pelacakan matahari dengan mengikuti algoritma yang menggunakan informasi dan parameter dalam menganalisa dan mengidentifikasi pergerakan yang sesuai (Roth Georgiev dan Boudinov, 2014).

Mikrokontroler dibagi menjadi dua mode dalam pelacakan sinar matahari yaitu mode jam dan mode matahari. Mode jam menghitung posisi matahari jam dan memodifikasi algoritma berdasarkan perhitungan waktu. Mode matahari menggunakan sensor cahaya untuk membaca posisi matahari kemudian dengan algoritma sensor mengirimkan sinyal kepada mikrokontroler



sebagai dasar motor servo untuk menggerakkan panel surya (Al-Rousan Isa dan Desa, 2018).

ATMega328 merupakan mikrokontroler keluarga AVR 8 bit. Beberapa tipe mikrokontroler yang sama dengan ATMega328P antara lain ATMega8538, ATMega16, ATMega32, ATMega328, yang membedakan antara mikrokontroler lain adalah ukuran memori. Banyaknya GPIO (pin *input/output*), *peripheral* (USART, *timer*, *counter*, dll). Dari segi ukuran fisik, ATMega328 memiliki ukuran fisik lebih kecil dibandingkan dengan beberapa mikrokontroler di atas, namun untuk segi memori dan *peripheral* lainnya ATMega328P tidak kalah dengan yang lainnya karena ukuran memori dan *peripheral* relatif sama dengan ATMega8538 dan ATMega32, hanya saja jumlah GPIO yang lebih sedikit dibandingkan mikrokontroler lainnya. Mikrokontroler ini memiliki EEPROM sebesar 1 Kb sebagai tempat penyimpanan data semi permanen, SRAM 2 Kb, I/O sebanyak 14 pin, 32 x 8 bit register, clock 16 MHz, memori *flash* 32 Kb serta 130 macam instruksi yang hampir semuanya dieksekusi dalam satu siklus *clock*.



**Gambar 9** Pin ATMEGA328P

328 memiliki 3 buah PORT utama yaitu PORTB, PORTC dan PORTD total pin *input/output* sebanyak 23 pin seperti yang diperlihatkan pada



**Gambar 9.** PORT tersebut dapat difungsikan sebagai *input/output* digital atau difungsikan sebagai kegunaan lainnya.

Arduino Uno R3 adalah papan pengembangan mikrokontroler dengan berbasis *chip* ATmega328P. Arduino Uno memiliki 14 digital pin *input/output* (atau biasa ditulis I/O), dimana 14 pin diantaranya dapat digunakan sebagai *output* PWM antara lain pin 0 sampai 13), 6 pin *input* analog, menggunakan *crystal* 16 MHz pada pin A0 hingga A5, koneksi USB, *jack* listrik, *header* ICSP dan tombol reset. Hal tersebut adalah semua yang diperlukan untuk mendukung sebuah rangkaian mikrokontroler. Spesifikasi Arduino Uno R3 dapat dilihat pada **Tabel 1**.

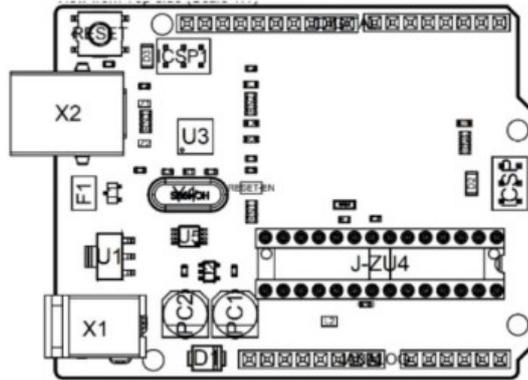
**Tabel 1** Spesifikasi arduino uno R3 (ALLEGRO microsystems 2020)

Mikrokontroler	ATmega328
Tegangan Operasi	5 Volt
Tegangan Input	7 – 12 Volt
Pin I/O Digital	14
Pin Analog	6
Arus DC tiap pina I/O	50 mA
Arus DC ketika 3.3V	50 mA
<i>Memory Flash</i>	32 kb
SRAM	2 kb
EEPROM	1 kb
Kecepatan <i>Clock</i>	16 Mhz

**Gambar 10** memperlihatkan layout fisik dari Arduino Uno R3 yang memiliki total pin sebanyak 32 yang terletak berjejer pada bagian atas dan bagian bawah dari papan arduino. Terdapat slot USB pada bagian kiri papan arduino yang berfungsi untuk melakukan transfer data antara arduino dengan laptop atau komputer. Pada sudut kiri bawah terdapat port daya listrik searah (DC) dengan tegangan antara 7

1 – 12V.





