



**PENGEMBANGAN POTENSI ENERGI MATAHARI SEBAGAI  
ENERGI LISTRIK BERWAWASAN LINGKUNGAN  
PADA AREA ATAP FOTOVOLTAIK PERMUKIMAN  
PROVINSI JAWA TENGAH**

**Djoko Adi Widodo**

**UNIVERSITAS DIPONEGORO**

**SEMARANG**

**2020**



**PENGEMBANGAN POTENSI ENERGI MATAHARI SEBAGAI  
ENERGI LISTRIK BERWAWASAN LINGKUNGAN  
PADA AREA ATAP FOTOVOLTAIK PERMUKIMAN  
PROVINSI JAWA TENGAH**

**Disertasi  
Untuk memperoleh gelar Doktor  
dalam Ilmu Lingkungan**

**Untuk dipertahankan di hadapan  
Rapat Senat Terbuka Terbatas Universitas Diponegoro  
Pada tanggal 4 Desember 2020 pukul 13.00 wib**

**Oleh  
Djoko Adi Widodo  
NIM 30000214510005**

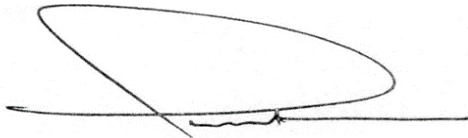
## LEMBAR PENGESAHAN

# PENGEMBANGAN POTENSI ENERGI MATAHARI SEBAGAI ENERGI LISTRIK BERWAWASAN LINGKUNGAN PADA AREA ATAP FOTOVOLTAIK PERMUKIMAN PROVINSI JAWA TENGAH

**Djoko Adi Widodo**  
**NIM 3000214510005**

**Telah disetujui oleh:**

Promotor:



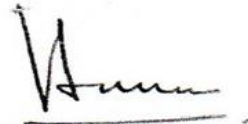
Prof. Dr. Ir. Purwanto, DEA.  
NIP.196112281986031004

Sekolah Pasacasarjana  
Universitas Diponegoro



Dr. R.B. Sularto, S.H., M.Hum.  
NIP. 196701011991031005

Ko Promotor:



Dr. Ir. Hermawan, DEA.  
NIP. 196002231986021001

Program Studi Doktor Ilmu Lingkungan  
Sekolah Pascasarjana  
Universitas Diponegoro



Dr. Hartuti Purnaweni, MPA  
NIP.196112021988032009

**PENGEMBANGAN POTENSI ENERGI MATAHARI SEBAGAI  
ENERGI LISTRIK BERWAWASAN LINGKUNGAN  
PADA AREA ATAP FOTOVOLTAIK PERMUKIMAN  
PROVINSI JAWA TENGAH**

Oleh  
**Djoko Adi Widodo**  
NIM 30000214510005

**Telah disetujui oleh:**

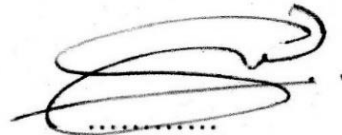
**Pimpinan Sidang :**

Dr. R.B. Sularto, S.H., M.Hum.



**Sekretaris Sidang :**

Dr. Ing. Sudarno, M.Sc.



**Anggota Tim Penguji :**

Dr. R.B. Sularto, S.H., M.Hum



Dr. Ing. Sudarno, M.Sc.



Dr. Rohmad Hadiwijoyo, M.T.

*Rohmad Hadiwijoyo*  
.....

Mochammad Facta, S.T., M.T., Ph.D.



Dr. Ir. Hermawan, DEA.

Prof. Dr. Ir. Purwanto, DEA

## PERNYATAAN ORISINALITAS

Nama : Djoko Adi Widodo  
NIM : 30000214510005  
Mahasiswa : Program Studi Doktor Ilmu Lingkungan  
Pascasarjana Universitas Diponegoro

Dengan ini menyatakan bahwa:

1. Disertasi yang berjudul **“Pengembangan Potensi Energi Matahari Sebagai Energi Listrik Berwawasan Lingkungan Pada Area Atap Fotovoltaik Permukiman Provinsi Jawa Tengah”** adalah karya ilmiah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik (doktor) di perguruan tinggi manapun.
2. Disertasi ini adalah murni ide, rumusan, dan hasil penelitian saya serta dilakukan tanpa bantuan orang lain, kecuali Tim Promotor dan narasumber.
3. Disertasi ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali secara tertulis dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan judul aslinya serta dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Pernyataan ini dibuat dengan sesungguhnya dan apabila dikemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah saya peroleh, dan sanksi lain sesuai dengan norma yang berlaku di Universitas Diponegoro.

Semarang, 4 Desember 2020  
Yang Membuat Pernyataan

Djoko Adi Widodo

## KATA PENGANTAR

Seraya mengucapkan alhamdulillahirabbil'alamin, puji syukur kehadiran Allah *Subhanahu wa ta'ala* atas segala rahmat, berkah, kasih sayang, kemudahan dan hidayah-Nya kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan penyusunan Disertasi yang diajukan sebagai syarat yang harus dipenuhi untuk mencapai derajat Doktor pada program Doktor Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana Universitas Diponegoro. Adapun Disertasi yang disusun berjudul "Pengembangan Potensi Energi Matahari sebagai Energi Listrik Berwawasan Lingkungan Pada Area Atap Fotovoltaik Permukiman Provinsi Jawa Tengah".

Disertasi ini terselesaikan tidak lepas dari peran serta dan dukungan dari berbagai pihak baik dalam bentuk materi, ide, saran, bimbingan, dan semangat. Untuk itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Dr. R.B. Sularto, S.H., M.Hum., sebagai Dekan Sekolah Pascasarjana Universitas Diponegoro Semarang;
2. Prof. Dr. Ir. Purwanto, DEA., selaku Promotor Utama yang telah memberikan arahan, bimbingan dan petunjuk dalam penyusunan Rancangan Disertasi ini;
3. Dr. Hartuti Purnaweni, MPA Ketua Program Doktor Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana Universitas Diponegoro Semarang;
4. Dr.Ir. Hermawan, DEA., selaku Co Promotor yang telah memberikan arahan, bimbingan dan petunjuk dalam penyusunan Rancangan Disertasi ini;
5. Segenap staf pengajar dan pengelola Program Doktor Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana Universitas Diponegoro Semarang;

6. Ayahanda, Ibunda tercinta, Istri dan anak-anakku tersayang serta keluarga yang telah memberikan doa, dorongan moril selama kuliah dan penyusunan Rancangan Disertasi ini;
7. Rekan-rekan seangkatan Program DIL-8 Universitas Diponegoro Semarang; dan semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu pada kesempatan ini yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan Rancangan Disertasi ini.

