

DISERTASI

**SISTEM KENDALI IKLIM MIKRO PADA *GREENHOUSE*
TENAGA SURYA MELALUI PENDEKATAN *NEURAL NETWORK*
DAN *IOT MONITORING* DALAM SKEMA *AGRIVOLTAIC***



**YURNI OKTARINA
03013622227005**

**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU TEKNIK
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2024**

HALAMAN PENGESAHAN

SISTEM KENDALI IKLIM MIKRO PADA *GREENHOUSE* TENAGA SURYA
MELALUI PENDEKATAN *NEURAL NETWORK* DAN *IOT MONITORING*
DALAM SKEMA *AGRIVOLTAIC*

DISERTASI

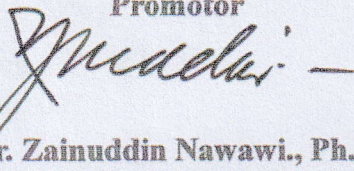
Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Doktor
Ilmu Teknik Pada Program Studi Ilmu Teknik Program Doktor Fakultas Teknik
Universitas Sriwijaya

Oleh

YURNI OKTARINA
03013622227005

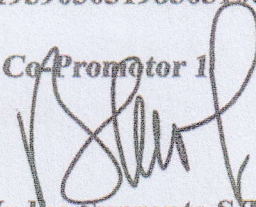
Palembang, Desember 2024

Promotor



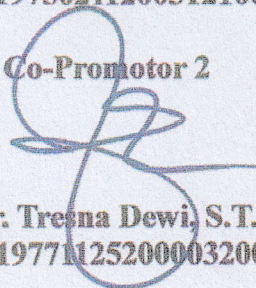
Prof. Ir. Zainuddin Nawawi, Ph.D., IPU
NIP 195903031985031004

Co-Promotor 1



Dr. Ir. Bhakti Yudho Suprpto, S.T., M.T., IPM
NIP 197502112003121002

Co-Promotor 2



Dr. Eng. Ir. Tresna Dewi, S.T., M.Eng
NIP 197711252000032001

Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknik



Dr. Ir. Bhakti Yudho Suprpto, S.T., M.T. IPM
NIP. 197502112003121002

Koordinator Program Studi



Prof. Dr. Ir. Nukman, MT.
NIP. 195903211987031001

LEMBAR PERSETUJUAN

Dengan ini menyatakan bahwa disertasi Yurni Oktarina yang berjudul:

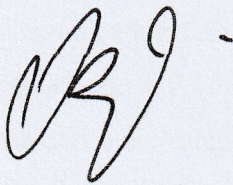
“Sistem Kendali Iklim Mikro Pada Greenhouse Tenaga Surya Melalui Pendekatan Neural Network dan IoT Monitoring Dalam Skema Agrivoltaic” telah dipertahankan di hadapan sidang ujian tertutup Program Studi Ilmu Teknik Program Doktor, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya pada tanggal 26 Nopember 2024.

Palembang, 3 Desember 2024

Ditandatangani oleh :

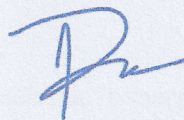
Ketua Tim Penguji:

Ir. Irsyadi Yani, S.T., M.Eng., Ph.D
NIP. 197112251997021001

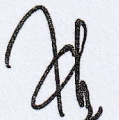
()

Anggota Tim Penguji:

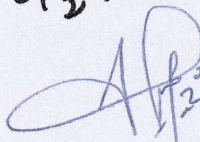
1. Dr. Muhammad Rif'an, S.T., M.T.
NIP. 197410222001121001

()

2. Dr. Eng. Ir. Suci Dwijayanti, S.T., M.S., IPM
NIP. 198407302008122001

()

3. Dr. Ir. Herlina, S.T., M.T., IPM
NIP. 198007072006042004

()

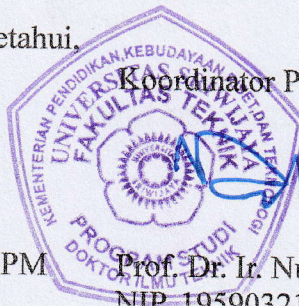
Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknik

Koordinator Program Studi

Dr. Ir. Bhakti Yudho Suprpto, S.T., M.T. IPM
NIP. 197502112003121002

Prof. Dr. Ir. Nukman, MT.
NIP. 195903211987031001



HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS

Saya yang bertandatangan di bawah ini:

Nama : Yurni Oktarina
NIM : 03013622227005
Program Studi : Ilmu Teknik Program Doktor
Fakultas : Teknik
Perguruan Tinggi : Universitas Sriwijaya

Dengan ini menyatakan bahwa disertasi saya yang berjudul “Sistem Kendali Iklim Mikro Pada Greenhouse Tenaga Surya Melalui Pendekatan *Neural Network* dan *IoT Monitoring* Dalam Skema *Agrivoltaic*” adalah hasil karya sendiri dan bebas dari unsur plagiarisme. Apabila ditemukan adanya unsur plagiat, saya bersedia menerima sanksi akademik sesuai dengan peraturan yang berlaku di Universitas Sriwijaya.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan sebenar-benarnya.

Palembang, 25 Nopember 2024
Yang Menyatakan



Yurni Oktarina
NIM. 03013622227005

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmanirrahim

Maha Suci Allah, yang telah mempertemukan penulis dengan orang-orang yang arif dan bijaksana yang telah mengajarkan lebih banyak hal-hal yang jauh lebih bernilai dari pada sekedar bimbingan dalam penelitian dan penulisan disertasi yang berjudul “Sistem Kendali Iklim Mikro Pada *Greenhouse* Tenaga Surya Melalui Pendekatan *Neural Network* dan *Iot Monitoring* dalam Skema *Agrivoltaic*”. Puji syukur kepada Allah SWT yang telah memberikan karunia-Nya sehingga penulis mendapatkan banyak kemudahan dalam menyelesaikan disertasi ini, yang disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar doktor pada Program Studi Ilmu Teknik Program Doktor.

