



**DESAIN DAN PENILAIAN *BUILDING ATTACH*  
*PHOTOVOLTAIC SYSTEM* BERBASIS FUZZY-AHP SEBAGAI  
TEKNIK OPTIMASI**

**(Studi Kasus: Gedung-gedung Teknik Elektro UNNES)**

**SKRIPSI**

**diajukan sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar  
Sarjana Pendidikan Program Studi Pendidikan Teknik Elektro**

**Oleh**

**Mega Ardisa Hapsari**

**NIM.5301415017**

**PROGRAM STUDI PENDIDIKAN TEKNIK ELEKTRO  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG  
2019**



**DESAIN DAN PENILAIAN *BUILDING ATTACH*  
*PHOTOVOLTAIC SYSTEM* BERBASIS FUZZY-AHP SEBAGAI  
TEKNIK OPTIMASI**

**(Studi Kasus: Gedung-gedung Teknik Elektro UNNES)**

**SKRIPSI**

**diajukan sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar  
Sarjana Pendidikan Program Studi Pendidikan Teknik Elektro**

**Oleh**

**Mega Ardisa Hapsari**

**NIM.5301415017**

**PROGRAM STUDI PENDIDIKAN TEKNIK ELEKTRO  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG  
2019**

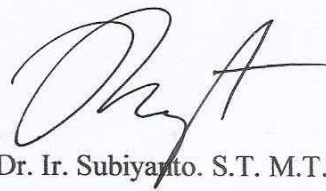
## PERSETUJUAN PEMBIMBING

Nama : Mega Ardisa Hapsari  
NIM : 5301415017  
Program Studi : Pendidikan Teknik Elektro, S1  
Judul : Desain dan Penilaian *Building Attach Photovoltaic System*  
Berbasis Fuzzy-AHP sebagai Teknik Optimasi

Skripsi ini telah disetujui oleh pembimbing untuk diajukan ke sidang panitia ujian skripsi Program Studi Pendidikan Teknik Elektro S1, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang.

Semarang, 13 September 2019

Pembimbing



Dr. Ir. Subiyanto. S.T. M.T.

NIP. 197411232005011001

## PENGESAHAN

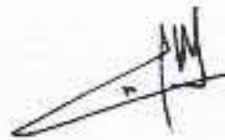
Skripsi dengan judul "Desain dan Penilaian *Building Attach Photovoltaic System* Berbasis Fuzzy-AHP sebagai Teknik Optimasi" telah dipertahankan di depan sidang Panitia Ujian Skripsi Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang pada tanggal 25 bulan September tahun 2019.

Oleh:

Nama : Mega Ardisa Hapsari  
NIM : 5301415017  
Program Studi : Pendidikan Teknik Elektro SI

Panitia

Ketua



Dr. Agus Suryanto, M.T.  
NIP. 196708181992031004

Penguji 1



Dr. Djoko Adi Widodo, M.T.  
NIP. 195909271986011001

Penguji 2



Dr. Sutarno, M.T.  
NIP. 195510051984031001

Penguji 3/Pembimbing



Dr. Ir. Subiyanto, S.T., M.T.  
NIP. 197411232005011001

Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang



Dr. Nur Qudus M.T.  
NIP. 196811301994031001

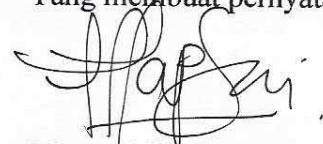
## PERNYATAAN KEASLIAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa:

1. Skripsi ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik (Sarjana, Magister, dan/atau Doktor), baik di Universitas Negeri Semarang (UNNES) maupun di perguruan tinggi lain.
2. Skripsi ini adalah murni gagasan, rumusan, dan penelitian saya sendiri tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan dari Pembimbing dan masukan Tim Penguji.
3. Dalam skripsi ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah diperoleh karena skripsi ini serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi ini.

Semarang,

Yang membuat pernyataan



Mega Ardisa Hapsari

NIM.5301415017

## MOTTO DAN PERSEMBAHAN

### **Motto:**

- *Be stubborn about your goals, but flexible about your methods.*

### **Persembahan:**

Alhamdulillah atas Rahmat dan Ridho Allah SWT skripsi ini dapat terselesaikan dan saya persembahkan untuk:

1. Diri saya sendiri.
2. Ibu yang selalu mendukung dan mendoakan saya.
3. Seluruh anggota *Unnes Electrical Engineering Student Research Group* (UEESRG).
4. Seluruh teman-teman PTE Angkatan 2015.

## RINGKASAN

Mega Ardisa Hapsari. 2019. **Desain dan Penilaian *Building Attach Photovoltaic System* Berbasis Fuzzy-AHP sebagai Teknik Optimasi**. Dr. Ir. Subiyanto, S.T., M.T. Pendidikan Teknik Elektro S1, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang.

*Building Attach Photovoltaic System* (BAPV) telah menjadi alternatif pemanfaatan sistem fotovoltaik di area kampus. Kelayakan implementasi sistem BAPV ditinjau dari faktor teknis, dan ekonomi. Beberapa algoritma telah dikembangkan untuk merencanakan sistem BAPV. Namun penelitian tentang algoritma optimasi dalam perencanaan sistem BAPV di area kampus dengan mempertimbangkan penilaian tekno-ekonomi belum diinvestigasi lebih jauh. Oleh karena itu, kombinasi teori Fuzzy dengan *Analytical Hierarchy Process* (Fuzzy-AHP) digunakan sebagai teknik optimasi untuk memilih desain sistem BAPV yang cocok dan optimal di area kampus dengan mempertimbangkan penilaian tekno-ekonomi.

Lima alternatif desain sistem BAPV terkoneksi dengan *grid* dan *battery energy storage* (BESS) dirancang menggunakan lima jenis modul surya yang berbeda, yaitu *mono-crystalline* (m-Si), *poly-crystalline* (p-Si), *heterojunction* (HIT), *cadmium tellurium* (CdTe), dan *copper indium selenide* (CIS). Alternatif desain dinilai secara komprehensif oleh para ahli dibidang perencanaan sistem BAPV melalui kuesioner dengan model perbandingan berpasangan. Fuzzy-AHP digunakan untuk mempertimbangkan penilaian kualitatif dan kuantitatif dari para ahli. Penilaian ditinjau dari perspektif *sizing system*, teknis, ekonomis, dan lingkungan sebagai kriteria. Keempat perspektif tersebut dibagi menjadi 13 sub-kriteria sebagai acuan penilaian desain sistem BAPV.

Hasil penelitian menunjukkan tingkat kepentingan dari kriteria berdasarkan Fuzzy-AHP sebagai berikut: teknis > ekonomis > lingkungan > *sizing system*. Berdasarkan penilaian kriteria dan sub-kriteria, desain sistem dengan *mono-crystalline* menjadi desain paling optimal dan desain dengan *poly-crystalline* dinilai kurang optimal untuk sistem BAPV terkoneksi dengan *grid* dan BESS dalam studi kasus ini. Kelayakan sistem BAPV terpilih dianalisis berdasarkan tarif *grid feed-in*. Sistem BAPV dengan harga jual listrik sebesar Rp 840/kW<sub>H</sub> dinilai kurang layak untuk diimplementasikan, karena tidak mampu mengimbangi biaya investasi awal yang tinggi. Kenaikan harga jual listrik sebesar Rp 2.040/kW<sub>H</sub> untuk skenario-1 dan Rp 1.640/kW<sub>H</sub> untuk skenario-2 akan membuat sistem BAPV layak diimplementasikan.

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, Fuzzy-AHP telah berhasil memberikan pilihan desain sistem BAPV teroptimal untuk diimplementasikan di area kampus negara tropis. Namun untuk implementasi di lokasi studi kasus, diperlukan kenaikan harga jual listrik ke PLN untuk menutupi biaya investasi sistem BAPV.

Kata Kunci: Desain BAPV, Fuzzy-AHP, Tekno-ekonomi.

## PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT yang selalu melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Desain dan Penilaian *Building Attach Photovoltaic System* Berbasis Fuzzy-AHP sebagai Teknik Optimasi”**. Skripsi ini disusun sebagai salah satu persyaratan meraih gelar Sarjana Pendidikan pada Program Studi Pendidikan Teknik Elektro S1.

Penyelesaian skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis sampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Fathur Rokhman, M.Hum. selaku Rektor Universitas Negeri Semarang.
2. Dr. Nur Qudus, M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik dan Ir. Ulfah Mediaty Arief, M.T., IPM. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro.
3. Dr. Ir. Subiyanto, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan bimbingan, dan motivasi dalam penyusunan skripsi ini.
4. Tim dosen penguji yang telah memberikan masukan yang sangat berharga berupa saran, perbaikan, pertanyaan, komentar, maupun tanggapan untuk menambah bobot kualitas skripsi ini.
5. Seluruh dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik UNNES yang telah memberi bekal ilmu dan pengetahuan.
6. Seluruh anggota UNNES *Electrical Engineering Student Research Group* (UEESRG) yang selalu membantu dan menjadi wadah berdiskusi.
7. Serta berbagai pihak yang telah memberikan bantuan dan dukungan yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Harapan penulis, skripsi ini dapat memberikan kontribusi ilmu dan manfaat bagi seluruh pembaca.

Semarang, 13 September 2018

Penulis

Mega Ardisa Hapsari



## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>Halaman Judul</b> .....	<b>i</b>
<b>Persetujuan Pembimbing</b> .....	<b>ii</b>
<b>Pengesahan</b> .....	<b>iii</b>
<b>Pernyataan Keaslian</b> .....	<b>iv</b>
<b>Motto dan Persembahan</b> .....	<b>v</b>
<b>Ringkasan</b> .....	<b>vi</b>
<b>Prakata</b> .....	<b>vii</b>
<b>Daftar Isi</b> .....	<b>viii</b>
<b>Daftar Tabel</b> .....	<b>x</b>
<b>Daftar Gambar</b> .....	<b>xii</b>
<b>Bab I. Pendahuluan</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Identifikasi Masalah .....	3
1.3 Perumusan Masalah .....	4
1.4 Tujuan Penelitian .....	5
1.5 Pembatasan Masalah .....	5
1.6 Manfaat Penelitian .....	6
<b>Bab II. Kajian Pustaka dan Landasan Teori</b> .....	<b>8</b>
2.1 Kajian Pustaka .....	8
2.2 Potensi Energi Matahari Sebagai Energi Bersih .....	9
2.3 Teknologi <i>Solar Photovoltaic</i> .....	10
2.3.1 Sel Fotovoltaik .....	10
2.3.2 Kinerja Sel Fotovoltaik .....	11
2.3.3 Jenis Sel Fotovoltaik .....	14
2.3.4 Modul Surya .....	15
2.3.5 Inverter .....	16
2.3.6 Baterai .....	17
2.4 <i>Building Attached Photovoltaic System</i> Terkoneksi <i>Grid</i> dan Baterai .....	17
2.4.1 Penentuan Lokasi .....	18
2.4.2 Orientasi Modul Surya .....	18
2.4.3 <i>Sizing</i> Modul Surya .....	19
2.4.4 <i>Sizing</i> Inverter .....	19
2.4.5 <i>Sizing</i> Baterai .....	20
2.5 Parameter Penilaian Sistem Fotovoltaik .....	20
2.6 <i>Fuzzy Analytical Hierarchy Process</i> (Fuzzy-AHP) .....	22