Penulis menyadari bahwa Disertasi ini belum sempurna karena keterbatasan pengetahuan penulis, semoga dapat bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan, Masyarakat dan Pemerintah.

Semarang, 4 Desember 2020

Peyusun

Djoko Adi Widodo

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENJELASAN JUDUL .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
HALAMAN PERSETUJUAN .....	iv
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	v
KATA PENGANTAR .....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	x
DAFTAR TABEL.....	xi
SINGKATAN .....	xii
ABSTRAK .....	xiv
ABSTRACT.....	xv
RINGKASAN .....	xvi
SUMMARY .....	xxi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang .....	1
B. Perumusan Masalah.....	7
C. Orisinilitas Penelitian .....	11
D. Tujuan Penelitian .....	23
D.1 Tujuan Umum.....	23
D.2 Tujuan Khusus.....	23
E. Manfaat Penelitian .....	24
E.1. Manfaat bagi Ilmu Pengetahuan .....	24
E.2. Manfaat bagi Pemerintah .....	24
E.3. Manfaat bagi Masyarakat.....	24
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	27
A. Model Radiasi Matahari .....	27
B. Estimasi Luas Area Atap Permukiman .....	43
C. Produksi Energi Listrik Sistem Atap Fotovoltaik Permukiman .....	47
D. Potensi Mitigasi CO <sub>2</sub> dari Pembangkit Listrik Energi Matahari .....	55
E. Konsep Berwawasan Lingkungan .....	60
BAB III KERANGKA TEORI, KERANGKA KONSEP .....	65
A. Kerangka Teori.....	65
B. Kerangka Konsep .....	72



BAB IV METODE PENELITIAN.....	77
A. Tempat dan Waktu Penelitian.....	77
A.1 Tempat Penelitian .....	77
A.2 Waktu Penelitian .....	77
B. Desain Penelitian.....	77
C. Populasi dan Sampel .....	78
D. Variabel Penelitian.....	79
E. Materi Penelitian .....	81
F. Teknik Pengumpulan Data .....	81
G. Alur Penelitian .....	83
H. Pengolahan dan Analisis Data .....	85
I. Jadwal Kegiatan Penelitian .....	92
 BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN .....	 94
A.1 Iradiasi Matahari .....	94
A.2 Peta Iradiasi Matahari .....	97
A.3 Area Permukaan Atap Permukiman .....	99
A.4 Produksi Energi Listrik Sistem Atap Fotovoltaik Permukiman .....	101
A.5 Potensi Mitigasi Emisi CO <sub>2</sub> .....	105
 BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN.....	 110
A. Kesimpulan .....	110
B. Saran.....	112
 DAFTAR PUSTAKA.....	 113

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Roadmap Konsep Pengembangan Energi Matahari sebagai Energi Listrik .....	26
Gambar 2.1 Radiasi matahari .....	30
Gambar 2.2 Peta Radiasi Matahari di Indonesia.....	34
Gambar 2.3 Struktur jaringan MLP pada JST .....	36
Gambar 2.4 Implementasi JST dalam prediksi radiasi matahari .....	38
Gambar 2.5 Struktur jaringan MLP pada JST .....	39
Gambar 2.6 Struktur JST dengan 16 Lapisan <i>Hidden Layer</i> .....	40
Gambar 2.7 Salah satu atap miring pada lokasi studi kasus .....	44
Gambar 2.8 Hasil Ekstraksi Lahan Atap Berbasis AFE ( <i>Automated Feature Extraction</i> ) .....	46
Gambar 2.9 Hasil Ekstraksi Bangunan Atap dari Google Earth .....	47
Gambar 2.10 Hirarki Estimasi Potensi Energi Listrik Berbasis Sistem Fotovoltaik .....	51
Gambar 2.11 Estimasi Potensi Sistem Fotovoltaik di Taiwan .....	52
Gambar 2.12 Perbandingan penggunaan lahan PLTS skala besar dan pembangkit listrik batubara .....	59
Gambar 3.1 Teknologi Energi Matahari .....	70
Gambar 3.2 Kerangka Estimasi Energi Listrik Bersumber Energi Matahari .....	73
Gambar 3.3 Diagram Kerangka Konsep .....	75
Gambar 4.1 Alur Penelitian .....	84
Gambar 4.2 Diagram Alir Pengolahan Data .....	85
Gambar 4.3 Model Jaringan Saraf Tiruan .....	86
Gambar 4.4 Arsitektur Jaringan Saraf Tiruan untuk Prediksi Iradiasi Matahari .....	87
Gambar 4.5 Flowchart Estimasi Iradiasi Matahari Global Harian .....	88
Gambar 4.6 Alur Estimasi Penggunaan Lahan dan Area Atap Permukiman .....	90
Gambar 5.1 Profil Iradiasi Matahari Harian di 35 Kabupaten dan Kota .....	94
Gambar 5.2 Profil Iradiasi Matahari Bulanan di Provinsi Jawa Tengah .....	95
Gambar 5.3 Peta Iradiasi Matahari di 35 Kabupaten dan Kota .....	96
Gambar 5.4 Profil Luas Area Permukaan Atap dengan Proporsi 5 Persen .....	99
Gambar 5.5 Profil Energi Listrik di 35 Kabupaten dan Kota .....	102
Gambar 5.6 Profil Energi Listrik Bulanan di Provinsi Jawa Tengah .....	103
Gambar 5.7 Profil Mitigasi CO <sub>2</sub> di 35 Kabupaten dan Kota .....	106
Gambar 5.8 Profil Mitigasi CO <sub>2</sub> di Provinsi Jawa Tengah .....	107
Gambar 5.9 Profil Fotovoltaik Atap Permukiman di 35 Kabupaten dan Kota .....	107