**Gambar 10** Layout arduino uno R3

**Tabel 2** menjelaskan nama nama komponen Layout arduino uno pada **Gambar 10** dimana X1 untuk menyuplai listrik pada arduino, X2 sebagai port USB transfer data, PC1 dan PC2 adalah kapasitor yang berfungsi mengatur frekuensi. D1 atau rectifier berfungsi sebagai penyearah gelombang, J-ZU4 adalah prosesor berfungsi sebagai otak dari arduino uno. Y1 atau osilator berfungsi sebagai jantung mikrokontroler. U1 atau regulator berfungsi mengatur tegangan pada arduino serta menstabilkan tegangan. ICSP atau pin header konektor arduino.

**Tabel 2** Layout arduino uno R3

Ref.	Deskripsi	Ref.	Deskripsi
X1	Jack Listrik 2.1x5.5 mm	U1	Regulator SPX1117M3-L-5
X2	Konektor USB B	U3	Modul ATMEGA16U2
PC1	Kapasitor EEE-1EA470WP 25V SMD	U5	LMV358LIST-A.9 IC
PC2	Kapasitor EEE-1EA470WP 25V SMD	F1	Chip Kapasitor
D1	Rectifier CGRA4007-G	ICSP	Pin header konektor
J-ZU4	Modul ATMEGA328P	ICSP1	Pin header konektor
Y1	Osilator ECS-160-20-4X-DU		



## 2.10 Software PVsyst

PVsyst adalah perangkat lunak simulasi yang biasa digunakan untuk pembelajaran, pengukuran serta analisis data sistem PLTS dimana aplikasi ini dikembangkan oleh Universitas Genewa yang terbagi ke dalam sistem jaringan interkoneksi, sistem berdiri sendiri serta sistem pompa. *Software* ini dilengkapi dengan *database* meteorologi serta komponen-komponen PLTS. *Software* ini dianggap sebagai salah satu perangkat lunak simulasi standar. *Software* ini dapat melakukan studi rinci dan eksplisit pada berbagai parameter yang mempengaruhi efisiensi sistem serta mampu untuk melakukan estimasi berkala (Shrivastava et al., 2021).

*Software* ini dapat merancang sistem serta menghitung jumlah energi yang dihasilkan. Keluaran yang dihasilkan perangkat lunak ini didasarkan pada simulasi dengan basis data geografis sebuah PV. Hasil dapat dilihat dalam beberapa variabel simulasi yang dapat ditampilkan dalam nilai bulanan, harian serta setiap jam (Kumar et al., 2020).

Simulasi *PVsyst* dapat dilakukan dalam langkah-langkah sebagai berikut :

1. Merancang proyek dengan menggunakan data file meteorologi yang sudah tersedia pada *database PVsyst* dengan menentukan lokasi yang akan dilakukan penelitian.
2. Melakukan pembuatan orientasi modul, konfigurasi sistem serta parameter kerugian ditentukan kemudian dimasukkan kedalam perangkat lunak.
3. Menjalankan simulasi dengan melihat hasil grafik dan laporan serta menganalisa hasil program.



### 2.11 Penelitian Terkait

Judul	Tahun	Tujuan	Metode	Hasil Penelitian
<i>Design and simulation of standalone solar PV sistem using PVsyst software</i>	2020	Studi ini melihat kebutuhan beban departemen mesin dengan merancang sistem PV offgrid.	Merancang sistem PV menggunakan aplikasi <i>PVsyst</i> dengan melihat rasio kinerja serta kerugian. Dengan kebutuhan energi sebesar 1086,24 kWh dan energi yang tersedia pada panel surya sebesar 1143,6 kWh.	Analisis rasio kinerja memperlihatkan bahwa rasio performa tertinggi tercatat pada bulan Desember sebesar 86% sedangkan rasio performa terendah sebesar 64% diperoleh pada bulan April. Rasio performa rata-rata selama setahun yaitu 72,8%
<i>Design and economic analysis of an off-grid solar PV in Jos-Nigeria</i>	2020	Penelitian ini mencoba melihat kelayakan sistem produksi listrik menggunakan pembangkit listrik tenaga surya <i>off-grid</i> di Jos Nigeria untuk mendorong konsumsi listrik	Penelitian ini mengadopsi metode pemodelan matematika dalam perancangan dan analisa seluruh sistem PV guna mendorong konsumsi daya rumah tangga dengan data radiasi matahari pada	Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa 10 modul <i>PV MLE275HD2</i> masing-masing 275 Wp menggunakan 5 baterai 100 Ah dapat memenuhi konsumsi listrik tahunan sekitar 3132 kWh pada lokasi tersebut.