	Halaman
<b>Bab III. Metode Penelitian .....</b>	<b>27</b>
3.1 Waktu dan Tempat Pelaksanaan Penelitian .....	27
3.2 Alat dan Bahan Penelitian .....	27
3.2.1 Data Pendukung .....	27
3.2.2 Lembar Pembobotan Perbandingan Berpasangan .....	27
3.2.3 <i>Software</i> PV*Sol Premium .....	28
3.2.4 <i>Software</i> Matlab .....	30
3.3 Desain Penelitian .....	30
3.4 Identifikasi Lokasi Studi Kasus .....	31
3.4.1 Data Lokasi dan Kondisi Gedung .....	32
3.4.2 Data Konstruksi Bangunan .....	33
3.4.3 Data Kelistrikan dan Profil Energi Listrik .....	35
3.4.4 Data Meteorologi .....	36
3.5 Desain Sistem BAPV di Lokasi Studi Kasus .....	36
3.6 Penilaian Desain Sistem BAPV .....	41
3.6.1 Penilaian Teknis .....	41
3.6.2 Penilaian Ekonomis .....	42
3.6.3 Penilaian Lingkungan .....	46
3.7 Optimasi Sistem BAPV dengan Fuzzy-AHP .....	47
3.7.1 Identifikasi Hirarki Fuzzy-AHP .....	47
3.7.2 Penghitungan Bobot Prioritas Kriteria .....	49
3.7.3 Penghitungan Bobot Prioritas Sub-Kriteria .....	52
3.7.4 Penghitungan Bobot Global Prioritas Alternatif .....	53
3.7.5 Penghitungan Bobot Akhir Alternatif .....	54
3.8 Teknik Pengumpulan Data .....	55
3.9 Teknik Analisis Data .....	55
<b>Bab IV. Hasil Penelitian dan Pembahasan .....</b>	<b>56</b>
4.1 Prioritas Kriteria .....	56
4.2 Prioritas Sub-kriteria .....	56
4.3 Prioritas Alternatif .....	57
4.4 Analisis Desain Sistem BAPV Terpilih .....	66
4.4.1 Konfigurasi Sistem .....	59
4.4.2 Analisis Sensitivitas Teknis .....	62
4.4.3 Analisis Sensitivitas Ekonomi .....	63
<b>Bab V. Penutup .....</b>	<b>71</b>
5.1 Kesimpulan .....	71
5.2 Saran .....	72
<b>Daftar Pustaka .....</b>	<b>73</b>
<b>Lampiran-lampiran .....</b>	<b>77</b>

## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Efisiensi bahan sel fotovoltaik .....	14
Tabel 2.2 Sudut kemiringan optimal untuk instalasi modul surya .....	19
Tabel 2.3 Skala <i>Triangular Fuzzy Number</i> (TFN) .....	24
Tabel 3.1 Skala intensitas kepentingan .....	28
Tabel 3.2 Contoh tabel pembobotan kriteria .....	28
Tabel 3.3 Hasil pengukuran atap Gedung E11 .....	28
Tabel 3.4 Hasil pengukuran atap Gedung E6 .....	29
Tabel 3.5 Hasil pengukuran atap Gedung E8 .....	29
Tabel 3.6 Data meteorologi lokasi studi kasus .....	36
Tabel 3.7 Detail informasi modul surya dan kebutuhannya .....	40
Tabel 3.8 Detail harga komponen sistem BAPV yang direncanakan .....	40
Tabel 3.9 Hasil penilaian teknis desain sistem BAPV .....	42
Tabel 3.10 Rincian biaya investasi awal desain-1 sistem BAPV skenario 1 ..	43
Tabel 3.11 Estimasi biaya investasi awal .....	43
Tabel 3.12 Rincian LCC desain-1 dari sistem BAPV skenario 1 .....	44
Tabel 3.13 Estimasi <i>life cycle cost</i> .....	45
Tabel 3.14 Rincian <i>output energy</i> desain-1 sistem BAPV skenario 1 .....	45
Tabel 3.15 Estimasi <i>cost of energy</i> .....	46
Tabel 3.16 Estimasi reduksi CO <sub>2</sub> .....	46
Tabel 3.17 Hirarki Fuzzy-AHP untuk optimasi sistem BAPV .....	47
Tabel 3.18 Detail alternatif sistem BAPV terkoneksi <i>grid</i> dan baterai .....	48
Tabel 3.19 Detail alternatif sistem BAPV terkoneksi <i>grid</i> .....	48
Tabel 3.20 Perbandingan berpasangan antar kriteria .....	49
Tabel 3.21 Perbandingan berpasangan antar kriteria dengan skala TFN .....	49
Tabel 3.22 <i>Geometric mean</i> AHP antar elemen kriteria .....	50
Tabel 3.23 <i>Geometric mean</i> Fuzzy-AHP antar elemen kriteria .....	50
Tabel 3.24 Nilai sintesis fuzzy antar elemen kriteria .....	50
Tabel 3.25 Nilai vektor dan ordinat antar elemen kriteria .....	51
Tabel 3.26 Bobot prioritas kriteria dengan Fuzzy-AHP .....	51
Tabel 3.27 Bobot prioritas kriteria dengan AHP .....	52
Tabel 3.28 Bobot prioritas sub-kriteria sizing system dengan Fuzzy-AHP dan AHP .....	52
Tabel 3.29 Bobot prioritas sub-kriteria teknis dengan Fuzzy-AHP dan AHP .....	52
Tabel 3.30 Bobot prioritas sub-kriteria ekonomi dengan Fuzzy-AHP dan AHP .....	53
Tabel 3.31 Bobot prioritas alternatif desain sistem BAPV skenario 1 .....	53
Tabel 3.32 Bobot prioritas alternatif desain sistem BAPV skenario 2 .....	53

	Halaman
Tabel 3.33 Bobot global alternatif desain sistem BAPV skenario 1 dengan Fuzzy-AHP .....	54
Tabel 3.34 Bobot global alternatif desain sistem BAPV skenario 1 dengan AHP .....	54
Tabel 3.35 Bobot akhir alternatif sistem BAPV .....	55
Tabel 4.1 <i>Mismatch output energy</i> antara simulasi PVSol dengan estimasi riil (skenario-1) .....	62
Tabel 4.2 Biaya <i>grid feed-in</i> skenario-1 .....	65
Tabel 4.3 Biaya penghematan setelah adanya BAPV skenario-1 .....	65
Tabel 4.4 Perhitungan net-metering sistem BAPV skenario-1 .....	65
Tabel 4.5 Alur kas proyek sistem BAPV skenario-1 .....	66
Tabel 4.6 Biaya <i>grid feed-in</i> skenario-2 .....	67
Tabel 4.7 Biaya penghematan setelah adanya BAPV skenario-2 .....	67
Tabel 4.8 Perhitungan net-metering sistem BAPV skenario-2 .....	67
Tabel 4.9 Alur kas proyek sistem BAPV skenario-2 .....	68

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1	Peta radiasi matahari di Indonesia ..... 10
Gambar 2.2	Efek fotovoltaik ..... 11
Gambar 2.3	Kurva I-V dan daya fotovoltaik ..... 12
Gambar 2.4	Perubahan kurva V-I akibat radiasi matahari ..... 13
Gambar 2.5	Kurva V-I pada kondisi suhu 25°C dan 85°C ..... 13
Gambar 2.6	Sel fotovoltaik, modul surya, string dan array ..... 15
Gambar 2.7	Konfigurasi inverter ..... 16
Gambar 3.1	Tampilan PV*Sol Premium ..... 28
Gambar 3.2	Diagram alir penelitian ..... 31
Gambar 3.3	Lokasi studi kasus I – Gedung E11 ..... 32
Gambar 3.4	Lokasi studi kasus II – Gedung E6 ..... 33
Gambar 3.5	Lokasi studi kasus III – Gedung E8 ..... 33
Gambar 3.6	Lahan tersedia pada ketiga gedung studi kasus ..... 34
Gambar 3.7	Estimasi profil energi listrik di Gedung E11 dan Gedung E6+E8 ..... 35
Gambar 3.8	Desain 3D Gedung E11 ..... 37
Gambar 3.9	Desain 3D Gedung E6 dan Gedung E8 ..... 37
Gambar 3.10	Skema sistem BAPV terkoneksi grid dan baterai untuk Gedung E11 ..... 38
Gambar 3.11	Skema sistem BAPV terkoneksi grid untuk Gedung E6+E8 .. 38
Gambar 3.12	Contoh analisis shading dengan PhotoPlan di PV*Sol ..... 41
Gambar 4.1	<i>Priority rank</i> antar kriteria ..... 56
Gambar 4.2	<i>Priority rank</i> antar sub-kriteria ..... 57
Gambar 4.3	<i>Priority rank</i> dari alternatif sistem BAPV di skenario 1 ..... 58
Gambar 4.4	<i>Priority rank</i> dari alternatif sistem BAPV di skenario 2 ..... 58
Gambar 4.5	Konfigurasi array sistem BAPV skenario 2 untuk Gedung E6+E8 ..... 60
Gambar 4.6	Konfigurasi array sistem BAPV skenario 1 untuk Gedung E11 ..... 61
Gambar 4.7	Arsiterktur dan tata letak modul surya sistem BAPV skenario 1 ..... 61
Gambar 4.8	Arsiterktur dan tata letak modul surya sistem BAPV skenario 2 ..... 62
Gambar 4.9	<i>Mismatch</i> data meteorologi studi kasus..... 63
Gambar 4.10	Hubungan antara harga jual listrik ke PLN dengan NPV dan BCR pada sistem BAPV Gedung E11 (skenario-1) ..... 70
Gambar 4.11	Hubungan antara harga jual listrik ke PLN dengan NPV dan BCR pada sistem BAPV Gedung E11 (skenario-1) ..... 70

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Dalam 20 tahun terakhir, konsumsi energi listrik global meningkat sebesar 40% setara dengan 10 TWh (Wang *et al.*, 2018). Diperkirakan konsumsi energi global akan mencapai 30 TWh pada tahun 2050 (Yilmaz & Ozcalik, 2015). Data BPSR (2017) edisi ke-67 menyatakan bahwa konsumsi energi primer global tahun 2017 didominasi oleh gas alam. Tiga juta tahun dibutuhkan oleh alam untuk menghasilkan bahan bakar fosil. Jika penggunaan energi konvensional masih terus mendominasi, akan ada beberapa permasalahan yang timbul, salah satunya adalah cadangan energi fosil yang terus berkurang, dan permasalahan mengenai emisi karbondioksida akibat pembakaran fosil (Harun *et al.*, 2015). Sumber energi terbarukan menjadi salah satu sumber energi alternatif pengganti bahan bakar fosil karena bebas pencemaran lingkungan, bebas biaya, dan mampu menjaga lapisan ozon untuk membantu mengurangi efek rumah kaca dan pemanasan global (Anonim, 2014; Shukla *et al.*, 2016).