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tingkat potensi dampak lingkungan negatif dari teknologi surya .....	57
Tabel 2.2. Indikator lingkungan dan sosial dari <i>Solar Energy Technologies</i> .....	58
Tabel 4.1 Definisi Operasional Variabel .....	80
Tabel 4.2 Teknik Pengumpulan Data .....	82
Tabel 4.3 Alur Penelitian.....	83
Tabel 4.4 Rencana Jadwal Kegiatan Penelitian.....	93

## SINGKATAN

UU	:	Undang – Undang
SDM	:	Sumber Daya Manusia
KWh	:	Kilowatt Hours
PLTS	:	Pembangkit Listrik Tenaga Surya
MW	:	Megawatt
PLN	:	Perusahaan Listrik Negara
GWh	:	Gigawatt Hours
MWh	:	Megawatt Hours
ToE	:	<i>Tonne Of Oil Equivalent</i>
BAU	:	<i>Business As Usual</i>
KEN	:	Kebijakan <i>Energi</i> Nasional
DEN	:	Dewan <i>Energi</i> Nasional
KVA	:	Kilovolt Ampere
JST	:	Jaringan Syaraf Tiruan
MAPE	:	<i>Mean Absolute Percentage Error</i>
RMSE	:	<i>Root Mean Square Error</i>
MBE	:	<i>Mean Bias Error</i>
GSR	:	<i>Global Solar Radiation</i>
PVGIS	:	<i>Photovoltaic Geographical Information System</i>
PV	:	<i>Photovoltaic</i>
SIG	:	Sistem Informasi Geografis
LIDAR	:	<i>Light Detection And Ranging</i>
ANN	:	<i>Artificial Neural Network</i>
EBT	:	Energi Baru Terbarukan

WEO	:	<i>World Energy Outlook</i>
CSP	:	<i>Concentrated Solar Power</i>
CO <sub>2</sub> (e)	:	Karbon Dioksida Ekivalen
TW	:	Terawatt
BIPV	:	<i>Building Integrated Photovoltaic</i>
TWh	:	Terawatt Hours
MWp	:	Mega Watt Peak
TEP	:	<i>Tucson Electric Power</i>
APP	:	<i>Appsolar Energy</i>
SHS	:	<i>Solar House System</i>
DSSC	:	<i>Dye Sensitized Solar Cell</i>
CPV	:	<i>Concentrated Photovoltaic</i>
WP	:	Watt Peak
NASA	:	<i>National Aeronautics And Space Administration</i>
BPS	:	Badan Pusat Statistik
BMKG	:	Badan Meteorologi, Klimatologi, Dan Geofisika
PJU	:	Penerangan Jalan Umum
GRK	:	Gas Rumah Kaca
RAD	:	Rencana Aksi Daerah
CSP	:	<i>Concrentrated Solar Power</i>
IDW	:	<i>Inverse Distance Weighted</i>
RTRW	:	Rencana Tata Ruang Wilayah

## Abstrak

Kebutuhan untuk mengurangi karbon dioksida dari produksi energi listrik berbasis bahan bakar fosil telah menjadi perhatian dunia. Selama satu dekade terakhir, penyediaan energi listrik di Indonesia masih didominasi penggunaan energi fosil yang mengeluarkan lebih banyak karbon dioksida. Indonesia menandatangani Protokol Kyoto untuk menurunkan emisi global. Indonesia memiliki potensi energi bersih bersumber energi matahari lebih dari 207 GW tersebar di seluruh wilayah yang dapat dikonversi menjadi energi listrik. Penelitian ini akan mengkaji intensitas iradiasi matahari, atap permukiman, potensi listrik sistem fotovoltaiik atap permukiman dan pengalihan karbon dioksida dari sistem fotovoltaiik. Tujuan utama penyelidikan untuk mendapatkan panen potensi produksi listrik dari atap fotovoltaiik permukiman, mitigasi karbon dioksida dari sistem energi listrik bersumber dari matahari dan peta iradiasi matahari. Teknologi tenaga matahari bergantung pada cuaca sangat penting peta iradiasi suatu wilayah berkaitan dengan pengembangan tenaga matahari. Lokasi studi kasus di Wilayah Provinsi Jawa Tengah, populasi penelitian semua wilayah administrasi terdiri 29 Kabupaten dan 6 Kota. Penelitian ini sangat penting mengingat konsumsi energi listrik Provinsi Jawa Tengah dalam konteks sistem ketenagalistrikan Nasional sebagian besar masih berbasis energi fosil yang mengeluarkan banyak karbon dioksida. Jawa Tengah memiliki potensi energi matahari tersebar seluruh wilayah, komitmen serta regulasi pengembangan dalam bentuk Peraturan Daerah. Bagaimanapun energi listrik memiliki peran yang sangat vital dan strategis bagi ketahanan dan kemandirian energi daerah. Potensi iradiasi matahari yang melintasi atap permukiman setiap wilayah diprediksi berdasar data historis meteorologi seperti suhu lingkungan, kelembaban relatif, kecepatan angin, curah hujan, *latitude*, *longitude*, *altitude*. Data dikumpulkan selama 5 tahun dari 1 Januari 2014 hingga 31 Desember 2018 diperoleh dari situs web meteorologi Permukaan NASA dan Energi Surya. Analisis penelitian menggunakan metode jaringan saraf tiruan, analisis spasial, interpolasi *inverse distance weighting*, dan analisis faktor emisi. Temuan penelitian angka rata-rata iradiasi harian semua wilayah Kabupaten dan Kota sebesar 5,05 kWh/m<sup>2</sup>/hari dengan rentang 4,40 sampai 5,54 kWh/m<sup>2</sup>/hari. Sebaran area atap permukiman masing-masing wilayah Kabupaten dan Kota berkisar 3.237.066 m<sup>2</sup> sampai 39.163.319 m<sup>2</sup>. Panen produksi energi listrik terendah wilayah Kota Magelang sebesar 3.122 MWh/tahun, tertinggi wilayah Kabupaten Cilacap mencapai 250.621 MWh/tahun. Potensi pengalihan karbon dioksida terendah 2.264 tonCO<sub>2</sub>/tahun, tertinggi 167.723 tonCO<sub>2</sub>/tahun. Kebaharuan penelitian temuan peta iradiasi atau peta insolasi wilayah Provinsi Jawa Tengah berdasar analisis jaringan saraf tiruan dan interpolasi *inverse distance weighting*. Temuan penelitian diusulkan agar digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam perencanaan penerapan energi matahari sebagai bagian dari sistem penyediaan energi listrik di Provinsi Jawa Tengah. Melakukan kajian evaluasi terhadap eksploitasi energi matahari yang telah dilakukan di wilayah Kabupaten dan Kota dalam rangka penyediaan energi listrik rendah karbon bersumber energi matahari wilayah lokal.