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem kendali iklim mikro pada *greenhouse* berbasis tenaga surya yang terintegrasi dengan teknologi neural network dan Internet of Things (IoT) dalam skema *agrivoltaic* yang diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi pertanian modern yang lebih efisien dan berkelanjutan, terutama dalam pengelolaan sumber daya energi terbarukan serta optimalisasi produksi pertanian.

Penyusunan disertasi ini merupakan bagian dari penelitian yang telah menghasilkan empat karya ilmiah yang telah dipublikasikan, satu karya ilmiah telah *dipublish* pada jurnal internasional terindeks Q1, dan satu karya ilmiah lainnya telah diterbitkan dalam jurnal internasional dan dua karya ilmiah lainnya telah dipresentasikan dalam konferensi ilmiah internasional terkemuka, yaitu :

1. ***Solar Power Greenhouse for Smart Agriculture*** yang telah dipresentasikan pada **International Conference on Electrical (IEIT) 2023** pada tanggal 14-15 September 2023 di Malang dan dipublikasikan di IEEE Publisher pada tanggal 6 Desember 2023.
2. ***Digitized Smart Solar Power Agriculture Implementation in Palembang, Sumatera Selatan*** yang telah dipresentasikan pada seminar internasional **Electrical Engineering, Computer Science, and Informatics (EECSI) 2023** pada tanggal 20-21 September 2023 di Palembang dan telah dipublikasikan di IEEE Publisher pada 31 Oktober 2023.

3. ***Integrating Temporal and Feedforward Models for Solar Energy Prediction: LSTM and ANN Hybrid Approaches*** yang telah *dipublish* pada jurnal **International Journal of Research in Vocational Studies (IJRVOCAS)**
4. ***Towards Ecological Sustainability: Harvest Prediction In Agrivoltaic Chili Farming With CNN Transfer Learning*** yang telah *dipublish* pada jurnal **Iraqi Journal of Agricultural Sciences (IJAS)** University of Baghdad.

Penelitian ini juga telah dicatat dalam Hak Kekayaan Intelektual (HKI) dengan judul **MoTraC (Model Transfer Learning CNN) Untuk Prediksi Hasil Panen Pertanian Cabai Agrivoltaic** (nomor pencatatan 000780295). Pencatatan ini menunjukkan bahwa hasil penelitian tidak hanya memiliki nilai ilmiah, tetapi juga potensi inovasi yang diakui secara hukum.

Gagasan dalam disertasi ini tentu telah melalui proses, tinjauan, arahan, pengamatan dan analisa yang mendalam dari Bapak Prof. Ir. Zainuddin Nawawi, Ph.D., IPU, Bapak Dr. Ir. Bhakti Yudho Suprpto, S.T.,M.T.,IPM dan Ibu Dr. Eng. Ir. Tresna Dewi, S.T., M.Eng sebagai promotor dan co-promotor. Arahan dan semangat juga penulis terima dari Bapak Prof. Ir. Nukman, M.T selaku Ketua Program Studi Doktor Ilmu-ilmu Teknik untuk itu penulis mengucapkan terima kasih yang sedalam-dalamnya atas kesabaran dalam memberikan saran, bimbingan, nasehat dan kritik selama bimbingan berlangsung.

Pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada institusi Politeknik Negeri Sriwijaya yang telah memberikan izin dan mendukung pembiayaan studi doktoral saya. Terima kasih juga kepada rekan-rekan sejawat di Program Studi Teknik Elektronika dan Program Studi Sarjana Terapan Teknik Elektro Politeknik Negeri Sriwijaya dan juga rekan-rekan seperjuangan di program Doktor Ilmu Teknik Universitas Sriwijaya : Bu Pola Risma, Lili, Hetty, Leni, Seno, Fadzri, Haviz, Kak Ferry, Kak Alan, dan Kak Azwardi, atas semangat dan dorongannya yang tak pernah putus agar penulis segera menyelesaikan laporan disertasi ini. Terima kasih yang sebesar-besarnya juga penulis tujukan kepada mereka yang tidak pernah merasa lelah dan bosan dalam memberikan doa tulusnya untuk kelancaran penulis dalam menyelesaikan pendidikan program doktoral ini, yaitu mama dan ibu, suamiku tercinta Umar Danus, anak-anakku tersayang: Syifa, Akbar dan Athar.

Akhir kata, penulis menyadari bahwa disertasi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan untuk perbaikan di masa yang akan datang. Semoga disertasi ini tidak hanya menjadi karya akademik, tetapi juga memberi kontribusi bagi kemajuan ilmu pengetahuan dan membawa manfaat bagi siapa saja yang membacanya

Palembang, Nopember 2024

Penulis

RINGKASAN

Sistem Kendali Iklim Mikro Pada *Greenhouse* Tenaga Surya Melalui Pendekatan *Neural Network* dan *Iot Monitoring* dalam Skema *Agrivoltaic*

Karya Tulis Ilmiah Berupa Laporan Penelitian Disertasi, Nopember 2024

Yurni Oktarina; dibimbing oleh Prof. Ir. Zainuddin Nawawi, Ph.D., IPU dan Dr. Bhakti Yudho Suprpto, S.T.,M.T.,IPM, dan Dr. Eng. Tresna Dewi, S.T.,M.Eng

Program Studi Doktor Ilmu Teknik, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya.