Teknologi pembangkit listrik energi terbarukan menjadi solusi dari kekhawatiran penggunaan bahan bakar fosil (Biyik *et al.*, 2017). Energi matahari merupakan salah satu energi terbarukan yang selalu tersedia, bersifat universal, tidak bersuara dan tidak berpolusi (Li, 2018; Shukla *et al.*, 2016). Salah satu cara memanfaatkan energi matahari adalah dengan teknologi *photovoltaic*. *Photovoltaic*

adalah teknologi yang mampu mengubah radiasi matahari secara langsung menjadi listrik searah (Chowdhury, 2016; Shukla *et al.*, 2016).

Teknologi fotovoltaik menjadi pemanfaatan teknologi energi terbarukan yang menjanjikan (Bojic *et al.*, 2016). Dalam 8 tahun terakhir, produksi modul surya global mencapai 40%. Hal tersebut menandakan pasar modul surya memiliki pertumbuhan yang cepat untuk produksi listrik global (Zeman, 2010). Hingga tahun 2016, sebesar 303,1 GW energi listrik telah dibangkitkan oleh teknologi fotovoltaik (Parida *et al.*, 2011; PVPS, 2017). Nilai tersebut menyumbang 1,7% energi bersih dari total kebutuhan energi listrik dunia (Jäger-Waldau, 2017).

*Building Attached Photovoltaic* (BAPV) dan *Building Integrated Photovoltaic* (BIPV) menjadi dua cara inovatif untuk mengimplementasikan teknologi fotovoltaik. Beberapa negara sudah menerapkan kedua cara tersebut. Sebagai contoh, Jerman menerapkan undang-undang “*Rooftop Solar Electricity Programme*” untuk mendorong pengembangan BAPV, Jepang mensubsidi sepertiga biaya pemasangan fotovoltaik di bangunan perumahan, instalasi fotovoltaik di Amerika meningkat menjadi 62 MW pada tahun 2004 dan 36,5 MW di California (Hongxing & Yutong, 2019).

Aaditya *et al.*, (2017) melakukan penilaian komparatif terhadap sistem BAPV dan BIPV di Bangalore, India. Penelitian tersebut membuktikan bahwa sistem BAPV memiliki kinerja sistem lebih baik daripada sistem BIPV. Kedua sistem tersebut banyak diterapkan area residensial yang sudah dibangun (Spertino *et al.*, 2015; Gindi, 2017; Dwi, 2013; Hongxing & Yutong, 2019). Tetapi sistem BIPV dan BAPV juga dapat diimplementasikan di gedung-gedung akademik

(Barua *et al.*, 2017; Raj *et al.*, 2016; Baitule *et al.*, 2017; Nag *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2018). Proyek sistem fotovoltaik di area kampus menjadi strategi yang tepat untuk mengurangi biaya biaya listrik dan meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan. Sistem BAPV di area kampus juga dapat mengurangi karbondioksida untuk mewujudkan *green campus*. PVSol memprediksi 12 kW<sub>P</sub> sistem *hybrid* fotovoltaik dengan baterai di Tunisia, Italia dapat mereduksi emisi CO<sub>2</sub> sebesar 2600 kgCO<sub>2</sub> pertahun (Mabrouk *et al.*, 2017). PVsyst memprediksi sistem fotovoltaik jenis m-Si untuk bangunan residensial di Oslo, Norwegia dapat mereduksi emisi CO<sub>2</sub> sebesar 60gr.CO<sub>2</sub>/kW<sub>H</sub> perhari (Madessa, 2015).

## 1.2 Identifikasi Masalah

Banyaknya jenis fotovoltaik harus dipilih dengan cermat. Walaupun berada di iklim tropis, jenis fotovoltaik dengan kinerja terbaik akan berbeda di setiap negara. Manoj *et al.*, (2019) melakukan studi komparasi sistem BAPV dan BIPV dengan berbagai jenis fotovoltaik di negara beriklim tropis. Komparasi tersebut membuktikan bahwa sistem BAPV relatif lebih layak untuk diimplementasikan di negara tropis. Di China, jenis fotovoltaik terbaik adalah HIT (Li, 2018). Fotovoltaik jenis a-Si memiliki performa terbaik untuk diterapkan di Brunei Darussalam dan Bhopal, India (Ismail *et al.*, 2016; Shukla *et al.*, 2016). Di Singapura, fotovoltaik jenis *mono-crystalline* memiliki degradasi kinerja terendah sebesar -0.8% pertahun (Ye *et al.*, 2014). Di Malaysia, fotovoltaik terbaik adalah jenis CdTe (Kumar *et al.*, 2017).



Dalam pemanfaatan sistem fotovoltaik, terdapat beberapa hal yang menentukan kelayakan investasi sistem. Faktor kelayakan tersebut ditinjau dari aspek teknis, aspek ekonomi dan aspek lingkungan (Ismail *et al.*, 2016).

*Multi-criteria Decision Making* atau MCDM menjadi algoritma yang sering digunakan pada kasus berkaitan dengan teknologi fotovoltaik. Terdapat beberapa metode MDCM, diantaranya AHP, ANP, Topsis, Promthee, Vikor, dll (Kaya *et al.*, 2019). Metode AHP banyak digunakan untuk menentukan jenis fotovoltaik terbaik dari beberapa teknologi fotovoltaik yang sudah ada (Kuthanazhi & Rao, 2012; Sagbansua & Balo, 2017), menentukan lokasi paling potensial untuk pemasangan sistem fotovoltaik (Azizkhani *et al.*, 2016) dan menentukan skenario energi terbarukan yang optimal di lokasi tertentu (Garni *et al.*, 2017)

Berdasarkan pemaparan diatas, kelayakan implementasi sistem BAPV ditentukan oleh penilaian teknis dan ekonomis. Namun, masih sedikit penelitian mengenai algoritma optimasi untuk mendesain sistem BAPV di kampus dengan mempertimbangkan faktor tekno-ekonomi. Oleh karena itu, teknik optimasi berbasis MCDM dapat diterapkan dalam menentukan kelayakan desain sistem terbaik dari sistem BAPV dengan mempertimbangkan penilaian tekno-ekonomi di area kampus. Penelitian ini bertujuan untuk memenuhi kesenjangan dari penelitian sebelumnya.

### **1.3 Perumusan Masalah**

Pemanfaatan area atap di gedung pendidikan sebagai lahan implementasi sistem BAPV sudah banyak diterapkan di beberapa negara maju beriklim tropis.

Kondisi negara tropis dengan suhu yang dominan panas dapat mengurangi performa sistem BAPV, sehingga penilaian secara teknis dan ekonomis perlu dilakukan untuk mengetahui kelayakan implementasi sistem BAPV di negara tropis. Beberapa algoritma telah dikembangkan untuk perencanaan sistem BAPV di area kampus berdasarkan kebutuhan energi gedung. Namun penelitian mengenai algoritma optimasi berbasis MCDM untuk menentukan sistem BAPV teroptimal dengan mempertimbangkan penilaian tekno-ekonomi belum diinvestigasi lebih jauh.

#### **1.4 Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian ini adalah menerapkan Metode *Fuzzy Analytical Hierarchy Process* sebagai teknik optimasi untuk menentukan konfigurasi desain sistem BAPV teroptimal dari beberapa skenario konfigurasi yang telah direncanakan.

#### **1.5 Pembatasan Masalah**

Agar pembahasan pada tugas akhir yang dilakukan lebih terarah, maka pembatasan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Data kebutuhan energi listrik harian di objek studi kasus yang digunakan dalam penelitian mengacu pada penelitian Pradita (2018).
2. Simulasi perencanaan sistem BAPV menggunakan *software* PV\*Sol Premium.

3. *Mounting* modul surya untuk sistem BAPV didesain sebagai *fixed tilted plane* atau modul surya yang telah dipasang secara permanen di atap bangunan. Sehingga penempatan modul surya menyesuaikan dengan orientasi dan sudut atap bangunan yang digunakan.
4. *Datasheet* seluruh komponen diperoleh dari *website* supplier.
5. Data bangunan gedung-gedung diperoleh melalui Google Earth dan Unit Layanan Pengadaan (ULP) Universitas Negeri Semarang.
6. Kekuatan beban pada atap tidak diperhitungkan.
7. Data kelistrikan diperoleh melalui Unit Layanan Pengadaan (ULP) Universitas Negeri Semarang.
8. Simulasi sistem BAPV diasumsikan tidak mengalami kegagalan sistem selama masa kerjanya, sehingga drop tegangan dan harmonisa tegangan tidak diperhitungkan.
9. Data cuaca diperoleh melalui *software* Meteonorm yang ada di PV\*Sol Premium.
10. Pengolahan data menggunakan *software* Microsoft Excel dan MATLAB.
11. Penelitian ini tidak membahas mengenai sistem proteksi perencanaan BAPV pada Gedung-gedung Teknik Elektro UNNES.

## **1.6 Manfaat Penelitian**

Adapun penelitian ini diharapkan mampu memberikan manfaat kepada pembaca antara lain:

1. Mengetahui jenis fotovoltaik terbaik untuk diimplementasikan di negara tropis.
2. Dapat menjadi referensi dalam menentukan modul surya untuk pembangkit listrik tenaga surya di negara tropis.
3. Mengetahui konfigurasi sistem BAPV paling optimal untuk Gedung-gedung Teknik Elektro UNNES.

## **BAB II**

### **KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI**

#### **2.1 Kajian Pustaka**

Terdapat beberapa penelitian terdahulu yang relevan untuk dijadikan referensi dalam penelitian ini. Peneliti tersebut meliputi:

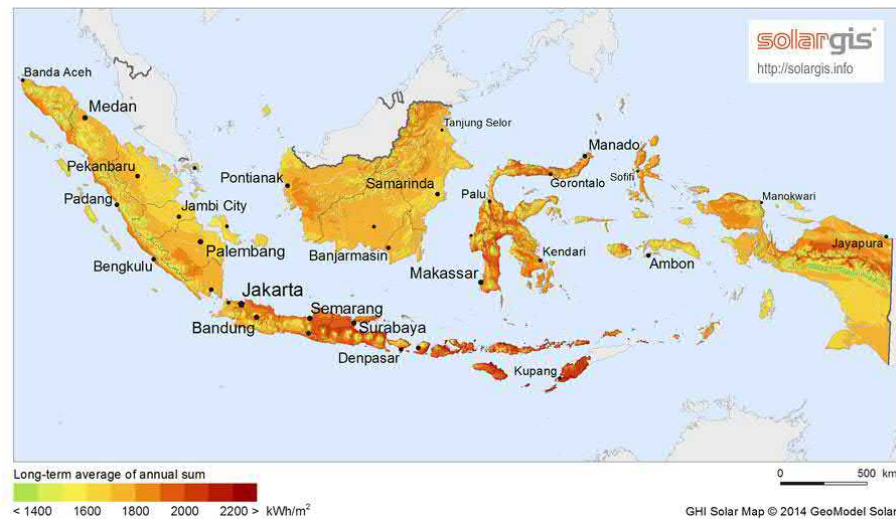
1. Baitule *et al.* (2017) berjudul '*Solar Powered Green Campus: A Simulation Study*'. Penelitian tersebut menganalisis kelayakan perencanaan pembangkit listrik tenaga surya di Maulana Azad National Institute of Technology (MANIT), Bhopal, India dengan cara menganalisa penggunaan energi listrik di MANIT, kemudian merencanakan PLTS sebesar 5MW menggunakan *software* PVSyst. Hasil penelitian tersebut kampus MANIT dapat menghasilkan energi listrik bersih sekitar 8000 MWh menggunakan modul surya. Penggunaan modul surya dapat mereduksi 73.318 ton karbon.
2. Barua *et al.* (2017b) berjudul '*Rooftop Solar Photovoltaic System Design and Assesment for the Academic Campus Using PVSyst Software*'. Penelitian tersebut mengevaluasi PLTS yang ada di Pondicherry University dengan cara mensimulasikan konfigurasi PLTS menggunakan *software* PVSyst. Energi bersih yang dihasilkan oleh PLTS memasok energi sebesar 11% dari total penggunaan energi listrik tahunan di Pondicherry University. Pemanfaatan energi listrik bersih mengurangi emisi karbondioksida sebesar 42 ton.