Kata Kunci: energi matahari, peta iradiasi, atap permukiman, fotovoltaiik, karbon dioksida.

## Abstract

The need to reduce carbon dioxide from fossil fuel-based electrical energy production has become a global concern. During the last decade, the supply of electrical energy in Indonesia is still dominated by the use of fossil energy which emits more carbon dioxide. Indonesia signed the Kyoto Protocol to reduce global emissions. Indonesia has the potential for clean energy from solar energy of more than 207 GW scattered throughout the region which can be converted into electricity. This research will examine the intensity of solar irradiation, residential roofs, the electric potential of residential roof photovoltaic systems and the transfer of carbon dioxide from photovoltaic systems. The main objectives of the investigation are to obtain a potential harvest of electricity production from residential photovoltaic rooftops, mitigation of carbon dioxide from solar-sourced electrical energy systems and solar irradiation maps. Solar power technology that depends on the weather is considered very important for the irradiation map of an area related to the development of solar power. The location of the case study is in the Central Java Province, the research population of all administrative areas consists of 29 districts and 6 cities. This research is very important considering that the electricity consumption of Central Java Province in the context of the National electricity system is mostly still based on fossil energy which emits a lot of carbon dioxide. Central Java has the potential for solar energy to spread throughout the region, commitment and development regulations in the form of Regional Regulations. However, electrical energy has a very vital and strategic role for regional energy resilience and independence. The potential for solar irradiation that crosses the residential roofs of each area is predicted based on historical meteorological data such as environmental temperature, relative humidity, wind speed, rainfall, latitude, longitude, altitude. Data collected for 5 years from 1 January 2014 to 31 December 2018 were obtained from NASA's Surface meteorology website and Solar Energy. The research analysis used artificial neural network method, spatial analysis, inverse distance weighting interpolation, and emission factor analysis. The findings of this research are that the average daily irradiation rate of all districts and cities is 5.05 kWh / m<sup>2</sup> / day with a range of 4.40 to 5.54 kWh / m<sup>2</sup> / day. The distribution of the residential roof area of each Regency and City ranges from 3,237,066 m<sup>2</sup> to 39,163,319 m<sup>2</sup>. The lowest yield of electric energy production in Magelang City is 3,122 MWh / year, the highest in Cilacap Regency is 250,621 MWh / year. The lowest carbon dioxide transfer potential was 2,264 tons CO<sub>2</sub> / year, the highest was 167,723 tons CO<sub>2</sub> / year. The novelty of the research findings of irradiation map or insolation map of Central Java Province based on artificial neural network analysis and inverse distance weighting interpolation. The research findings are proposed to be used as consideration in planning the application of solar energy as part of the electricity supply system in Central Java Province. Conduct evaluation studies on the exploitation of solar energy that has been carried out in regencies and cities in the context of providing low-carbon electrical energy sourced from solar energy in local areas.

Keywords: solar energy, irradiation maps, residential roofs, photovoltaics, carbon dioxide.

## RINGKASAN

Konsumsi energi Nasional dari energi fosil masih mendominasi: minyak bumi 39,76%; batu bara 37,17%; gas bumi 12,94%; sedangkan dari energi baru terbarukan sekitar 9,56%. Penyediaan tenaga listrik di Indonesia diperkirakan mencapai sekitar 120 GW pada tahun 2025. Menurut kajian proyeksi emisi gas rumah kaca di tahun 2030 pada kondisi BaU sebesar 998 juta ton CO<sub>2</sub>, sedangkan proyeksi emisi pada skenario pengembangan sebesar 695 juta ton CO<sub>2</sub>. Komitmen Indonesia menurunkan emisi gas rumah kaca sebesar 29% di tahun 2030. Dari angka 29% tersebut, sektor energi mendapatkan porsi penurunan emisi sebesar 314 juta ton CO<sub>2</sub>. Pada bagian lain, di Provinsi Jawa Tengah kebutuhan energi listrik setiap tahun terus meningkat. Ditinjau dari jumlah pelanggan di tahun 2017 sebanyak 9.603.887, dalam kurun waktu 2 tahun, tahun 2019 meningkat sebanyak 11.652.121. Komposisi konsumsi energi listrik untuk Jawa Tengah mencapai 24.750,62 GWh atau sekitar 14,26% dari total konsumsi energi listrik Pulau Jawa dan sekitar 10,1% dari total konsumsi energi listrik Nasional. Tingkat emisi CO<sub>2</sub>(e) di Jawa Tengah, tahun 2008 mencapai 29.418.849 ton CO<sub>2</sub>(e), penyumbang emisi terbesar dari sektor energi 23.965.516 ton CO<sub>2</sub>(e) atau sekitar 81,4%. Dalam kurun waktu 2 tahun, pada tahun 2010 jumlah emisi mencapai 39.886.167 ton CO<sub>2</sub>(e) meningkat sekitar 35,6%. Rencana Aksi Daerah GRK Provinsi Jawa Tengah merencanakan menurunkan emisi GRK sebesar 5,7 juta ton CO<sub>2</sub>(e) atau sekitar 17,33% dari perkiraan GRK 29,97 juta ton CO<sub>2</sub>(e) pada tahun 2020.