		pada bangunan tempat tinggal di Jos Nigeria.	daerah tersebut antara 3,5 – 7,0 kWh/m <sup>2</sup> /hari dan waktu rata rata radiasi matahari sebesar 6,5 jam.	
<i>Control algorithms applied to active solar tracking systems</i>	2020	Pemusatan tenaga surya memerlukan akurasi tinggi untuk mencapai efisiensi yang lebih besar maka dari itu diperlukannya akurasi penerimaan cahaya matahari terhadap panel surya agar listrik yang dihasilkan maksimal	Penerapan <i>algoritme control</i> pada sistem pelacakan panel surya dimana memanipulasi sinyal listrik ke aktuator sebagai pelacakan matahari yang akurat dan presisi dengan konsumsi energi yang seminimal mungkin. Menggunakan algoritma <i>open loop, close loop</i> serta <i>hybrid loop</i> .	Strategi kontrol pada penelitian ini menghasilkan efisiensi terbaik pada algoritma <i>close loop</i> dengan efisiensi sebesar 54,3%. dikarenakan terdapatnya umpan balik antara respon sensor terhadap matahari yang mengirimkan sinyal untuk pergerakan motor.
<i>Designing of a 2 kW one PV System in Bangladesh Using</i>	2015	Penelitian ini membuat perancangan sistem PLTS	Metode perancangan dibuat menggunakan <i>Software PVsyst</i> berlokasi di	Perancangan sistem lebih baik menggunakan <i>Software PVsyst</i> . <i>Homer</i> lebih baik jika digunakan



<i>PVsyst, Homer and SolarMAT</i>		<i>stand-alone</i> berkapasitas 2 kW berlokasi di Bangladesh	Bangladesh menggunakan tegangan sistem 48 V. Selanjutnya melakukan optimasi dan analisa menggunakan <i>Homer</i> dan <i>SolarMAT</i>	untuk optimasi serta analisa sensitivitas dan analisis ekonomi. Rancangan sistem pada <i>SolarMAT</i> sangatlah sederhana akan tetapi <i>software</i> tersebut gratis.
<i>Design, Sizing and Performance Analysis of Stand-Alone PV System using PVsyst Software for a Location in Egypt</i>	2019	Penelitian ini merancang sistem PLTS <i>stand-alone</i> untuk salah satu peternakan di Mesir.	Perancangan sistem PLTS menggunakan <i>software PVsyst</i> dengan perkiraan konsumsi energi harian sebesar 24.676 Wh/hari. Sistem yang dirancang menggunakan tegangan 48 V dan rata-rata radiasi matahari pada lokasi tersebut 6.2 kWh/m <sup>2</sup> /day	Hasil perancangan menggunakan <i>PVsyst</i> menggunakan 2 sistem yaitu 48 VDC dan 220 VAC dengan 2 jenis panel surya yaitu 450 W 13 panel dan 260 W 22 panel. Luas area yang dibutuhkan sebesar 50,7 m <sup>2</sup> dan 55,02 m <sup>2</sup> . Jumlah baterai yang dibutuhkan sebanyak 32 baterai.



Penelitian yang dilakukan yaitu membandingkan perancangan sistem PLTS manual berbasis data prototipe dengan perancangan menggunakan *software PVsyst*. Banyak penelitian terkait (Clifford dan Eastwood, 2004; Fathabadi, 2016; Garg et al., 2015) yang berfokus pada efisiensi dari sebuah *Sun Tracker* salah satunya membandingkan antara panel surya statis dengan panel surya dinamis menggunakan *sun tracker* dan efisiensi lebih besar dihasilkan oleh panel surya dinamis menggunakan *sun tracker* (Fathabadi, 2016; Garg et al., 2015; Achkari et al., 2021). Banyak penelitian terkait (Barbon et al., 2021; Seme et al., 2017; Sumathi et al., 2017; Garg et al., 2015) yang membahas terkait jumlah sumbu pada pergerakan pelacakan matahari dimana dapat menggunakan satu, dua hingga tiga sumbu. Penggunaan dua sumbu berfokus pada pergerakan matahari harian dan musiman (Al-Rousan Isa dan Desa, 2018) sedangkan penggunaan satu sumbu hanya berfokus pada pergerakan matahari harian dengan peletakan alur pergerakan sumbu sesuai dengan arah pergerakan matahari harian. Adapun kelebihan dan kekurangan sumbu ganda dan sumbu tunggal seperti yang diperlihatkan pada **Tabel 3**.