Pertanian cerdas menjadi solusi untuk memenuhi kebutuhan pangan yang terus meningkat meski menghadapi tantangan seperti berkurangnya lahan subur dan menurunnya jumlah petani. Dengan teknologi seperti kendali, sensor, dan aktuator, sistem ini mengurangi beban kerja petani dan tidak memerlukan lahan luas. Di Sumatera Selatan, melimpahnya energi surya mendukung sistem *agrivoltaic*, terutama di Palembang, yang memiliki iradiasi mingguan hingga 1278,8 W/m². Potensi energi surya yang melimpah ini menjanjikan sumber energi terbarukan yang andal namun, fluktuasi ketersediaan iradiasi matahari menjadi tantangan yang harus diatasi. Dalam konteks ini, pengembangan model prediktif berbasis *machine learning*, seperti hybrid LSTM-ANN, menjadi krusial untuk memprediksi luaran fotovoltaik secara akurat, termasuk tegangan, daya, dan iradiasi matahari. Model hibrid ini menunjukkan peningkatan akurasi yang signifikan, prediksi tegangan meningkat 15% dengan Mean Absolute Error (MAE) sebesar 0,1016 dan Root Mean Squared Error (RMSE) sebesar 0,1417. Prediksi iradiasi meningkat 20% dengan MAE sebesar 0,0895 dan RMSE sebesar 0,1149, sementara prediksi daya meningkat 18% dengan MAE sebesar 0,1506 dan RMSE sebesar 0,1954. Studi juga memanfaatkan model Convolutional Neural Networks (CNN) dengan transfer learning untuk prediksi hasil panen cabai. Dengan data dari *greenhouse* bertenaga surya berbasis IoT, kinerja model EfficientNetV2L dan ResNet 50 mencapai akurasi 100%, sementara EfficientNetV2M mencapai 96%. Dengan mengintegrasikan energi terbarukan, *machine learning*, dan otomatisasi, *agrivoltaic* cerdas menawarkan masa depan pertanian yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan berkelanjutan, diharapkan memberikan kontribusi signifikan pada pengelolaan pangan dan energi global.

Kata Kunci : Pertanian Cerdas, *Agrivoltaic*, iradiasi, hybrid LSTM-ANN, CNN

SUMMARY

Microclimate Control System in Solar *Greenhouse* Using Neural Network and IoT Monitoring Approach in Agrivoltaic Scheme

Scientific Paper in the Form of Dissertation Research, Oktober 2024

Yurni Oktarina; supervised by Prof. Ir. Zainuddin Nawawi, Ph.D., IPU and Dr. Ir. Bhakti Yudho Suprpto, S.T., M.T., Dr. Eng. Ir. Tresna Dewi, S.T.,M.Eng

Engineering Science Doctoral Program, Faculty of Engineering, Sriwijaya University.

Smart agriculture is a solution to meet the increasing food needs despite challenges such as decreasing fertile land and decreasing number of farmers. With technologies such as control, sensors, and actuators, this system reduces the workload of farmers and does not require large areas of land. In South Sumatera, the abundance of solar energy supports agrivoltaic systems, especially in Palembang, which has a weekly irradiance of up to 1278.8 W/m². This abundant solar energy potential promises a reliable source of renewable energy, but fluctuations in the availability of solar irradiance are challenges that must be overcome. In this context, the development of machine learning-based predictive models, such as hybrid LSTM-ANN, is crucial to accurately predict photovoltaic *output*, including voltage, power, and solar irradiance. This hybrid model shows a significant increase in accuracy, voltage predictions increased by 15% with a Mean Absolute Error (MAE) of 0.1016 and a Root Mean Squared Error (RMSE) of 0.1417. Irradiance prediction increased by 20% with MAE of 0.0895 and RMSE of 0.1149, while power prediction increased by 18% with MAE of 0.1506 and RMSE of 0.1954. The study also utilized Convolutional Neural Networks (CNN) models with transfer learning for chili yield prediction. With data from IoT-based solar-powered *greenhouses*, the performance of the EfficientNetV2L and ResNet 50 models achieved 100% accuracy, while EfficientNetV2M achieved 96%. By integrating renewable energy, machine learning, and automation, smart agrivoltaics offers a more efficient, environmentally friendly, and sustainable future for agriculture, expected to make significant contributions to global food and energy management.