Potensi energi terbarukan Nasional untuk dikonversi menjadi listrik mencapai 422 sampai 500 GW, sekitar 7 sampai 8 kali dari total kapasitas pembangkit terpasang saat ini. Pemerintah menargetkan bauran energi penggunaan energi baru dan terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025 dapat direalisasikan. Peran penting energi matahari yang bebas emisi karbon untuk menghasilkan energi listrik menggunakan teknologi fotovoltaik akhir-akhir ini telah menjadi perhatian. Secara geografis posisi wilayah Jawa Tengah berada pada daerah ekuator dengan penyinaran matahari tergolong merata di semua wilayah Kabupaten dan Kota. Dalam konteks pengembangan energi matahari menjadi salah satu bagian rencana strategis Provinsi Jawa Tengah sesuai dengan yang tertuang dalam Peraturan Daerah. Urgensi penelitian pengembangan energi matahari sebagai sumber listrik bagi masyarakat Jawa Tengah memanen potensi listrik bersumber energi matahari dirasa penting sebagai bagian pemberdayaan energi



bersih dari lingkungan permukiman. Dari aspek ketenagalistrikan Indonesia, pengembangan energi matahari sebagai sumber listrik sebagai langkah strategis bagi peningkatan kegiatan ekonomi, dalam rangka mencapai ketahanan dan kemandirian energi listrik Nasional yang berkelanjutan. Dalam konteks global, merupakan perwujudan upaya mengurangi emisi gas rumah kaca dari sektor produksi energi listrik dalam rangka mengantisipasi terjadinya pemanasan global.

Pengembangan sistem energi listrik berbasis teknologi fotovoltaik membutuhkan informasi utama yaitu iradiasi matahari wilayah lokal dan ketersediaan sarana eksplorasi sistem. Penelitian ini mengkaji sistem energi matahari sebagai energi listrik dengan mempertimbangkan aspek lingkungan. Target utama penelitian agar diperoleh panen potensi energi listrik sistem fotovoltaik pada area atap permukiman, potensi pengalihan karbon dioksida dan peta iradiasi matahari. Area studi wilayah Provinsi Jawa Tengah yang meliputi wilayah 29 Kabupaten dan 6 Kota. Karena itu muncul masalah penelitian yang mendasar seperti dirumuskan berikut:

1. Seberapa besar intensitas iradiasi matahari atau insolasi yang melintasi wilayah 29 Kabupaten dan 6 Kota di Provinsi Jawa Tengah?
2. Bagaimana profil peta iradiasi matahari atau insolasi wilayah 29 Kabupaten dan 6 Kota di Provinsi Jawa Tengah ?
3. Seberapa besar area atap permukiman yang tersedia untuk utilisasi modul fotovoltaik yang mencakup wilayah 29 Kabupaten dan 6 Kota di Provinsi Jawa Tengah ?
4. Seberapa besar potensi energi listrik yang dapat diproduksi dari sistem fotovoltaik surya atap yang mencakup wilayah 29 Kabupaten dan 6 Kota di Provinsi Jawa Tengah ?
5. Seberapa besar potensi mitigasi CO<sub>2</sub> dari pembangkitan listrik fotovoltaik surya atap yang mencakup wilayah 29 Kabupaten dan 6 Kota di Provinsi Jawa Tengah ?

Penelitian yang berkaitan dengan model pengembangan potensi energi surya sebagai sumber energi listrik telah banyak dilakukan. Beberapa diantaranya melakukan penelitian untuk mengukur radiasi surya selama beberapa tahun terakhir dan membuat proyeksi potensi energi surya melalui pemodelan non linier jaringan saraf tiruan. Rumbayan, et.al ( 2012) melakukan penelitian untuk mengetahui potensi teoritis penyinaran sinar matahari di Indonesia menggunakan metode jaringan saraf tiruan. Dalam penelitiannya juga dilakukan visualisasi penyinaran sinar matahari di masing-masing provinsi di wilayah Indonesia. Ling Zou, et.al

(2016) melakukan prediksi *Global Solar Radiation* di *southeast China* menggunakan metode jaringan syaraf tiruan berbasis spasial interpolasi. Sampada Kulkarni dan Rangan Banerjee (2011) melakukan pemetaan potensi energi baru terbarukan di India menggunakan pendekatan Sistem Informasi Geografis. Carl (2014) melakukan penelitian mengukur besarnya potensial fotovoltaik surya untuk panel monokristalin Solar World SW260 di atap rumah di daerah penelitian. Penelitian menggunakan data Sistem Informasi Geografis dan *Light Detection and Ranging* dengan analisis statistik untuk mengidentifikasi berapa banyak potensi fotovoltaik surya yang ada untuk atap rumah di kota Kailua Kona di Pulau Hawaii. Wong dkk., (2016) untuk memperkirakan potensi fotovoltaik di Hongkong menganalisis distribusi spasial yang memungkinkan ketika tertutup awan. Investigasi distribusi spasial awan dilakukan melalui satelit geo-stasioner. Penelitian ini telah berhasil mengestimasi spasial terperinci dari potensi energi surya di seluruh Kota.

Penelitian ini mengkaji sistem energi radiasi matahari sebagai energi listrik dalam upaya mendapatkan panen potensi energi listrik dan pengalihan karbon dioksida dengan menganalisis parameter meteorologi dan geografi di area studi kasus Provinsi Jawa Tengah. Orisinalitas dari penelitian ini terletak pada desain atau rancangan penelitian yang meliputi (1) identifikasi intensitas radiasi matahari menggunakan Jaringan Saraf Tiruan pada wilayah 29 Kabupaten dan wilayah 6 Kota di Provinsi Jawa Tengah; (2) memetakan profil iradiasi matahari pada semua wilayah Kabupaten dan Kota di Provinsi Jawa Tengah; (3) memperkirakan luasan area permukaan atap permukiman seluruh wilayah Kabupaten dan Kota berdasar analisis spasial citra satelit dan peta rencana tata ruang wilayah Provinsi Jawa Tengah; (4) estimasi panen potensi energi listrik fotovoltaik atap permukiman pada wilayah 29 Kabupaten dan 6 Kota di Provinsi Jawa Tengah; (5) identifikasi potensi mitigasi karbon dioksida berdasar produksi energi listrik sistem fotovoltaik atap permukiman seluruh wilayah 29 Kabupaten dan 6 Kota di Jawa Tengah. Penelitian serupa di Provinsi Jawa Tengah yang mencakup di beberapa lokasi Kabupaten dan Kota sampai saat ini belum pernah ditemukan.