3. Shukla *et al.*, (2016 a) dengan penelitian berjudul '*Simulation and Performance Analysis of 110 kW<sub>P</sub> Grid-connected Photovoltaic System for Residential Building in India*' membuktikan bahwa masing-masing teknologi fotovoltaik memiliki perbedaan *performance ratio* serta energi bersih yang dihasilkan. Dalam penelitian ini, fotovoltaik c-Si menghasilkan 163,1 MW<sub>H</sub>, m-Si sebesar 181,1 MW<sub>H</sub>, CdTe sebesar 175,3 MW<sub>H</sub>, dan CIS sebesar 166,5 MW<sub>H</sub> dilokasi yang sama.
4. Hashim, 2018 dalam penelitian berjudul '*An Economic Evaluation of Grid Connected Photovoltaic System for a Residential House in Khartoum*' meninjau faktor ekonomi sistem fotovoltaik untuk bangunan residensial di Khartoum. Sistem fotovoltaik 12 kW<sub>P</sub> tersebut dinilai layak karena memiliki LCOE sebesar 0,051\$/kW<sub>H</sub> dengan harga listrik lokal 0,055\$/kW<sub>H</sub>.
5. Kumar *et al.*, (2019), dalam penelitian berjudul '*Integrated Assesment of a Sustainable Microgrid for A Remote Village in Hily Region*' membuat 20 skenario energi terbarukan. Skenario energi dipilih menggunakan Metode AHP dan dihasilkan skenario energi alternatif yaitu kombinasi antara sistem fotovoltaik, sistem PHS, sistem HKRoR dan sistem *Distributed Generation*.

## **2.2 Potensi Energi Matahari Sebagai Sumber Energi Bersih di Indonesia**

Letak Indonesia yang berada di garis khatulistiwa menjadikan Indonesia memiliki potensi energi matahari yang cukup tinggi, karena matahari terus bersinar

sepanjang tahun dengan rata-rata waktu sinar enam jam hingga delapan jam dalam satu hari. Sedangkan rata-rata penyinaran ideal yang dapat digunakan dalam produksi listrik adalah empat hingga lima jam.



Gambar 2.1 Peta Radiasi Matahari di Indonesia

[sumber: <http://solargis.info>]

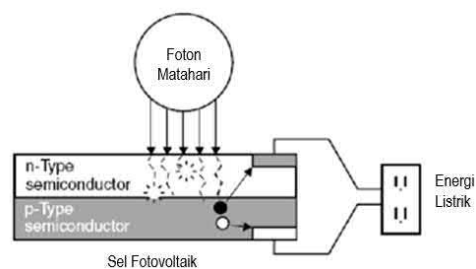
## 2.3 Teknologi Solar Photovoltaic

Energi surya merupakan radiasi elektromagnetik yang diproduksi oleh reaksi fusi nuklir pada inti matahari. Hampir semua panas dan cahaya yang diterima bumi dari matahari digunakan untuk keperluan makhluk hidup. Energi surya sampai ke bumi dalam bentuk paket-paket energi yang disebut dengan foton. Teknologi fotovoltaik merupakan teknologi yang mengkonversi langsung foton dari cahaya matahari menjadi energi listrik bebas polusi dan kebisingan (Amin *et al.*, 2016).

### 2.3.1 Sel Fotovoltaik

Sel fotovoltaik merupakan peralatan semikonduktor padat yang mengkonversi radiasi matahari langsung menjadi listrik dengan adanya efek

fotovoltaik (Jayanth & Venkatesh, 2017). Menghasilkan listrik searah (DC) diukur dalam watt (W) atau kilowatt (kW) (Erdogan, 2009). Kinerja dari sel fotovoltaik bergantung pada ketersediaan cahaya matahari. Selama ada cahaya matahari, sel fotovoltaik akan menghasilkan energi listrik. Namun jika tidak ada cahaya matahari, tidak akan energi listrik yang dihasilkan. Sel fotovoltaik tidak membutuhkan pengisian energi selayaknya baterai (Erge *et al.*)



*Gambar 2.2 Efek fotovoltaik*

[Sumber: Erge *et al.* n.d.]

Efek fotovoltaik terjadi ketika foton cahaya matahari menumbuk sel surya yang terbuat dari bahan semikonduktor, energi tumbukan tersebut ditransfer ke elektron. Energi yang diperoleh elektron menyebabkan elektron mengalir menjadi arus listrik (Chen, 2011).

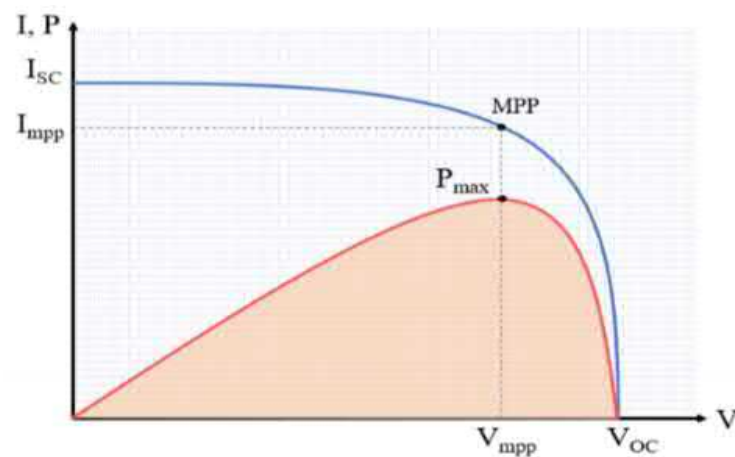
### 2.3.2 Kinerja Sel Fotovoltaik

Kinerja fotovoltaik dapat dilihat dari parameter *peak power* ( $P_{MAX}$ ), arus hubung singkat ( $I_{sc}$ ), tegangan *open circuit* ( $V_{oc}$ ) dan *fill factor* (FF). Parameter tersebut dapat ditentukan dengan melihat kurva hubungan I-V dari fotovoltaik ketika mendapatkan cahaya (Klever, 2018).

Pada dasarnya, sel fotovoltaik memiliki hubungan antara tegangan dan arus. Gambar 2.3 menjelaskan garis biru adalah kurva hubungan antara arus dan tegangan, sedangkan garis merah adalah kurva daya fotovoltaik. Sel fotovoltaik



akan menghasilkan arus maksimal jika tidak ada hambatan atau resistansi dalam kondisi hubung singkat antara terminal positif dengan terminal negatif. Arus dalam kondisi tersebut disebut dengan arus hubung singkat atau *short circuit current* ( $I_{SC}$ ) dan besar tegangan dalam sirkuit sama dengan nol. Namun sebaliknya, dalam kondisi resistansi yang tinggi sirkuit akan menghasilkan tegangan maksimum dan besar arus adalah nol. Tegangan dalam kondisi tersebut disebut dengan tegangan rangkaian terbuka atau *open circuit voltage* ( $V_{OC}$ ) (Singh, 2010; Klever, 2018).



Gambar 2.3 Kurva I-V dan daya fotovoltaik

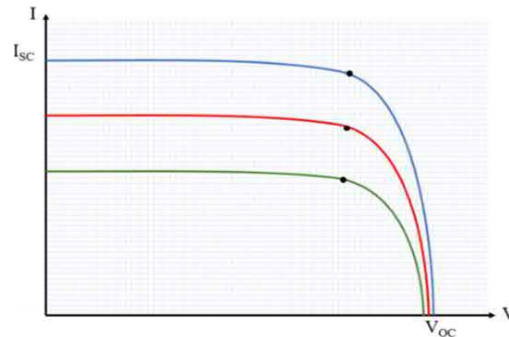
(Klever, 2018)

MPP merupakan *maximal power point*, dan  $P_{MAX}$  adalah daya puncak ketika mencapai  $V_{MPP}$ . Nilai  $P_{MAX}$  dapat ditentukan dengan:

$$P_{MAX} = I_{MPP} \times V_{MPP} \quad (2.1)$$

Dimana  $I_{MPP}$  adalah arus maksimum fotovoltaik dan  $V_{MPP}$  adalah tegangan maksimum fotovoltaik. Mengetahui karakteristik sel fotovoltaik sangat diperlukan guna menentukan kompatibilitas dengan inverter, maupun dengan beban (Singh, 2010).

a. Efek Radiasi Matahari terhadap Kurva V-I

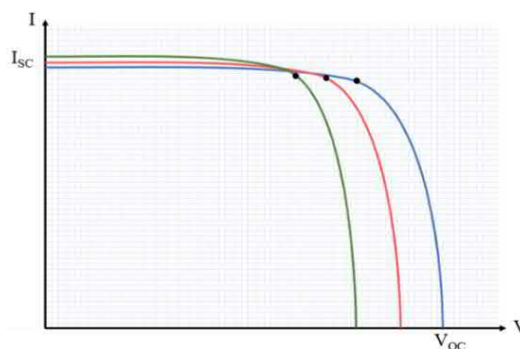


Gambar 2.4 Perubahan kurva V-I akibat radiasi matahari.

(Klever, 2018)

Cahaya matahari yang sampai ke bumi bergantung pada cuaca. Pengujian sel fotovoltaik di laboratorium dalam STC (*Standart Test Condition*) untuk kondisi cerah diasumsikan sebesar  $1.000 \text{ watt/m}^2$ . Kurang dari kecerahan tersebut akan mengurangi daya keluaran sel fotovoltaik dengan jumlah yang proporsional (Singh, 2010; Chowdhury, 2016).

b. Efek Suhu terhadap Kurva V-I



Gambar 2.5 Kurva V-I pada kondisi suhu  $25^\circ\text{C}$  (biru) dan  $85^\circ\text{C}$  (hijau)

(Klever, 2018)

Suhu normal dimana sel fotovoltaik akan bekerja pada efisiensi tertingginya adalah  $25^\circ\text{C}$ . Setiap kenaikan suhu sebesar satu derajat celsius, akan mengurangi tegangan keluaran sebesar 0.04 volt (Singh, 2010; Chowdhury, 2016).