Keywords: Smart Farming, Agrivoltaics, Irradiance, Hybrid LSTM-ANN, CNN

DAFTAR ISI

| | |
|--|------|
| DISERTASI..... | i |
| HALAMAN PENGESAHAN | ii |
| LEMBAR PERSETUJUAN | iii |
| HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS..... | iv |
| KATA PENGANTAR | v |
| RINGKASAN..... | viii |
| SUMMARY | ix |
| DAFTAR ISI..... | x |
| DAFTAR GAMBAR | xiii |
| DAFTAR TABEL | xv |
| DAFTAR LAMPIRAN..... | xvi |
| BAB I PENDAHULUAN..... | 1 |
| 1.1 Latar Belakang Masalah | 1 |
| 1.2 <i>Novelty</i> dan Kontribusi Penelitian | 5 |
| 1.3 Rumusan Masalah..... | 6 |
| 1.4 Tujuan Penelitian | 6 |
| 1.5 Pembatasan Masalah..... | 7 |
| 1.6 Metodologi Penelitian..... | 8 |
| 1.7 Sistematika Penulisan Disertasi | 9 |
| BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA | 10 |
| 2.1 <i>State of The Art</i> Penelitian | 10 |
| 2.2 <i>Greenhouse</i> | 23 |
| 2.3 Tanaman Cabai | 25 |
| 2.4 <i>Agrivoltaic</i> | 27 |
| 2.5 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) | 29 |
| 2.5.1 Komponen-komponen sistem fotovoltaik..... | 30 |
| 2.5.2 Penentuan Ukuran Sistem..... | 30 |
| 2.6 Matematis Sistem Fotovoltaic..... | 32 |
| 2.7 <i>Smart Farming</i> | 33 |
| 2.8 Sensor-sensor Dalam <i>Agrivoltaic</i> | 34 |
| 2.9 Aktuator dalam <i>Agrivoltaic</i> | 36 |
| 2.10 Pemodelan Kontrol Iklim Mikro..... | 37 |
| 2.11 Iklim Mikro | 41 |
| 2.12 Neural Network (NN) | 42 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 2.12.1 | Teknik Prediksi..... | 48 |
| 2.12.2 | Evaluasi Kinerja Metrik | 49 |
| 2.13 | <i>Long-Short Time Memory (LSTM)-Artificial Neural Networks (ANN)</i> | 50 |
| 2.14 | <i>Convolutional Neural Network (CNN)</i> | 54 |
| 2.15 | <i>IoT Monitoring</i> | 58 |
| BAB 3. | METODELOGI PENELITIAN..... | 62 |
| 3.1 | Kerangka Kerja Penelitian | 62 |
| 3.2 | Lokasi Penelitian dan Karakteristik Lokasi | 65 |
| 3.3 | <i>Experimental Setup Greenhouse</i> Untuk Aplikasi <i>Agrivoltaic</i> | 66 |
| 3.4 | Desain PV System <i>Off-grid</i> | 68 |
| 3.5 | Desain Iklim Mikro | 72 |
| 3.6 | Desain IoT Monitoring..... | 74 |
| 3.7 | Desain Model Prediksi <i>Output</i> PLTS..... | 77 |
| BAB IV | KONTROL IKLIM MIKRO <i>GREENHOUSE</i> DALAM SKEMA <i>AGRIVOLTAIC</i> | 79 |
| 4.1 | Pendahuluan..... | 79 |
| 4.2 | Kondisi Lingkungan..... | 79 |
| 4.3 | Implementasi Sistem <i>Agrivoltaic</i> | 80 |
| 4.3.1 | <i>Agrivoltaic</i> Yang Tidak Dikondisikan | 81 |
| 4.3.2 | Sistem <i>Agrivoltaic</i> Yang Dikondisikan..... | 82 |
| 4.3.3 | Sistem Pengendalian Iklim Mikro | 86 |
| 4.3.4 | Pengendalian Suhu dan Kelembapan | 86 |
| 4.3.5 | Respon Aktuator Terhadap Perubahan Kelembapan | 91 |
| 4.4 | Analisa Model Matematika <i>Heat Distribution Greenhouse Agrivoltaic</i> | 94 |
| 4.4.1 | Model Energi Transfer Dalam <i>Greenhouse</i> | 94 |
| 4.4.2 | Model Energi Udara dan Pendinginan Dalam <i>Greenhouse</i> | 97 |
| 4.4.3 | Analisis Penggunaan Energi Surya dalam <i>Greenhouse</i> | 100 |
| 4.4.4 | Publikasi | 100 |
| BAB V | PREDIKSI <i>OUTPUT</i> PV DENGAN PENDEKATAN LSTM-ANN | 102 |
| 5.1 | Prediksi Energi Surya..... | 102 |
| 5.2 | <i>Data Collection</i> | 106 |
| 5.3 | <i>Pre-Processing Data</i> | 107 |
| 5.4 | Arsitektur Model LSTM-ANN | 108 |
| 5.5 | <i>Model Training</i> | 110 |
| 5.6 | Hasil Pelatihan dan Model | 110 |
| 5.6.1 | Prediksi Pada Data Uji..... | 110 |