**Tabel 3** Kelebihan dan kekurangan sumbu ganda dan tunggal

	Sumbu Ganda	Sumbu Tunggal
Kelebihan	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Memiliki efisiensi yang lebih besar</li> <li>- Lebih fleksibel dalam mengikuti pergerakan matahari</li> <li>- Fleksibel dalam posisi peletakan <i>sun tracker</i></li> <li>- Fleksibel digunakan pada seluruh wilayah dan kondisi geografis berbeda</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Biaya pembuatan yang lebih murah</li> <li>- Konstruksi lebih sederhana</li> <li>- Algoritma serta program yang lebih sederhana</li> </ul>
Kekurangan	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Konstruksi yang lebih rumit</li> <li>- Algoritma serta program yang lebih rumit</li> <li>- Biaya pembuatan lebih mahal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fleksibilitas kurang dalam mengikuti pergerakan matahari</li> <li>- Tidak dapat digunakan di seluruh wilayah yang berbeda dengan rancangan yang sama</li> <li>- Peletakan <i>sun tracker</i> harus disesuaikan dengan program agar dapat selalu tegak lurus dengan cahaya matahari</li> <li>- Hanya dapat mengikuti pergerakan harian matahari</li> </ul>

Prototipe *sun tracker* yang dibuat pada penelitian ini menggunakan satu sumbu dikarenakan lebih sederhana baik dalam pembuatannya maupun biaya serta pengukuran dilakukan dalam waktu 16 hari. Kekurangan pada *sun tracker* sumbu tunggal diatasi dengan meletakkan prototipe sejajar dengan garis pergerakan sinar matahari sehingga arah datang sinar matahari selalu tegak lurus dengan permukaan panel surya. Prototipe yang dirancang menggunakan algoritma waktu tanpa sensor dikarenakan jika menggunakan sensor cahaya maka pada saat intensitas cahaya kurang panel surya tidak akan bergerak, akan tetapi pada penelitian ini berfokus mengukur potensi matahari maka dari itu diharapkan panel surya terus bergerak di arah matahari walaupun dalam kondisi intensitas cahaya kurang. Kelebihan dan kelemahan *sun tracker* menggunakan sensor cahaya dan sensor sebagai berikut:



**Tabel 4** Kelebihan dan kekurangan sensor cahaya dan tanpa sensor

	Sensor Cahaya	Tanpa Sensor
Kelebihan	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dapat mengikuti pergerakan matahari lebih fleksibel</li> <li>- Penggunaan daya motor yang lebih hemat</li> <li>- Efisiensi lebih tinggi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pembuatan lebih mudah</li> <li>- Biaya produksi lebih murah</li> <li>- Algoritma lebih sederhana</li> </ul>
Kekurangan	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Biaya produksi lebih mahal</li> <li>- Algoritma lebih kompleks</li> <li>- Pembuatan lebih kompleks</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalibrasi setiap peletakan pada daerah yang berbeda</li> <li>- Penggunaan daya motor yang lebih tinggi</li> <li>- Efisiensi lebih rendah</li> </ul>

Banyak penelitian terkait pengukuran potensi PLTS (Khatab dan Spea, 2019) (Shrivastava et al., 2021; Kumar et al., 2020) pada sebuah wilayah yang menggunakan *software* salah satunya yaitu *software PVsyst*. Perancangan sistem PLTS lebih baik menggunakan *software PVsyst* dibandingkan *Homer* dan *SolarMAT* (Morshed et al., 2015). Penelitian ini bertujuan melihat perbandingan antara *software PVsyst* dan pengukuran potensi secara langsung menggunakan prototipe. Penelitian ini membuat prototipe yang dapat merekam tegangan dan arus pada wilayah tertentu yang menghasilkan data *real* sebagai dasar landasan dalam perencanaan pembuatan PLTS. Penggunaan sensor arus dan tegangan serta *SD Card* untuk perekaman data potensi daya dapat dilakukan secara mandiri oleh prototipe tersebut. Setelah waktu pengukuran tercapai data tersimpan pada *SD Card* yang disematkan pada prototipe. Hasil potensi yang didapatkan digunakan untuk merancang sistem PLTS dengan skema beban yang diambil dari salah satu daerah sampel di Provinsi Maluku. Hasil perancangan sistem PLTS yang didapatkan kemudian dibandingkan dengan sistem PLTS menggunakan *software PVsyst* dengan skema kebutuhan listrik yang sama.