### 2.3.3 Jenis Sel Fotovoltaik

Ada dua klasifikasi jenis fotovoltaik, yaitu jenis *wafer based* atau kristalin dan jenis *thin film* (Klever, 2018). Terdapat perbedaan antara jenis fotovoltaik, yaitu efisiensi, bahan penyusun serta harga bahan dan biaya produksi (Dondariya *et al.*, 2018; Charfi *et al.*, 2018). Sel fotovoltaik tidak akan bekerja tanpa adanya bahan semikonduktor, yaitu bahan yang dapat bertindak sebagai isolator maupun konduktor dalam skenario yang berbeda (Guevara, 2017). Ada beberapa bahan yang dijadikan bahan penyusun utama sel fotovoltaik, seperti: *mono-crystalline silicon* (m-Si), *poly-crystalline silicon* (p-Si), *amorphous silicon* (a-Si), *cadmium telluride* (CdTe), *copper indium selenide* (CIS), *edge-defined film-fed growth silicon* (EFG-Si), dan *heterojunction with intrinsic thin-layer* (HIT) (Li, 2018).

Tabel 2.1 Efisiensi bahan sel surya

Bahan	Efisiensi (%)
<i>Monocrystalline Silicon</i>	14 – 17
<i>Polycrystalline Silicon</i>	11,5 – 14
<i>Copper Indium Selenide</i>	9 – 11,5
<i>Cadmium Telluride</i>	8 – 10
<i>Amorphus Silicon</i>	5 – 9,5
<i>Polymer</i>	1 – 2,5

Bahan silikon kristal lebih dominan digunakan karena lebih murah daripada bahan lainnya. Bahan gallium arsenide memiliki efisiensi yang lebih tinggi dari silikon kristal, karena gallium arsenide dapat dicampur dengan indium, fosfor dan alumunium sehingga perpaduan bahan tersebut dapat menyerap radiasi matahari lebih intens, namun harganya juga lebih tinggi daripada silikon kristal. Bahan silikon amorf (a-Si) diaplikasikan dalam tipe sel surya *thin-film*. Dibandingkan dengan silikon kristal, bahan silikon amorf lebih murah namun

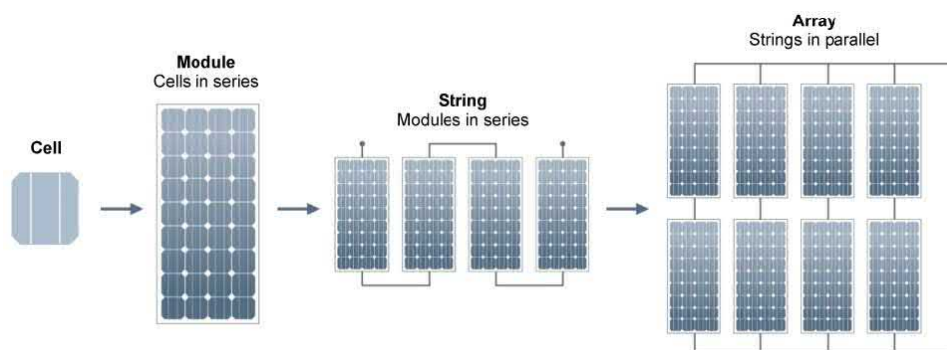
efisiensinya lebih rendah. Tabel 2.1 menunjukkan efisiensi beberapa bahan yang digunakan dalam pembuatan sel surya.

### 2.3.4 Modul Surya

Komponen pendukung utama sistem fotovoltaik yaitu modul surya sebagai pengkonversi energi surya menjadi energi listrik searah, dan inverter sebagai pengkonversi energi listrik DC menjadi energi listrik AC untuk dapat digunakan oleh konsumen (Shukla *et al.*, 2016).

Satu sel fotovoltaik dapat menghasilkan tegangan sirkuit terbuka sekitar 0,5 hingga 0,6 V<sub>DC</sub>. Untuk menghasilkan daya, arus dan tegangan lebih tinggi, beberapa sel surya dikombinasikan secara seri. Pengaturan umum pabrikan fotovoltaik menggabungkan 36, 54, 60 dan 72 sel surya untuk dapat menghasilkan tegangan sebesar 12 atau 24 V<sub>DC</sub>. Gabungan seri sel fotovoltaik disebut dengan modul surya (Kramer *et al.*, 2008; Jayanth & Venkatesh, 2017; Chowdhury, 2016)

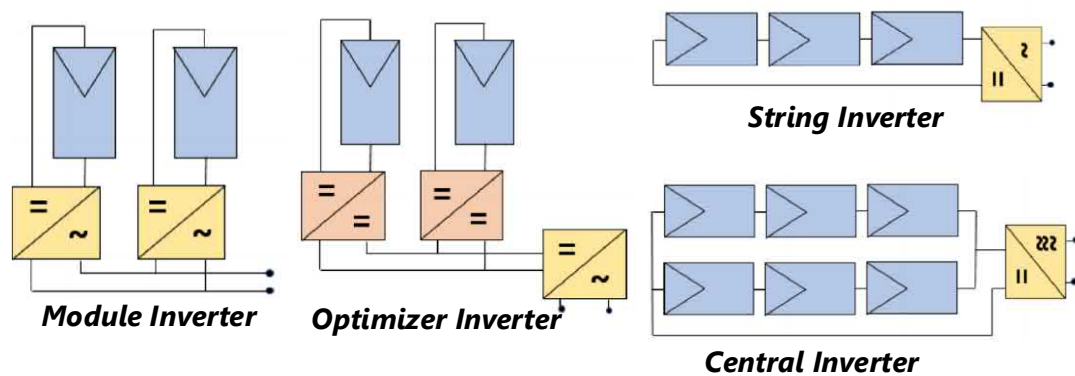
Instalasi sistem fotovoltaik menggunakan beberapa gabungan dari modul surya. Gabungan dari modul surya secara seri disebut dengan *string* dan gabungan string secara paralel disebut dengan *array*. Gabungan dari beberapa *string* menjadi *array* dapat dikombinasikan untuk mendapatkan arus yang lebih tinggi. Kombinasi tersebut disesuaikan dengan kebutuhan beban dan instalasi PLTS (Singh, 2010).



Gambar 2.6 Sel fotovoltaik, modul surya, string dan array.

### 2.3.5 Inverter

Inverter berfungsi mengkonversi arus bolak-balik (DC) dari *array* menjadi arus searah (AC) yang kompatibel dengan tegangan dan frekuensi *grid* lokal (220 Volt, 50 Hz). Inverter juga berperan sebagai alat kontrol dan optimisasi ketika tegangan *grid* tidak stabil. Jenis, kapasitas dan konfigurasi inverter dipilih sesuai dengan kebutuhan. Berikut ini 4 jenis konfigurasi sistem PLTS (Klever, 2018):



Gambar 2.7 Konfigurasi Inverter

(Klever, 2018)

a. *Module Inverter*

Konfigurasi *module inverter* dapat mengurangi gangguan keluaran jika salah satu modul fotovoltaik terjadi gangguan. Keluaran dari inverter ini dapat digabungkan untuk mendapatkan nilai daya keluaran yang lebih besar.

b. *String inverter*

Konfigurasi *string inverter* dapat memperkecil kerugian akibat tahanan kabel dan inverter memiliki efisiensi yang lebih tinggi. Kerugian dari inverter ini adalah masalah instalasi pengkabelan yang rumit, sehingga memiliki biaya yang lebih besar.

c. *Optimizer Inverter*

Konfigurasi *optimizer inverter* terdiri dari inverter DC-DC lalu ke DC-AC. Inverter DC-AC akan bekerja jika *string* bekerja dalam rentang tegangan. Konversi DC-DC akan meningkatkan kerugian efisiensi, tetapi konfigurasi ini dapat meminimalisir *overheating*.

d. *Centralized Inverter*

Konfigurasi penggunaan inverter tersentral mengupayakan hasil daya keluaran yang sama besar pada setiap perubahan energi dari matahari. Kekurangan dari inverter tersentral adalah adanya kerugian energi dari kabel.

### **2.3.6 Baterai**

Sistem fotovoltaik terkoneksi *grid* sangat bergantung dengan pola frekuensi dan tegangan dari *grid*. Jika tidak terhubung ke jaringan, sistem fotovoltaik tidak akan bekerja. Dalam sistem fotovoltaik yang terhubung ke *grid*, baterai digunakan sebagai cadangan saat pemadaman listrik terjadi. Ketika harga listrik dari PLN untuk membeli untuk beban tinggi, daya baterai dapat digunakan untuk memasok kebutuhan beban (Gunawardana, 2014).

## **2.4 *Building Attached Photovoltaic (BAPV) System Terkoneksi Grid dan Baterai***

Sistem BAPV dirancang untuk *supply* energi listrik ke beban menggunakan fotovoltaik (Klever, 2018). Hal terpenting dalam perencanaan sistem BAPV adalah pemilihan jenis teknologi fotovoltaik dan konfigurasi pemasangan

daripada parameter meteorologi dan *loss energy* (Attari *et al.*, 2016). Pemasangan fotovoltaik memanfaatkan area bangunan dapat memenuhi permintaan listrik lokal karena menawarkan potensi untuk mengurangi dampak buruk lingkungan dari produksi dan distribusi listrik pusat (Morrison *et al.*, 2006).

#### **2.4.1 Penentuan Lokasi**

Instalasi sistem fotovoltaik tidak harus selalu dipermukaan karena kendala lahan, oleh karena itu pemanfaatan area bangunan untuk instalasi sistem fotovoltaik sangat diperlukan (Sharma & Goel, 2017). Atap bangunan dapat dimanfaatkan untuk lahan instalasi sistem BAPV karena area kosong relatif besar (Lee *et al.*, 2014). Penilaian lokasi penting untuk dilakukan sebelum merencanakan sistem BAPV. Beberapa poin yang perlu dinilai untuk menentukan lokasi yaitu: bahan, bentuk dan konstruksi atap; sudut inklinasi; *shading* dari benda-benda disekitar bangunan; panjang dan rute kabel (Klever, 2018).