| | | |
|--|---|-----|
| 5.6.2 | Evaluasi Kinerja Model..... | 115 |
| 5.7 | Perbandingan dengan Studi Peneliti Terdahulu | 118 |
| 5.8 | Publikasi..... | 119 |
| BAB VI PREDIKSI PERTUMBUHAN DAN HASIL PANEN CABAI DENGAN CNN <i>TRANSFER LEARNING</i> | | 121 |
| 7.1 | Pendahuluan..... | 121 |
| 7.2 | Proses Pengambilan Gambar | 122 |
| 7.3 | Arsitektur Model CNN Transfer Learning..... | 123 |
| 7.4 | Prediksi Pertumbuhan Tanaman Cabai | 124 |
| 7.4.1 | <i>Dataset</i> | 124 |
| 7.4.2 | Proses Training | 124 |
| 7.4.3 | Evaluasi Kinerja Model..... | 126 |
| 7.5 | Prediksi Hasil Panen | 130 |
| 7.5.1 | <i>Dataset</i> | 130 |
| 7.5.2 | Arsitektur Model | 133 |
| 7.5.3 | Training Model CNN Transfer Learning..... | 133 |
| 7.5.4 | Evaluasi dan Analisa Kinerja Model | 134 |
| 7.5.5 | Analisa dan Interpretasi Hasil Prediksi Berdasarkan Prediksi <i>Hyperparameter</i> | 139 |
| 7.6 | Publikasi..... | 141 |
| BAB VII. PENUTUP..... | | 142 |
| 7.1 | Kesimpulan | 142 |
| 7.2 | Rekomendasi..... | 143 |
| DAFTAR PUSTAKA..... | | 145 |
| LAMPIRAN..... | | 153 |
| Lampiran 1 | Sertifikat Revisi Sidang Disertasi | 153 |
| Lampiran 2 | Artikel-artikel Ilmiah | 156 |
| Lampiran 3 | Tabel Matrik Penelitian..... | 195 |
| Lampiran 4 | Foto-foto | 216 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|----|
| Gambar 1 Tipe-Tipe Bangunan Greenhouse..... | 24 |
| Gambar 2 Tanaman Cabai..... | 26 |
| Gambar 3 Konsep Pertanian Agrivoltaic | 28 |
| Gambar 4 Pemodelan Panel surya | 32 |
| Gambar 5 Fill Factor Sebagai Fungsi Daya Maksimum..... | 33 |
| Gambar 6 Jaringan Syaraf Manusia dan Jaringan Syaraf Tiruan..... | 43 |
| Gambar 7 Multilayer ANN | 44 |
| Gambar 8 Neural Network Model | 45 |
| Gambar 9 Fungsi aktivasi linier..... | 46 |
| Gambar 10 Fungsi threshold (batas ambang) | 46 |
| Gambar 11 Fungsi Aktivasi Threshold Bipolar | 47 |
| Gambar 12 Fungsi aktivasi sigmoid biner | 47 |
| Gambar 13 Fungsi aktivasi sigmoid bipolar | 47 |
| Gambar 14 Arsitektur Multilayer Sederhana | 55 |
| Gambar 15 Konsep Model CNN | 56 |
| Gambar 16 Proses Fully-connected Layer..... | 58 |
| Gambar 17 Diagram Arsitektur IoT Dalam Pertanian Greenhouse | 59 |
| Gambar 18 Tampilan Layar Kerja Aplikasi Node-RED | 60 |
| Gambar 19 Komunikasi Sensor Melalui Aplikasi Node-RED | 61 |
| Gambar 20 Diagram Alir Pelaksanaan Penelitian..... | 63 |
| Gambar 21 Lokasi Penelitian..... | 66 |
| Gambar 22 Greenhouse Agrivoltaic..... | 67 |
| Gambar 23 Smart Greenhouse Monitoring..... | 68 |
| Gambar 24 Posisi Aktuator Dalam Greenhouse | 68 |
| Gambar 25 Diagram Alir Desain PLTS | 69 |
| Gambar 26 Desain posisi panel surya dan Aplikasinya Pada Greenhouse | 70 |
| Gambar 27 Rangkaian PV System Off-grid Pada Penelitian Ini | 70 |
| Gambar 28 Diagram Skematik Sistem Iklim Mikro Dalam Greenhouse | 73 |
| Gambar 29 Diagram Sistem Kendali dan Monitoring IoT Greenhouse | 74 |
| Gambar 30 Diagram Alir Sistem IoT Monitoring..... | 75 |
| Gambar 31 Instal Node-Red | 76 |
| Gambar 32 Menjalankan Node-Red | 76 |
| Gambar 33 Tampilan Telah Terinstall Di PC | 76 |
| Gambar 34 Flowchart Tahapan Prediksi..... | 78 |
| Gambar 35 Penerapan Sistem Pertanian Agrivoltaic Yang Tidak Dikondisikan | 81 |
| Gambar 36 Sistem Agrivoltaic Yang Dikondisikan Dalam Greenhouse | 83 |
| Gambar 37 Distribusi Iradiasi Matahari (W/m ²)..... | 84 |
| Gambar 38 Perbandingan Suhu Dalam dan Luar Greenhouse | 87 |
| Gambar 39 Variabel Lingkungan Mikro Rata-Rata Dalam 1 Minggu..... | 89 |
| Gambar 40 Efek Kelembapan Iklim Mikro Rata-rata Terhadap Kondisi Pompa..... | 91 |

| | |
|---|-----|
| Gambar 41 Tampilan Implementasi IoT Monitoring..... | 93 |
| Gambar 42 Mekanisme Heat Transfer Dalam Greenhouse | 94 |
| Gambar 43 Diagram Alir Prediksi Luaran PLTS Menggunakan Model LSTM-ANN.. | 104 |
| Gambar 44 Eksperimental Testbed Untuk Prediksi Luaran PV..... | 107 |
| Gambar 45 Arsitektur model LSTM-ANN Untuk Prediksi Luaran PLTS | 109 |
| Gambar 46 Nilai Tegangan yang diprediksi (Volt) menggunakan LSTM-ANN..... | 111 |
| Gambar 47 Nilai Arus yang diprediksi (Ampere) menggunakan LSTM-ANN..... | 112 |
| Gambar 48 Daya yang diprediksi (Watt) menggunakan LSTM-ANN..... | 112 |
| Gambar 49 Prediksi iradiasi menggunakan LSTM-ANN..... | 113 |
| Gambar 50 Training and validation loss LSTM-ANN. | 115 |
| Gambar 51 Alur Pre-training dan CNN Transfer Learning | 123 |
| Gambar 52 Dataset Pertumbuhan Tanaman Cabai | 124 |
| Gambar 53 Training Dan Validasi Akurasi Pertumbuhan Tanaman Cabai..... | 126 |
| Gambar 54 Hasil Training Minggu 1-10..... | 128 |
| Gambar 55 Confusion Matrix Prediksi Pertumbuhan Tanaman Cabai..... | 130 |
| Gambar 56 Dataset Hasil Panen | 131 |
| Gambar 57 Ilustrasi Proses Hasil Penghitungan Buah Cabai | 135 |
| Gambar 58 Hasil Prediksi Penghitungan Tanaman Dengan 3 Model Pembelajaran Transfer | 136 |
| Gambar 59 Training and Validation Accuracy..... | 137 |
| Gambar 60 Training And Loss Validation | 137 |
| Gambar 61 Oklusi Data Cabai | 138 |
| Gambar 62 Confusion Matrix | 139 |

DAFTAR TABEL

| | |
|---|-----|
| Tabel 1 State of The Art Penelitian | 11 |
| Tabel 2 Daftar Komponen Dalam Greenhouse Agrivoltaic | 71 |
| Tabel 3 Tuning Hyper-parameter | 105 |
| Tabel 4 Model kinerja LSTM-ANN | 116 |
| Tabel 5 Tuning Hyper-parameter | 125 |
| Tabel 6 Evaluasi Kinerja Pertumbuhan Tanaman | 129 |
| Tabel 7 Pembagian <i>Dataset</i> Untuk Pelatihan dan Pengujian..... | 132 |
| Tabel 8 Evaluasi Kinerja Model | 138 |

DAFTAR LAMPIRAN

| | |
|---|-----|
| Lampiran 1 Sertifikat Revisi Sidang Disertasi | 153 |
| Lampiran 2 Artikel-artikel Ilmiah..... | 156 |
| Lampiran 3 Tabel Matrik Penelitian | 195 |
| Lampiran 4 Foto-foto..... | 216 |

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Sebagai negara yang agraris, sebagian besar wilayah Indonesia merupakan lahan pertanian yang menjadi salah satu sumber penghasilan bagi masyarakat Indonesia, maka tidak berlebihan jika sektor pertanian menjadi sektor yang strategis di Indonesia karena peranannya yang penting dalam sistem ketahanan pangan negara.