Indonesia terletak di garis katulistiwa yang menyebabkan durasi masa siang hari sepanjang tahun kira-kira 12 jam. Letak Indonesia di garis equator ini ternyata memberi keuntungan dengan adanya sumber energi surya yang berlimpah (intensitas radiasi matahari rata-rata sekitar 4.8 kWh/m<sup>2</sup> per hari). Matahari memberikan tenaga atau daya 1,4 x 10<sup>5</sup> TW yang diterima di permukaan bumi dan sekitar 3,6 x 10<sup>4</sup> TW dari daya ini dapat digunakan.

Potensi energi surya di Indonesia sangat besar yakni sekitar 4.8 kWh/m<sup>2</sup> atau setara dengan 112.000 GWp, namun yang sudah dimanfaatkan baru sekitar 10 MWp. Pemerintah telah mengeluarkan *roadmap* pemanfaatan energi surya yang menargetkan kapasitas PLTS terpasang hingga tahun 2025 adalah sebesar 0.87 GW atau sekitar 50 MWp/tahun.

Secara geografis, Provinsi Jawa Tengah terletak antara 5°40' dan 8°30' Lintang Selatan dan antara 108°30' dan 111°30' Bujur Timur. Mengacu pada kondisi iklim memperlihatkan suhu rata-rata 27,60°C sampai 28.90°C, kelembaban rata-rata 69 % sampai 86%, tekanan udara rata-rata 1007,7 sampai 1011,3 mb, kecepatan angin rata-rata 3,0 sampai 7,6 km per jam dan lama penyinaran matahari rata-rata 44 % sampai 93%. Intensitas radiasi matahari sekitar 3,5 kWh/m<sup>2</sup>/hari sampai dengan 4,67 kWh/m<sup>2</sup>/hari. Jawa Tengah memiliki iklim tropis dengan penyebaran penyinaran matahari yang merata maka di semua lokasi atau wilayah dapat memanfaatkan radiasi matahari untuk energi listrik.

Ada dua teknologi terpopuler untuk memanfaatkan energi matahari menjadi energi listrik yaitu teknologi fototermik (*solar thermal*) dan teknologi fotovoltaik (*solar photovoltaic*) yang biasa diterapkan di sistem pembangkit listrik tenaga surya. *Solar thermal* merupakan teknologi yang memanfaatkan panas matahari untuk dijadikan bahan produksi listrik. Perbedaan dengan *solar photovoltaic* adalah teknologi fotovoltaik yang mampu mengubah radiasi matahari secara langsung menjadi listrik searah. Pembangkit listrik tenaga surya tidak mengeluarkan emisi gas rumah kaca ke atmosfer dan untuk 1 kWp pembangkit listrik tenaga surya akan mengurangi emisi gas CO<sub>2</sub> sebanyak 9,3 ton selama 25 tahun (Frankl, 2002). Pada saat ini di seluruh Indonesia telah terpasang sebesar 12,1 MWp pembangkit listrik tenaga surya. Oleh karena itu pembangkit ini akan berkontribusi untuk pengurangan gas CO<sub>2</sub> sebesar 112.530 ton selama 25 tahun. Disisi lain penggunaan PLTS saat ini juga (Djamin, 2016).

Studi mengenai penilaian potensi energi terbarukan suatu wilayah memberikan informasi bahwa pendekatan hirarkhis yang sering digunakan dalam praktik memperkirakan potensi sumber daya energi terbarukan regional dan global. Pendekatan hirarkhi yang lazim digunakan untuk mengestimasi energi fotovoltaik atap terdiri dari 3 tahapan: (1) potensi fisik, yang meliputi jumlah total energi yang diterima dari matahari di area studi; (2) potensi geografis, yang membatasi lokasi di mana energi ini dapat ditangkap; dan (3) potensi teknis, yang selanjutnya memperhitungkan karakteristik teknis (termasuk kinerja) dari peralatan yang digunakan untuk mengubah sumber daya menjadi energi listrik.

Penelitian ini dilaksanakan selama 12 bulan, mulai bulan Agustus 2017 sampai dengan bulan Juli 2018. Lokasi penelitian ini tersebar di seluruh wilayah Kabupaten dan Kota provinsi Jawa Tengah. Potensi iradiasi matahari yang melintasi atap permukiman setiap wilayah diprediksi berdasar data historis meteorologi seperti suhu lingkungan, kelembaban relatif, kecepatan angin, curah hujan, *latitude*, *longitude*, *altitude*. Data dikumpulkan selama 5 tahun dari 1 Januari 2014 hingga 31 Desember 2018 dari situs web meteorologi Permukaan NASA dan Energi Surya. Analisis penelitian menggunakan metode jaringan saraf tiruan, analisis spasial, interpolasi *inverse distance weighting*, dan analisis faktor emisi.