#### **2.4.2 Orientasi Modul Surya**

Hal yang perlu diperhatikan dalam merencanakan pembangkit listrik tenaga surya adalah posisi atau sudut penempatan dari modul surya terhadap matahari serta posisi lintang dan bujur dari lokasi perencanaan. Posisi matahari selalu berubah-ubah disetiap waktu membuat modul surya harus diposisikan setepat mungkin supaya mendapat cahaya matahari maksimal dan mampu memberikan daya semaksimal mungkin (Jayanth & Venkatesh, 2017)

Posisi terbaik penempatan modul surya adalah tidak terhalang pohon atau bangunan tinggi. Modul surya akan menangkap cahaya maksimal apabila posisi

modul menghadap ke utara, disebabkan letak geografis Indonesia berada di sebelah selatan khatulistiwa (Yilmaz & Ozcalik, 2015)

*Tabel 2.2 Sudut kemiringan instalasi modul surya*

Garis Lintang	Sudut Kemiringan
0 - 15°	15°
15 - 25°	25°
25 - 30°	30°
30 - 35°	40°
35 - 40°	45°
40 - 90°	65°

#### 2.4.3 *Sizing* Modul Surya

Pemilihan modul surya mempertimbangkan kapasitas daya yang akan dibangkitkan (Klever, 2018). Jumlah modul surya yang diperlukan dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.2:

$$\text{Kapasitas Sistem} = \frac{(1,5 * \text{Konsumsi Energi Listrik}) : \text{Faktor Iradiasi}}{\text{Nominal Daya Modul Surya}} \quad (2.2)$$

Sebagai kompensasi, nilai konsumsi energi listrik ditambahkan 10-50% untuk menghindari adanya tambahan energi yang tidak terhitung dan menghindari energi yang hilang (Khatri, 2016).

Faktor iradiasi merupakan kunci utama dari menentukan jumlah modul surya, karena faktor iradiasi mempengaruhi kinerja modul surya dalam menghasilkan energi listrik. Faktor iradiasi dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.3 (Khatri, 2016):

$$\text{Faktor Iradiasi} = \frac{\text{Iradiasi matahari harian}}{1000} \quad (2.3)$$

#### 2.4.4 *Sizing* Inverter



Pemilihan kapasitas inverter disesuaikan dengan *output array* modul surya (Klever, 2018). *Input* daya DC dari *array* modul surya dan kapasitas daya input inverter perlu disinkronisasikan sehingga inverter dapat bekerja optimal. Oleh karena itu, kapasitas inverter harus 10-30% lebih besar dari daya yang akan dibangkitkan oleh modul surya. Kapasitas inverter dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.4 (Khatri, 2016):

$$\text{Kapasitas Inverter} = 1,2 * \text{Jumlah Modul Surya} * \text{Nominal Modul} \quad (2.4)$$

Jumlah inverter ditentukan menggunakan Persamaan 2.5 (Khatri, 2016):

$$\text{Jumlah Inverter} = \frac{\text{Kapasitas Inverter}}{\text{Nominal Daya Inverter}} \quad (2.5)$$

#### 2.4.5 *Sizing* Baterai

Dalam sistem BAPV terkoneksi dengan *grid* di area kampus, media penyimpanan energi listrik seperti baterai tetap diperlukan untuk mengantisipasi adanya pemadaman listrik yang dapat mengganggu kegiatan perkuliahan. Kapasitas kebutuhan baterai serta jumlah baterai yang akan digunakan dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.6 dan 2.7 (Khatri, 2016):

$$\text{Kapasitas Baterai} = \frac{\text{Total Konsumsi Listrik} * \text{Autonomi Hari}}{\text{Tegangan Baterai} * \text{DOD} * \text{Efisiensi Baterai}} \quad (2.6)$$

$$\text{Jumlah Baterai} = \frac{\text{Kapasitas Baterai}}{\text{Nominal Kapasitas Baterai}} \quad (2.7)$$

### 2.5 Parameter Penilaian Sistem Fotovoltaik

Beberapa penelitian terdahulu menggunakan penilaian tekno-ekonomi untuk menentukan kelayakan investasi sistem fotovoltaik. Parameter tekno-ekonomi yang digunakan dalam penilaian sistem fotovoltaik adalah:

1. Energi bersih selama *lifetime* sistem fotovoltaik

Total energi bersih setelah dikonversi oleh inverter dalam periode harian, bulanan dan tahunan dapat diperoleh dengan (Li, 2018):

$$E(A_c, d) = \sum_{h=1}^{24} E(A_c, h) \quad E(A_c, m) = \sum_{d=1}^n E(A_c, d)$$

$$E(A_c, y) = \sum_{m=1}^{12} E(A_c, m) \quad (2.8)$$

2. *Performance Ratio*

(2.8)

Nilai rasio kerja dapat memberikan informasi mengenai kerugian atau kehilangan energi yang ada (Li, 2018; Baitule *et al.*, 2017).

(2.9)

$$PR = \frac{Y_{field}}{Y_{reference}} \quad (2.9)$$

3. Aliran energi ke beban

Aliran energi ke beban akan memberikan estimasi hasil persentase perbandingan *supply* energi ke beban dari sistem fotovoltaik, baterai dan *grid*.

4. Surplus energi ke *grid* (*Grid feed-in*)

Surplus energi ke *grid* atau *grid feed-in* akan terjadi jika kebutuhan energi terhadap beban sudah terpenuhi.

5. Biaya Investasi Awal

Biaya investasi awal merupakan perkiraan biaya yang harus dikeluarkan pada tahun ke-0 dari instalasi sistem fotovoltaik. Biaya tersebut mencakup biaya komponen yang digunakan (modul surya, baterai dan inverter) ( $C_{komponen}$ ), biaya pengiriman komponen ( $C_{shipping}$ ), biaya instalasi sistem fotovoltaik ( $C_{Installation}$ ) dan biaya perkabelan ( $C_{cabling}$ ). Biaya investasi awal ( $I_T$ ) dihitung menggunakan rumus (Allouhi *et al.*, 2016; Zeacsen, 2018):

$$I_T = C_{Installation} + C_{Component} + C_{Cabling} + C_{Shipping} \quad (2.10)$$

#### 6. *Life cycle cost*

*Life cycle cost* adalah total biaya investasi sistem fotovoltaik selama masa hidup sistem (25 tahun) yang dihitung menggunakan rumus (Allouhi *et al.*, 2016):

$$LCC = I_T + C_{O\&M} + C_R \quad (2.11)$$

Dimana  $I_T$  adalah biaya investasi awal,  $C_{O\&M}$  adalah biaya operasional dan perawatan serta  $C_R$  adalah biaya pergantian komponen. Setiap komponen memiliki masa hidup atau *lifetime* yang berbeda. Sebagai contoh modul surya memiliki *lifetime* selama 25 tahun, baterai memiliki *lifetime* selama 10 tahun dan inverter selama 5 tahun.

#### 7. *Levelized cost of energy*

*Levelized cost of energy* (LCOE) merupakan harga energi per  $kW_H$  yang dihasilkan oleh sistem fotovoltaik. LCOE dihitung menggunakan rumus (Allouhi *et al.*, 2016):

$$LCOE = \frac{\sum_{m=1}^n (I_T + C_{O\&M} + C_R * (1+r))^{-m}}{\sum_{m=1}^n (E_m * (1+r))^{-m}} \quad (2.12)$$

Dimana  $E_m$  adalah energi bersih yang dihasilkan oleh sistem dan merupakan nilai degradasi tahunan dari modul surya.

#### 8. Reduksi $CO_2$

Keuntungan menggunakan lahan atap untuk sistem fotovoltaik adalah dapat mengurangi karbon  $CO_2$ . Emisi pengurangan  $CO_2$  terkait dengan jumlah energi yang dapat dihasilkan oleh sistem fotovoltaik. Semakin besar energi yang dihasilkan sistem fotovoltaik, semakin besar  $CO_2$  yang dapat dikurangi.

## 2.6 Fuzzy Analytical Hierarchy Process (Fuzzy-AHP)

Fuzzy-AHP merupakan pengembangan dari algoritma AHP yang dikombinasikan dengan *triangular fuzzy number* (TFN) dalam teori fuzzy. (Ooi *et al.*, 2017) menyebutkan bahwa kombinasi fuzzy dengan metode AHP dapat membantu dalam pemilihan keputusan yang realistis dan fleksibel berdasarkan tujuan yang telah ditentukan. Metode fuzzy memiliki kemampuan dalam menalar bahasa sehingga tidak memerlukan persamaan matematika yang rumit dalam perancangannya. Tahapan yang dilakukan pada Fuzzy-AHP adalah (Chang, 1996):

Langkah 1: Membuat struktur hirarki

Struktur hirarki terdiri dari tujuan dan beberapa elemen untuk mencapai tujuan yaitu: kriteria, sub-kriteria dan alternatif. Hirarki diperlukan untuk membantu mencapai penyelesaian masalah dan menentukan perbandingan matriks berpasangan antar kriteria, sub-kriteria dan alternatif dengan skala numerik.

Langkah 2: Membuat kuesoner matriks perbandingan berpasangan antar kriteria, sub-kriteria dan alternatif.

Perbandingan berpasangan dilakukan berdasar kebijakan pembuat keputusan dengan menilai tingkat kepentingan satu elemen terhadap elemen lainnya. Penilaian ini dilakukan oleh seorang ahli di bidang terkait yang memiliki kepentingan didalamnya. Perbandingan antar dua elemen dimisalkan sebagai elemen  $i$  dan elemen  $j$ . Jika suatu elemen dibandingkan dengan dirinya sendiri maka diberi nilai 1. Bentuk persamaan dari perbandingan berpasangan tiap elemen dilihat pada Persamaan 2.13. Bentuk matriks perbandingan berpasangan dilihat pada Persamaan 2.14.

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j} \quad \text{dimana } i, j = 1, 2, \dots, n \quad (2.13)$$

$$A = a_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{n1} & 1/a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Langkah 3: Konversi bilangan fuzzy menjadi triangular fuzzy number

Matriks perbandingan berpasangan antara elemen yang telah didapatkan pada langkah sebelumnya berwujud skala numerik, sehingga perlu dikonversi kedalam skala TFN. Skala TFN disajikan dalam Tabel 2.3

Tabel 2.3 *Skala Triangular Fuzzy Number*

Variabel Linguistik	Skala Numerik	TFN ( $l, m, u$ )	Reciprocal ( $l, m, u$ )
Sama penting	1	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
Sedikit lebih penting	3	(1, 3/2, 2)	(1/2, 2/3, 1)
Lebih Penting	5	(2, 5/2, 3)	(1/3, 2/5, 1/2)
Sangat penting	7	(3, 7/2, 4)	(1/4, 2/7, 1/3)
Mutlak lebih penting	9	(4, 4/5, 5)	(2/9, 2/9, 1/4)
Pertengahan	2,4,6,8	(1/2, 1, 3/2); (3/2, 2, 5/2); (5/2, 3, 7/2); (7/2, 4, 9/2)	(2/3, 1, 2); (2/5, 1/2, 2/3); (2/7, 1/3, 2/5); (2/9, 1/4, 2/7)

Langkah 4: Menghitung *geometric mean*

*Geometric mean* adalah metode mencari rata-rata dengan cara menggabungkan preferensi pembobotan yang berbeda-beda dari beberapa ahli sehingga dapat meminimalisir kesalahan dalam perhitungan matriks perbandingan berpasangan. Perhitungan *geometric mean* dapat dilakukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$l_{ij} = \left( \prod_{k=1}^K l_{ijk} \right)^{\frac{1}{K}} \quad m_{ij} = \left( \prod_{k=1}^K m_{ijk} \right)^{\frac{1}{K}} \quad u_{ij} = \left( \prod_{k=1}^K u_{ijk} \right)^{\frac{1}{K}} \quad (2.15)$$

Diperlukan uji konsistensi matriks *geometric mean* sebelum melanjutkan ke langkah berikutnya. Uji konsistensi dilakukan dengan meninjau nilai  $l$ ,  $m$  dan  $u$  pada masing-masing elemen. Jika nilai tersebut memenuhi syarat  $l \leq m \leq u$ , maka nilai elemen dianggap konsisten.