PBB memperkirakan bahwa pada tahun 2050, jumlah penduduk dunia akan mencapai 9 miliar jiwa. Untuk mencukupinya, sekurang-kurangnya 50% produksi pangan global harus ditingkatkan. Indonesia memiliki jumlah penduduk yang besar, menurut Hasil Sensus Penduduk pada September tahun 2020 mencatat jumlah penduduk Indonesia sebesar 270,20 juta jiwa bertambah 32,56 juta jiwa dibandingkan hasil SP2010. Dengan luas 1,9 juta km², Indonesia memiliki kepadatan penduduk sebesar 141 orang per km², dengan tingkat pertumbuhan tahunan rata-rata 1,25 persen dari 2010 hingga 2020.^{1,2}

Seiring dengan peningkatan populasi di Indonesia kebutuhan pangan pun terus meningkat, hal ini harus sejalan dengan meningkatnya jumlah produksi pertanian. Kondisi ini menghadapi sejumlah tantangan, yaitu alih fungsi lahan pertanian menjadi lahan non-pertanian seperti perumahan dan kawasan industri. Akibatnya sumber daya lahan semakin berkurang sebanyak 0,49% hingga tahun 2023 (hampir mendekati 500 Ha pertahun) selain itu berkurangnya tenaga kerja petani usia produktif dan sistem pertanian Indonesia yang masih sebagian besar bergantung pada pertanian manual.^{3,4}

Masalah perubahan iklim pun menjadi tantangan tersendiri bagi petani dalam menentukan jadwal tanam mereka. Perubahan iklim yang dinamis mengakibatkan adanya variasi iklim di berbagai daerah di Indonesia dimana terdapat kondisi daerah yang kekeringan namun sebaliknya terjadi banjir di daerah lainnya. Untuk mengatasi tantangan ini, pertanian harus mengadopsi teknologi “pintar” yang mengoptimalkan penggunaan sumber daya dan memenuhi kebutuhan konsumsi yang meningkat.

Pertanian di perkotaan dilakukan untuk meningkatkan pendapatan atau untuk melakukan aktivitas yang berkaitan dengan pembuatan makanan untuk dikonsumsi. *Greenhouse* merupakan salah satu metode bagi pertanian perkotaan untuk mendapatkan hasil yang lebih optimal, karena dengan adanya *greenhouse* dapat meningkatkan perlindungan tanaman terhadap serangan hama, suhu lingkungan, intensitas hujan, dan

sinar matahari yang merupakan variabel iklim mikro. Lebih lanjut dapat pula mengoptimalkan pemeliharaan tanaman, pemupukan yang sesuai syarat pertumbuhan tanaman dan irigasi mikro, sehingga mampu meningkatkan produksi yang lebih berkualitas tanpa tergantung dengan perubahan musim.⁵⁻⁷

Salah satu tanaman komoditas hortikultura yang diharapkan dapat tumbuh sepanjang musim adalah cabai. Cabai dengan nama latin *Capsicum frutescens L* adalah salah satu komoditas pertanian yang menarik perhatian banyak orang. Permintaan dan ketersediaan cabai di Indonesia cenderung meningkat setiap tahunnya seiring dengan pertumbuhan populasi dan industri pengolahan cabai. Secara keseluruhan, dari data Badan Pusat Statistik (BPS) menunjukkan bahwa konsumsi cabai pada tahun 2013 mencapai lebih dari 300 ribu ton per tahun dan meningkat 18,21 ribu ton per tahun pada tahun 2014. Sementara itu konsumsi cabai per orang di Indonesia pada tahun 2003 adalah 1,35 kg pada tahun 2007 adalah 1,47 kg dan menjadi 4 kg/tahun.⁸

Prospek cabai cukup menjanjikan untuk memenuhi permintaan domestik dan ekspor. Permintaan untuk cabai, yang mencakup konsumsi, bibit, dan bahan baku industri, diproyeksikan meningkat 2,65% per tahun dari 2017 hingga 2021. Sebaliknya, produksi cabai diproyeksikan menurun 0,4% per tahun dari 2017 hingga 2021.

Penurunan produksi cabai dipengaruhi oleh penurunan luas lahan yang ditanami. Faktor iklim juga memainkan peran penting dalam produksi cabai. Pada musim hujan, bunga-bunga cabai akan berguguran dan produksi cabai cenderung menurun, sehingga pasokannya menjadi langka.⁹

Selain itu, serangan hama, suhu lingkungan, angin dan humiditas tanah adalah contoh-contoh lain faktor-faktor penghambat eksternal dalam pertanian di lahan terbuka karena dapat menyebabkan terganggunya pertumbuhan tanaman dan juga menyebabkan terjadinya penurunan produktivitas pertanian. Untuk mengurangi pengaruh negatif dari faktor iklim, budidaya cabai dapat dilakukan dengan teknik khusus seperti penggunaan *greenhouse*.