Temuan penelitian angka rata-rata iradiasi harian semua wilayah Kabupaten dan Kota sebesar 5,05 kWh/m<sup>2</sup>/hari dengan rentang 4,40 sampai 5,54 kWh/m<sup>2</sup>/hari. Iradiasi matahari bulanan tertinggi mencapai 5,76 kWh/m<sup>2</sup>/hari berada di Bulan September, terendah 4,23 kWh/m<sup>2</sup>/hari di Bulan November. Dari sebaran rata-rata iradiasi matahari harian dan bulanan memberikan informasi potensi energi matahari dapat dipanen di seluruh wilayah Kabupaten dan Kota di Jawa Tengah. Dari foto citra satelit dan peta rencana tata ruang wilayah berhasil mengestimasi area permukiman dengan analisis *overlay* dan *intersect* dalam sistem informasi geografis. Sebaran area atap permukiman wilayah Kabupaten dan Kota berkisar 3.237.066 m<sup>2</sup> sampai 39.163.319 m<sup>2</sup>. Panen potensi energi listrik dari atap fotovoltaiik permukiman terendah 3.122 MWh/tahun Kota Magelang, tertinggi Kabupaten Cilacap mencapai 250.621 MWh/tahun. Potensi pengalihan karbon dioksida terendah 2.264 tonCO<sub>2</sub>/tahun, tertinggi 167.723 tonCO<sub>2</sub>/tahun. Kebaharuan penelitian temuan peta iradiasi atau peta insolasi wilayah Provinsi Jawa Tengah berdasar analisis jaringan saraf tiruan dan interpolasi *inverse distance weighting*. Temuan penelitian diusulkan agar digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam perencanaan penerapan energi matahari sebagai bagian dari sistem penyediaan energi listrik di Provinsi Jawa Tengah. Melakukan kajian evaluasi terhadap eksploitasi energi matahari yang telah dilakukan di wilayah Kabupaten dan Kota dalam rangka penyediaan energi listrik rendah karbon bersumber energi matahari wilayah lokal.

## SUMMARY

National energy consumption from fossil energy still dominates: petroleum 39.76%; coal 37.17%; natural gas 12.94%; while from renewable energy about 9.56%. Electricity supply in Indonesia is estimated to reach 120 GW in 2025. According to the projection of greenhouse gas projections in 2030 in BaU conditions of 998 million tons of CO<sub>2</sub>, the projected projection in the development scenario is 695 million tons of CO<sub>2</sub>. Indonesia's commitment to reduce greenhouse gas emissions by 29% in 2030. From this 29% figure, the energy sector has a share of the reduction of 314 million tons of CO<sub>2</sub>. On the other hand, in Central Java Province, the need for electrical energy continues to increase every year. Judging from the number of customers in 2017 as many as 9,603,887, in a period of 2 years, in 2019 it increased by 11,652,121. The composition of electric energy consumption for Central Java reaches 24,750.62 GWh or around 14.26% of the total electricity consumption of Java Island and around 10.1% of the total national electricity consumption. The level of CO<sub>2</sub> (e) emissions in Central Java, in 2008 reached 29,418,849 tonnes of CO<sub>2</sub> (e), the largest contributor to emissions from the energy sector 23,965,516 tonnes CO<sub>2</sub> (e) or around 81.4%. In a period of 2 years, in 2010 the total emission reached 39,886,167 tons of CO<sub>2</sub> (e), an increase of about 35.6%. The Regional GHG Action Plan for Central Java Province plans to reduce GHG emissions by 5.7 million tons of CO<sub>2</sub> (e) or around 17.33% of the estimated GHG of 29.97 million tons of CO<sub>2</sub> (e) in 2020.

The potential for national renewable energy to be converted into electricity reaches 422 to 500 GW, about 7 to 8 times the total installed generating capacity currently. The government is targeting the energy mix using new and renewable energy by 23% by 2025 to be realized. The important role of solar energy that is free of carbon emissions to generate electrical energy using photovoltaic technology has recently become a concern. Geographically, the position of the Central Java region is on the equator with evenly distributed solar radiation in all districts and cities. In the context of developing solar energy, it is a part of the strategic plan of Central Java Province as stated in the Regional Regulation. The urgency of research on the development of solar energy as a source of electricity for the people of Central Java to harvest the potential for electricity from solar energy is considered important as part of empowering clean energy from the residential environment. From the aspect of electricity in Indonesia, the development of solar energy as a source of electricity is a strategic step for increasing economic activity, in order to achieve sustainable national electrical energy resilience and independence. In the

global context, this is a manifestation of efforts to reduce greenhouse gas emissions from the electricity production sector in order to anticipate global warming.

The development of an electric energy system based on photovoltaic technology requires main information, namely solar irradiation in the local area and the availability of system exploration facilities. This study examines the solar energy system as electrical energy by considering environmental aspects. The main target of the research is to obtain the potential for the electric energy harvest of the photovoltaic system in residential roof areas, the potential for carbon dioxide transfer and solar irradiation maps. The study area is Central Java Province which covers 29 districts and 6 cities. Because of that, a fundamental research problem arises as it is formulated as follows:

1. What is the potential intensity of solar radiation in the 29 districts and 6 cities of Central Java Province?
2. What is the profile of the solar irradiation or insolation map for the 29 Regencies and 6 Cities in Central Java Province?
3. How is the availability of residential roof areas in 29 districts and 6 cities in the province of Central Java to develop a photovoltaic energy system?
4. What is the potential for electrical energy from a rooftop solar photovoltaic system in 29 districts and 6 cities in Central Java Province?
5. What is the potential for mitigating carbon dioxide from rooftop solar photovoltaic energy systems developed in the 29 districts and 6 cities of Central Java Province?

Research related to the development model of solar energy potential as a source of electrical energy has been widely carried out. Some of them have conducted research to measure solar radiation in recent years and made projections of solar energy potential through non-linear modeling of artificial neural networks. Rumbayan, et.al (2012) conducted a study to determine the theoretical potential of sunlight irradiation in Indonesia using the artificial neural network method. In his research, visualization of sunshine radiation in each province in Indonesia was also carried out. Ling Zou, et.al (2016) predicted Global Solar Radiation in Southeast China using the spatial interpolation-based neural network method. Sampada Kulkarni and Rangan Banerjee (2011) conducted a mapping of the potential for new renewable energy in India using a Geographical Information System approach. Carl (2014) conducted a study measuring the magnitude of solar photovoltaic potential for Solar World SW260

monocrystalline panels on the roofs of houses in the study area. The study used Geographical Information Systems and Light Detection and Ranging data with statistical analysis to identify how much solar photovoltaic potential exists for rooftops in the city of Kailua Kona on the Island of Hawaii. Wong et al., (2016) to estimate the potential for photovoltaic in Hong Kong to analyze the possible spatial distribution when covered by clouds. Investigation of the spatial distribution of clouds is carried out via geo-stationary satellites. This research has succeeded in making detailed spatial estimates of the potential for solar energy throughout the City.