Langkah 5: Menghitung nilai sintesis fuzzy

Menurut metode Chang (1996), menghitung nilai sintesis fuzzy untuk objek ke- $i$  didefinisikan pada Persamaan 2.16:

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{gi}^j * \left( \sum_{i=j}^m \sum_{i=1}^n M_{gi}^j \right)^{-1} \quad (2.16)$$

Untuk memperoleh nilai  $M_{gi}^j$ , perlu dilakukan operasi penjumlahan sintesis fuzzy  $m$  pada matriks berpasangan:

$$\sum_{i=j}^m M_{gi}^j = \left( \sum_{i=j}^m l_i, \sum_{i=1}^n m_i, \sum_{i=j}^m u_i \right) \quad (2.17)$$

Untuk memperoleh nilai  $\left( \sum_{i=j}^m \sum_{i=1}^n M_{gi}^j \right)^{-1}$ , dilakukan operasi penjumlahan fuzzy dari nilai  $M_{gi}^j$  dimana nilai  $j = 1, 2, \dots, m$ .

$$\left( \sum_{i=j}^m \sum_{i=1}^n M_{gi}^j \right)^{-1} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n u_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n l_i} \quad (2.18)$$

Langkah 6: Menentukan derajat kemungkinan

Menghitung derajat kemungkinan dari  $M_2 (l_2, m_2, u_2) \geq M_1 (l_1, m_1, u_1)$  didefinisikan oleh Persamaan 2.19:

$$V(M_2 \geq M_1) = hgt(M_1 \cap M_2) \quad (2.19)$$

dimana:

$$V(M_2 \geq M_1) = \begin{cases} 1 & , \text{jika } m_2 \geq m_1 \\ 0 & , \text{jika } l_1 \geq u_2 \\ \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)} & , \text{lainnya} \end{cases} \quad (2.20)$$

Langkah 7: Defuzifikasi

Nilai vektor dapat didefinisikan sebagai Persamaan 2.21:

$$V(M \geq M_1, M_2, \dots, M_k) = V[(M \geq M_1) \text{ dan } (M \geq M_2) \dots (M \geq M_k)]$$

$$V(M \geq M_1, M_2, \dots, M_k) = \min V(M \geq M_i) \text{ dengan } i = 1, 2, \dots, k \quad (2.21)$$

Diasumsikan bahwa  $d'(A_i) = \min V(S_i \geq S_k)$  untuk  $k = 1, 2, \dots, n$ . Sehingga diperoleh bobot prioritas vektor dengan Persamaan 2.22:

$$W' = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n))^T \quad (2.22)$$

Langkah 8: Normalisasi nilai bobot prioritas vektor

Normalisasi nilai bobot vektor diperlukan hingga mendapatkan nilai bobot vektor yang ternormalisasi sebagai berikut:

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T \quad (2.23)$$

Langkah 9: Menghitung bobot prioritas global dan peringkat dari masing-masing elemen

Bobot prioritas global dihitung dengan mengalikan bobot vektor fuzzy dari kriteria, sub-kriteria dan alternatif yang dinilai. Peringkat elemen ditentukan dengan mengurutkan nilai bobot prioritas global dari yang tertinggi hingga ke terendah.

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Penelitian mengenai optimasi sistem *building attach photovoltaik* (BAPV) dengan algoritma Fuzzy-AHP dan AHP untuk studi kasus Gedung-gedung Teknik Elektro UNNES telah berhasil dilakukan. Lima desain sistem BAPV terkoneksi dengan *grid* dan baterai serta lima desain sistem BAPV terkoneksi dengan *grid* telah disajikan dan telah dianalisis. Desain sistem BAPV dirancang dengan lima teknologi fotovoltaik yang sudah ada, seperti m-Si, p-Si, CdTe, HIT, dan CIS. Optimasi dilakukan berdasarkan penilaian kriteria dan sub-kriteria yang dibangun sebagai hirarki guna mencapai pemilihan desain sistem BAPV yang paling optimal.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa faktor teknis menjadi pertimbangan utama dalam mendesain sistem BAPV dengan bobot prioritas sebesar 32%. Faktor *sizing system* kurang menjadi pertimbangan dalam mendesain sistem BAPV dengan bobot prioritas sebesar 16%. Berdasarkan pertimbangan kriteria dan sub-kriteria, Fuzzy-AHP dan AHP menentukan bahwa alternatif desain ke-4 adalah pilihan desain sistem BAPV dengan yang layak untuk diimplementasikan di studi kasus. Pilihan kedua adalah alternatif desain ke-2.

Alternatif desain ke-4 pada sistem BAPV terkoneksi *grid* dan baterai untuk Gedung E11 tersusun dari 210 modul surya berjenis *mono-crystalline* dan 3 baterai AC dengan prediksi *output energy system* sebesar 93,43kW<sub>H</sub>/tahun. Pada sistem BAPV terkoneksi dengan *grid* untuk Gedung E6+E8 tersusun dari 90 modul surya



berjenis *mono-crystalline* dengan prediksi *output energy system* sebesar 40,2kWh/tahun. Analisis sensitivitas teknis menunjukkan bahwa hasil simulasi memiliki *mismatch* dengan hasil riil. Oleh karena itu parameter penilaian dari hasil simulasi dalam penelitian ini akan memiliki nilai yang berbeda ketika diimplementasikan. Analisis sensitivitas ekonomi menunjukkan bahwa implementasi sistem BAPV dapat dikatakan layak apabila harga jual energi listrik ke PLN sebesar Rp 2.040 untuk skenario-1 dan Rp 1.640 untuk skenario-2. Harga jual tersebut mampu menutup biaya investasi sistem BAPV yang dirancang.

## 5.2 Saran

Optimasi sistem BAPV dengan Fuzzy-AHP untuk studi kasus Gedung-gedung Teknik Elektro UNNES memiliki beberapa saran untuk pengembang dan penelitian selanjutnya, yaitu:

1. Untuk mendukung UNNES sebagai universitas konservasi, konsep sistem BAPV dapat diimplementasikan di seluruh gedung menggunakan fotovoltaik jenis *mono-crystalline* dan diorientasikan ke utara. Pembangunan gedung baru di UNNES diprioritaskan menghadap ke utara guna mendapatkan kinerja fotovoltaik yang optimal.
2. Alternatif desain sistem BAPV ke-4 yang dirancang dalam penelitian ini dapat diimplementasikan untuk Gedung-gedung Teknik Elektro UNNES.
3. Berdasarkan analisis sensitivitas ekonomi, diperlukan kajian lebih lanjut agar waktu pengembalian modal lebih cepat, sehingga pengembangan sistem BAPV lebih banyak diminati oleh masyarakat.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aaditya, G., Rao, R.R. & Mani, M. 2017. Integrability Comparison between BIPV and BAPV in Tropical Conditions : A Bangalore Case - study. *2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*. IEEE, hal.604–607.
- Allouhi, A., Saadani, R., Kousksou, T., Saidur, R., Jamil, A. & Rahmoune, M. 2016. Grid-connected PV system installed on institutional buildings : Technology comparison, energy analysis and economic performance. *Energy & Buildings*.
- Amin, I., Harun, N. & Suyuti, A. 2016. *Indonesia Berbasis Analisis RETScreen International: The Study of Renewable Energy Potential in Eastern. Skripsi*.
- Anonim, 2014. Model Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Terpadu Dengan Baterai Terhubung Jaringan Listrik. *Saintekno*, 12(2): 147–158.
- Ar, R., Gunawan, N. & B, I.C. 2013. Analisa Performansi dan Monitoring Solar Photovoltaic System Pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya Di Tuban Jawa Timur. *Teknik Pomits*, 1–8.
- Attari, K., Elyakoubi, A. & Asselman, A. 2016. Performance analysis and investigation of a grid-connected photovoltaic installation in Morocco. *Energy Reports*, 2(December 2015): 261–266.
- Azizkhani, M., Vakili, A., Noorollahi, Y. & Naseri, F. 2016. Potential survey of photovoltaic power plants using Analytical Hierarchy Process ( AHP ) method in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (May): 0–1.
- Baitule, A.S., Sudhakar, K. & Centre, E. 2017. Solar powered green campus : a simulation study. *International Journal of Low-Carbon Technoogier*, 12(August): 400–410.
- Barua, S., Prasath, R.A. & Boruah, D. 2017. Rooftop Solar Photovoltaic System Design and Assessment for the Academic Campus Using PVsyst Software. *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*, 5(1): 76–83.
- Biyik, E., Araz, M., Hepbasli, A., Shahrestani, M., Yao, R., Shao, L., Essah, E., Oliveira, A.C., Rico, E., Luis, J., Andrade, L., Mendes, A. & Baver, Y. 2017. Review of building integrated photovoltaic ( BIPV ) systems. *Engineering Science and Technology*, 20(3): 833–858.
- Bojic, M., Radulovic, J., Rankovic, V., Nikolic, D., Bojic, L. & Skerlic, J. 2016. Flexible Thim-Film Solar Photovoltaics: Research and Application. 37–40.
- BPSR 2017. *67 th edition BP Statistical Review of World Wide Energy*.
- Chandra, T.P., Cahayahati & Nisja, I. 2018. Perbandingan Ekonomis Biaya Listrik Kampus I Universitas Bung Hatta (PLN, Diesel, PLTS). *Jurnal Bung Hatta*, 1(2): 13–28.
- Chang, D. 1996. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 2217(95).
- Charfi, W., Chaabane, M., Mhiri, H. & Bournot, P. 2018. Performance evaluation of a solar photovoltaic system. *Energy Reports*, 4: 400–406.
- Chen, C.J. 2011. *Physics of Solar Energy*. Columbia: Wiley. Inc.
- Chowdhury, S. 2016. *Design & Estimation of Rooftop Grid-tied Solar Photovoltaic System*. Technische Universitat Hamburg.
- Dondariya, C., Porwal, D., Awasthi, A. & Kumar, A. 2018. Performance simulation of grid-connected rooftop solar PV system for small households : A case study of Ujjain , India. *Energy Reports*, 4: 546–553.
- Dwi, T. 2013. Façade and rooftop PV installation strategy for building integrated photo voltaic application. *Physics Procedia*, 32: 105–114.
- Erdogan, D. 2009. *Research on Building Integrated Photovoltaic Systems and Their Performance Evaluation*.
- Erge, T., Weiß, W., Porvoo, F.I.N. & Royer, J. n.d. *Photovoltaic in Building: A Design*