Budidaya tanaman dalam *greenhouse* merupakan salah satu alternatif solusi yang baik untuk mengendalikan kendala-kendala tersebut. Pengamatan dan kendali iklim mikro dalam suatu *greenhouse* sangat penting dilakukan menggunakan aplikasi teknologi atau digital farming.¹⁰⁻¹⁹

Pertanian pintar, atau dikenal juga sebagai pertanian digital, menerapkan otomatisasi dengan campur tangan manusia yang minimal melalui penggunaan komponen elektronik seperti pengendali, sensor dan aktuator. Pengendalian berperan sebagai otak utama sistem yang memproses masukan dari sensor. Beberapa penelitian telah membuktikan efektivitas pertanian pintar di rumah kaca untuk menciptakan lingkungan ideal bagi tanaman²⁰⁻²⁵. Sensor pintar ini mengumpulkan data-data penting untuk memantau tanaman dan beradaptasi dengan perubahan lingkungan, meningkatkan pengelolaan tanaman dan ternak. Sensor pintar yang didukung oleh IoT memungkinkan pemantauan jarak jauh tanpa kehadiran petani.²⁵⁻²⁹

Berbagai teknologi yang dapat diaplikasikan pada bidang pertanian memungkinkan terwujudnya pertanian pintar (*smart farming*) dimana petani dapat mengendalikan pemeliharaan tanaman secara otomatis dari jarak jauh melalui teknologi *IoT monitoring*. Data-data realtime yang tepat dari pengamatan dan pengendalian iklim mikro ini dibutuhkan untuk menghasilkan keputusan yang tepat bagi tindakan aktuator selanjutnya.³⁰⁻³⁴

Aktuator berperan penting dalam pertanian pintar dengan mengotomatisasi tugas-tugas seperti penyiraman melalui pompa atau melaksanakan aktivitas kompleks seperti pemanenan dengan robot.. Sistem otonom ini dapat menangani setiap tahap pertanian, mulai dari penanaman hingga proses pasca-panen.^{7,12-16,35-37}

Greenhouse merupakan salah satu metode untuk menggabungkan teknologi dalam pertanian ini yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan tanaman dan bebas hama. Teknologi ini dapat digunakan sebagai pengganti pertanian yang dikondisikan untuk meningkatkan hasil pertanian. Pengaturan otomatis yang membutuhkan pemantauan/monitoring terintegrasi diperlukan untuk memastikan bahwa kondisi di dalam *greenhouse* sesuai dan ideal untuk tanaman. Teknologi pertanian digital dapat memastikan hasil panen tetap tinggi bahkan dalam kondisi cuaca yang tidak menguntungkan.³⁸. Namun, sistem ini bergantung pada pasokan daya yang andal, yang menjadi masalah di daerah seperti Sumatera Selatan, di mana konektivitas energi tidak konsisten. Tantangan ini dapat diatasi dengan menggantikan listrik konvensional dengan sistem fotovoltaik (PV). Ketersediaan energi surya yang melimpah di Sumatera Selatan memastikan keberlanjutan pertanian pintar di Palembang³⁹⁻⁴².

Smart farming memerlukan pasokan energi listrik yang terus-menerus dan hal ini menjadi dilema untuk petani yang berada di lokasi yang belum terjangkau listrik PLN atau daerah dengan pasokan listrik yang tidak stabil. Masalah ini dapat diatasi dengan aplikasi listrik energi surya untuk pertanian. Indonesia, Sumatera Selatan pada umumnya memiliki potensi energi surya yang besar dan belum dimanfaatkan maksimal. Pemasangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) skala perumahan dapat dilakukan berdampingan dengan pengaturan tanaman sehingga PLTS tidak mengorbankan lahan subur yang justru sangat penting bagi pertanian.

Konsep pemanfaatan energi surya yang berdampingan dengan pertanian disebut dengan *Agrivoltaic*. Agri dari kata *agriculture* dan *voltaic* dari kata *photovoltaic*. Efek PV (*Photovoltaic*) adalah pembangkitan energi listrik secara langsung dengan mengubah energi foton yang dibawa iradiasi matahari menjadi energi listrik. Indonesia memiliki potensi besar akan pembangkitan energi listrik tenaga surya.³⁹⁻⁴³

Berbagai alternatif pemasangan PV panel pada lahan pertanian, diantaranya pemasangan PV panel di atas tanaman sehingga tanaman mendapat naungan dari PV panel dan area dibawah PV panel akan lebih sejuk dan menghindarkan panel dari kemungkinan *overheated* atau panas berlebih.

Studi ini mengeksplorasi pemasangan sistem pertanian pintar berbasis tenaga surya di Palembang, Sumatera Selatan. Mengingat melimpahnya energi surya di wilayah tersebut, sistem fotovoltaik menawarkan solusi berkelanjutan untuk mendukung pertanian digital. Studi ini meninjau berbagai sensor, aktuator, dan contoh-contoh pertanian otomatis yang diimplementasikan secara lokal dan global, dengan menekankan potensi energi surya untuk mendukung pertanian pintar di Palembang.

Disertasi ini bertujuan untuk menyelaraskan teknologi *smart farming* dan pengembangan energi terbarukan melalui implementasi energi surya menuju *green economy* di sektor pertanian khususnya dalam pengendalian iklim mikro secara kontinu dalam *greenhouse* dengan metode neural network (LSTM-ANN) dan CNN Transfer Learning.

1.2 Novelty dan Kontribusi Penelitian

Penelitian ini menawarkan kebaruan melalui integrasi teknologi modern dalam skema sistem *agrivoltaic* yang memanfaatkan energi surya untuk mendukung pengelolaan pertanian di daerah tropis dalam hal ini adalah Palembang, Sumatera Selatan. Sistem *agrivoltaic* yang digunakan dalam penelitian ini tidak hanya menyediakan energi bagi *greenhouse*, tetapi juga menciptakan lingkungan yang lebih optimal bagi pertumbuhan tanaman dengan memanfaatkan panel surya untuk mengendalikan iklim mikro dalam *greenhouse*. Pendekatan ini memungkinkan terciptanya lingkungan yang lebih stabil dan efisien bagi pertumbuhan tanaman cabai, yang sering terpengaruh oleh fluktuasi cuaca di wilayah tropis.