This study examines the solar radiation energy system as electrical energy in an effort to obtain a potential harvest of electrical energy and transfer carbon dioxide by analyzing meteorological and geographic parameters in the case study area of Central Java Province. The originality of this study lies in the design or research design which includes (1) identification of the intensity of solar radiation using Artificial Neural Networks in 29 districts and 6 cities in Central Java Province; (2) mapping solar irradiation profiles in all regencies and cities in Central Java Province; (3) estimate the area of the roof surface area of settlements in all regencies and cities based on the spatial analysis of satellite imagery and the spatial plan map of Central Java Province; (4) estimation of the potential harvest of photovoltaic electricity from residential rooftops in 29 Regencies and 6 Cities in Central Java Province; (5) identification of the potential for carbon dioxide mitigation based on the production of electrical energy from the photovoltaic roof system for settlements in all 29 districts and 6 cities in Central Java. A similar study in Central Java Province which covers several districts and cities has never been found.

Indonesia is located on the equator which causes the duration of daylight throughout the year to be approximately 12 hours. Indonesia's location on the equator line turns out to be advantageous because of its abundant solar energy sources (average solar radiation intensity is around 4.8 kWh / m<sup>2</sup> per day). The sun provides power or 1.4 x 10<sup>5</sup> TW received at the earth's surface and about 3.6 x 10<sup>4</sup> TW of this power can be used. The potential for solar energy in Indonesia is very large, namely around 4.8 kWh / m<sup>2</sup> or equivalent to 112,000 GWp, but only 10 MWp has been utilized. The government has issued a roadmap for solar energy utilization which targets the installed PLTS capacity by 2025 to be 0.87 GW or around 50 MWp / year.

Geographically, Central Java Province is located between 5o40 'and 8o30' south latitude and between 108o30 'and 111o30' east longitude. Referring to climatic conditions, it shows an

average temperature of 27.60°C to 28.90°C, an average humidity of 69% to 86%, an average air pressure of 1007.7 to 1011.3 mb, an average wind speed of 3.0 to 7, 6 km per hour and the average length of sunlight is 44% to 93%. The intensity of solar radiation is around 3.5 kWh / m<sup>2</sup> / day to 4.67 kWh / m<sup>2</sup> / day. Central Java has a tropical climate with an even distribution of solar radiation so that all locations or regions can take advantage of solar radiation for electrical energy.

There are two most popular technologies for harnessing solar energy into electrical energy, namely photothermic technology (solar thermal) and photovoltaic technology (solar photovoltaic) which is commonly applied in solar power generation systems. Solar thermal is a technology that uses solar heat to produce electricity. The difference with solar photovoltaic is photovoltaic technology that is able to convert solar radiation directly into direct electricity. Solar power plants do not emit greenhouse gases into the atmosphere and for 1 kWp solar power generation will reduce CO<sub>2</sub> gas emissions by 9.3 tons over 25 years (Frankl, 2002). At this time all over Indonesia, 12.1 MWp of solar power plants have been installed. Therefore, this plant will contribute to the reduction of CO<sub>2</sub> gas by 112,530 tonnes for 25 years. On the other hand, the use of PLTS at this time too (Djamin, 2016).

Studies on the assessment of the renewable energy potential of a region provide information that a hierarchical approach is often used in the practice of estimating the potential of regional and global renewable energy resources. The hierarchical approach commonly used to estimate rooftop photovoltaic energy consists of 3 stages: (1) physical potential, which includes the total amount of energy received from the sun in the study area; (2) geographic potential, which limits the location where this energy can be captured; and (3) technical potential, which further takes into account the technical characteristics (including performance) of the equipment used to convert the resource into electrical energy.

This research was conducted for 12 months, starting from August 2017 to July 2018. The locations of this research are scattered throughout the districts and cities of Central Java province. The potential for solar irradiation that crosses the residential roofs of each area is predicted based on historical meteorological data such as environmental temperature, relative humidity, wind speed, rainfall, latitude, longitude, altitude. Data was collected for 5 years from 1 January 2014 to 31 December 2018 from NASA's Surface meteorology website and Solar



Energy. The research analysis used artificial neural network method, spatial analysis, inverse distance weighting interpolation, and emission factor analysis.

The findings of this research are that the average daily irradiation rate of all districts and cities is 5.05 kWh / m<sup>2</sup> / day with a range of 4.40 to 5.54 kWh / m<sup>2</sup> / day. The highest monthly solar irradiation reaches 5.76 kWh / m<sup>2</sup> / day in September, the lowest is 4.23 kWh / m<sup>2</sup> / day in November. From the daily and monthly average solar irradiation, it provides information on the potential for solar energy to be harvested in all districts and cities in Central Java. From satellite imagery and spatial planning maps, it is possible to estimate settlement areas with overlay and intersect analysis in geographic information systems. The distribution of residential roof areas in regencies and cities ranges from 3,237,066 m<sup>2</sup> to 39,163,319 m<sup>2</sup>. The lowest potential harvest of electrical energy from photovoltaic residential rooftops is 3,122 MWh / year in Magelang City, the highest is Cilacap Regency reaching 250,621 MWh / year. The lowest carbon dioxide transfer potential was 2,264 tons CO<sub>2</sub> / year, the highest was 167,723 tons CO<sub>2</sub> / year. The novelty of the research findings of irradiation map or insolation map of Central Java Province based on artificial neural network analysis and inverse distance weighting interpolation. The research findings are proposed to be used as consideration in planning the application of solar energy as part of the electricity supply system in Central Java Province. Conduct evaluation studies on the exploitation of solar energy that has been carried out in regencies and cities in the context of providing low-carbon electrical energy sourced from solar energy in local areas.