- Handbook for Architects and Engineers*. 16 ed. Germany: XYZ Publishing Company.
- Freeman, J., Whitmore, J., Blair, N. & Dobos, A.P. 2014. Validation of multiple tools for flat plate photovoltaic modeling against measured data. *2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference*, (August): 1932–1937.
- Garni, H.Z. Al, Member, I.S. & Awasthi, A. 2017. A Fuzzy AHP and GIS-based Approach to Prioritize Utility-Scale Solar PV Sites in Saudi Arabia. *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*.
- Gindi, E. 2017. ScienceDirect ScienceDirect ScienceDirect ScienceDirect Building Photovoltaic Retrofitting in Buildings Building Integrated Integrated Photovoltaic Retrofitting in Office Office Buildings Salwa Salwa the Assessing feasibility of Reda using the , heat temp. *Energy Procedia*, 115: 239–252.
- Guevara, E.G.L. 2017. *Design of an Off-grid PV System for Households in Perú and Sweden*. Halmstad University.
- Gunawardana, A.G.B.S. 2014. Proper Sizing of Energy Storage for Grid Connected Photovoltaic System.
- Harun, E.H., Ilham, J., Kamil, M., Elektro, T., Teknik, F. & Negeri, U. 2015. Potensi Hybrid Energy di Kabupaten Bone Bolango dan Kabupaten Gorontalo. 4(2).
- Hashim, S.M. 2018. An Economic Evaluation of Grid Connected Photovoltaic System for a Residential House in Khartoum. *International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEEE)*. IEEE, hal.1–6.
- Hidayat, F., Winardi, B. & Nugroho, A. 2019. Analisis Ekonomi Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Di Departemen Teknik Elektro Universitas Diponegoro. *Transient*, 7(4): 875.
- Hongxing, Y. & Yutong, L. 2019. Potential of building-integrated photovoltaic applications. *International Journal of Low Carbon*, 250–261.
- Indonesia, B. 2019. *BI 7-day (Reverse) Repo Rate*.
- Ismail, H., Mathew, S., Aloka, S., Narayanaswamy, B., Ming, L.C. & Hussain, S.A. 2016. Comparative Performance of Grid Integrated Solar Photovoltaic Systems Under the Tropical Environment. 1–6.
- Jäger-Waldau, A. 2017. Snapshot of photovoltaics-March 2017. *Sustainability*, 9(5): 1–9.
- Jayanth, K.G. & Venkatesh, B. 2017. Performance Analysis of Solar Module with Climatic Data. 3468–3476.
- Kaya, İ., Çolak, M. & Terzi, F. 2019. A comprehensive review of fuzzy multi criteria decision making methodologies for energy policy making. *Energy Strategy Reviews*, 24(March): 207–228.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral 2018. *Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 49 Tahun 2018 tentang Penggunaan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atas oleh Konsumen PT Perusahaan Listrik Negara (PLN)*.
- Khatri, R. 2016. Design and assessment of solar PV plant for girls hostel ( GARGI ) of MNIT University , Jaipur city. *Energy Reports*, 2: 89–98.
- Klever, M. 2018. Design and simulation of a grid- connected PV system in South Africa: technical, commercial and economical aspects. *Master Thesis*.
- Kramer, W., Chakraborty, S., Kroposki, B. & Thomas, H. 2008. *Advanced Power Electronic Interfaces for Distributed Energy Systems Part I : Systems and Topologies*
- Kumar, A., Singh, A.R., Deng, Y., He, X., Kumar, P. & Bansal, R.C. 2019a. Integrated assessment of a sustainable microgrid for a remote village in hilly region. *Energy Conversion and Management*, 180(October 2018): 442–472. Tersedia di

- <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.084>.
- Kumar, M., Pina, A., Ferrão, P., Fournier, J., Lacarrière, B. & Corre, O. Le 2017. ScienceDirect ScienceDirect ScienceDirect Optimal energy performance and comparison of open rack and roof mount mono c-Si photovoltaic Systems Assessing the feasibility of using the heat demand-outdoor Nallapaneni function Reddy heat temperature for distr. *Energy Procedia*, 117: 136–144.
- Kumar, N.M., Sudhakar, K. & Samykan, M. 2019b. Performance comparison of BAPV and BIPV systems with c-Si, CIS and CdTe photovoltaic technologies under tropical weather conditions. *Case Studies in Thermal Engineering*, 13(December 2018): 100374. Tersedia di <https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.100374>.
- Kuthanazhi, V. & Rao, A.B. 2012. Selection of Photovoltaic Modules for Off-Grid Rural Application Based on Analytical Hierarchy Process ( AHP ). *IEEE*, 2888–2893.
- Lalwani, M., Kothari, D.. & Singh, M. 2010. Investigation of Solar Photovoltaic Simulation Softwares. *International Journal of Applied Engineering Research, Dindigul*, 1(3): 585–601.
- Lee, B., Trcka, M. & Hensen, J.L.M. 2014. Rooftop photovoltaic ( PV ) systems : a cost – benefit analysis study of industrial halls. (March 2013): 319–326.
- Li, C. 2018. Comparative Performance Analysis of Grid-Connected PV Power Systems with Different PV Technologies in the Hot Summer and Cold Winter Zone. *International Journal of Photoenergy*, 1–9.
- Mabrouk, S. Ben, Oueslati, H., Mabrouk, A. Ben, Zizzo, G., La Cascia, D., Dusonchet, L., Favuzza, S. & Massaro, F. 2017. Simulation of Photovoltaic Installation Connected to Grid with Storage System. *Energy Procedia*, 139: 609–616. Tersedia di <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.261>.
- Madessa, H.B. 2015. Performance analysis of roof-mounted photovoltaic systems - the case of a Norwegian residential building. *Energy Procedia*, 83: 474–483. Tersedia di <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.167>.
- Ministerial of Energy and Mineral Resources 2018. *Ministerial Decree Number 1772 K/20/MEM/2018*.
- Morrison, I.B., Mottillo, M., Ferguson, A., Ribberink, H., Yang, L. & Haddad, K. 2006. The Simulation of A Renewable Energy-Powered-Hydrogen-Based Residential Electricity System. *Simbuild*, 67–74.
- Nag, S., Kundu, S., Sinha, D., Roychowdhury, S. & Mukherjee, P. 2016. A Comparative-Techno Economic Feasibility Study between Roof-Top and Building Integrated Photovoltaic Technology for Development of Green Campus. *IEEE*.
- Ooi, J., Promentilla, M.A.B., Tan, R.R., Ng, D.K.S. & Chemmangattualappil, N.G. 2017. Integration of Fuzzy Analytic Hierarchy Process into Multi-objective Computer Aided Molecular Design. *Computers and Chemical Engineering*.
- Palacios-jaimés, G.Y., Martín-ramos, P., Rey-martínez, F.J. & Fernández-coppel, I.A. 2020. Transformation of a University Lecture Hall in Valladolid ( Spain ) into a NZEB : LCA of a BIPV System Integrated in Its Façade. *International Journal of Photoenergy*, 2017(2).
- Parida, B., Iniyán, S. & Goic, R. 2011. A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3): 1625–1636.
- Powerwall, T. n.d. P O W E R W A L L Tesla Powerwall is a fully-integrated AC battery system.
- Pradita, A.C. 2018. Analisis Perencanaan Audit Energi Untuk Efisiensi Energi Listrik Berbasis Window dengan Software LEAP. *Jurnal Teknik Elektro*, 1(September): 2–9.
- PVPS, I. 2017. *Snapshot of Global Photovoltaic Markets*.

- Raj, A., Gupta, M. & Panda, S. 2016. Design Simulation and Performance Assessment of Yield and Loss Forecasting for 100 KWp Grid Connected Solar PV System. *International Conference on Next Generation Computing Technologies*. IEEE.
- Ridho, M.A., Winardi, B. & Nugroho, A. 2019. Analisis Potensi Dan Unjuk Kerja Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Di Departemen Teknik Elektro Universitas Diponegoro Menggunakan Software Pvsyst 6.43. *Transient*, 7(4): 883.
- Saaty, T.L. 1990. How to make a decision : The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, 48.
- Sagbansua, L. & Balo, F. 2017. A Multi-Criterion Analysis for Choosing Photovoltaic Panel. *International Journal of Engineering*, 2(4).
- Sakiliba, S.K., Hassan, A.S., Wu, J., Sanneh, E.S. & Ademi, S. 2015. Assessment of Stand-Alone Residential Solar Photovoltaic Application in Sub-Saharan Africa : A Case Study of Gambia. *International Journal of Photoenergy*, 2015: 1–10.
- Setiawan, I.K.A., Kumara, I.N.S. & Sukerayasa, I.W. 2014. Analisis Unjuk Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya Satu MWP Terinterkoneksi Jaringan di Kayubih, Bangli. *Majalah Ilmiah Teknik Elektro*, 13(1): 27–33.
- Sharma, R. & Goel, S. 2017. Performance analysis of a 11 . 2 kWp roof top grid-connected PV system in Eastern India. *Energy Reports*, 3: 76–84.
- Shukla, A.K., Sudhakar, K. & Baredar, P. 2016. Simulation and performance analysis of 110 kW p grid-connected photovoltaic system for residential building in India : A comparative analysis of various PV technology. *Energy Reports*, 2: 82–88.
- Singh, J. 2010. *Study and Design Grid COnnected Solar Photovoltaic System at Patiala, Punjab*. Thapar University.
- Spertino, F., Chicco, G., Ciocia, A., Corgnati, S., Leo, P. Di & Raimondo, D. 2015. Electricity Consumption Assessment and PV System Integration in Grid-Connected Office Buildings.
- Tarigan, E. 2018. Simulation and feasibility studies of rooftop PV system for university campus buildings in Surabaya, Indonesia. *International Journal of Renewable Energy Research*, 8(2): 895–908.
- Wang, Y., Li, M., Hassanien, R., Hassanien, E., Ma, X. & Li, G. 2018. Photovoltaic System : The Comprehensive Case Study of the 120kWp Plant in Kunming , China. *Journal of Photoenergy*, 1–9.
- Yassin, M.A., Kolhe, M., Sharma, A. & Garud, S. 2017. Battery Capacity Estimation for Building Integrated Photovoltaic System : The Design Study for Different Geographical Location (s) Assessing the feasibility of using the heat demand-outdoor temperature function for a long-term district heat demand forecas. *Energy Procedia*, 142: 3433–3439.
- Ye, J.Y., Reindl, T., Aberle, A.G. & Walsh, T.M. 2014. Performance Degradation of Various PV Module Technologies in Tropical Singapore. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 4(5): 1288–1294.
- Yilmaz, S. & Ozcalik, hasan R. 2015. Performance analysis of a 500-kWp grid-connected solar photovoltaic power plant in Kahramanmara ,. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Science*, 23: 1946–1957.
- Zeacsen 2018. *Perancangan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya di Nogotirto Algae Park, Gamping, Sleman, Yogyakarta*. Universitas Gajah Mada.
- Zeman, M. 2010. Thin Film Silicon PV Technology. *Journal of Electrical Engineering*, 61(5): 271–276.
- Zhao, H., Guo, S. & Zhao, H. 2018. Comprehensive assessment for battery energy storage systems based on fuzzy-MCDM considering risk preferences. *Energy*.