Untuk memastikan lingkungan yang ideal dalam *greenhouse*, penelitian ini membahas pemodelan dan desain sistem kendali otomatis untuk mengatur iklim mikro dalam skema *agrivoltaic*, yang mencakup data-data seperti suhu, kelembapan, dan iradiasi matahari yang diperoleh dari IoT monitoring. Pendekatan ini menggunakan metode Neural Network (NN) yaitu LSTM-ANN sebagai inti dari model pengendalian ini, untuk memprediksi luaran dari PLTS.

Lebih jauh lagi, penelitian ini mengkaji prediksi pertumbuhan dan hasil panen tanaman cabai dengan menggunakan pendekatan Convolutional Neural Network (CNN) melalui model transfer learning. Model-model seperti EfficientNetV2L, EfficientNetV2M, dan ResNet50 yang telah dilatih, kemudian disesuaikan dengan data spesifik cabai dari lapangan, memungkinkan model untuk menghasilkan prediksi yang lebih akurat mengenai pertumbuhan tanaman cabai dan jumlah cabai. Hasil prediksi ini membantu memperkirakan waktu panen yang tepat dan mengoptimalkan penggunaan sumber daya seperti air dan nutrisi untuk menghasilkan hasil panen yang maksimal.

Dengan integrasi LSTM-ANN untuk prediksi *output* PLTS dan CNN untuk prediksi pertumbuhan dan hasil panen cabai, penelitian ini diharapkan mampu memberikan solusi praktis dalam pengelolaan *greenhouse* tenaga surya, sehingga menciptakan sistem pertanian yang lebih adaptif, presisi, dan berkelanjutan. Prediksi yang akurat mengenai kondisi iklim mikro dan pertumbuhan serta jumlah hasil panen cabai memungkinkan petani untuk melakukan pengambilan keputusan yang lebih tepat dan efektif. Model ini tidak hanya mendukung keberlangsungan hidup tanaman, tetapi juga memastikan bahwa

tanaman mendapatkan perlakuan yang optimal sesuai dengan parameter yang telah terdefiniskan.

Penerapan IoT monitoring sebagai bagian dari pengelolaan iklim mikro di *greenhouse* adalah aspek baru dalam penelitian ini, menggabungkan teknologi otomatisasi dengan efisiensi penggunaan energi terbarukan.

Penelitian ini berpotensi untuk menjadi referensi dalam pengembangan *Smart Farming*, dimana integrasi IoT, AI, dan energi terbarukan dapat menciptakan sistem pertanian modern yang efisien. Dengan keberhasilan dalam mengendalikan iklim mikro, prediksi pertumbuhan dan prediksi hasil panen secara otomatis, penelitian ini menawarkan peluang untuk mengembangkan strategi pengelolaan pertanian yang lebih baik di daerah-daerah dengan potensi energi surya tinggi, seperti Indonesia.

1.3 Rumusan Masalah

Dalam pengelolaan *greenhouse* dengan skema *agrivoltaic*, terdapat beberapa tantangan utama yang perlu diatasi untuk mencapai efisiensi sistem dan optimalisasi produksi tanaman, yaitu:

- a. Bagaimana sistem kendali iklim mikro di dalam *greenhouse* berdasarkan data lingkungan yang ada?
- b. Bagaimana pendekatan Long Short-Term Memory-Artificial Neural Network (LSTM-ANN) dapat digunakan untuk memprediksi *output* dari Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) secara akurat dalam kondisi variabel cuaca yang dinamis?
- c. Bagaimana memanfaatkan model Convolutional Neural Network (CNN) dengan transfer learning untuk memprediksi pertumbuhan tanaman dan hasil panen berdasarkan data visual?
- d. Bagaimana mengintegrasikan sistem IoT untuk pemantauan jarak jauh dalam rangka meningkatkan efisiensi pengelolaan *greenhouse* tenaga surya dalam skema *agrivoltaic* ?

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

- a. Mengimplementasikan sistem kendali iklim mikro yang mampu mengatur suhu dan kelembapan udara dalam *greenhouse*.
- b. Mengimplementasikan model prediksi *output* PLTS dengan pendekatan LSTM-ANN.

- c. Memprediksi pertumbuhan dan hasil panen tanaman cabai berdasarkan data visual yang dikumpulkan secara periodik
- d. Memantau iklim mikro pada *greenhouse* melalui teknologi *IoT monitoring*

1.5 Pembatasan Masalah

Dalam penelitian ini, terdapat beberapa pembatasan yang diharapkan dapat untuk memperjelas cakupan dan fokus dari penelitian yang dilakukan, yaitu:

- a. Skema *Agrivoltaic*

Penelitian ini hanya mencakup pengaturan konfigurasi solar panel dan tata letak *greenhouse* untuk memaksimalkan penyerapan cahaya pada panel surya dan mengurangi pengaruh bayangan pada tanaman. Pembahasan tentang optimalisasi struktur mekanis atau desain panel surya tidak termasuk dalam penelitian ini.

- b. Cakupan Kendali Iklim Mikro

Sistem kendali iklim mikro dalam *greenhouse* yang dikembangkan hanya difokuskan pada pengaturan suhu, kelembaban udara, dan kelembaban tanah dalam *greenhouse*.

Variabel lain seperti konsentrasi karbon dioksida dan pencahayaan buatan tidak termasuk dalam pengendalian yang diimplementasikan pada penelitian ini.

- c. Prediksi *Output* PLTS Menggunakan Model LSTM-ANN

Model prediksi *output* PLTS yang dibangun menggunakan pendekatan LSTM-ANN hanya memanfaatkan data historis seperti intensitas iradiasi matahari, arus, tegangan dan daya PLTS.

Variabel lain yang dapat mempengaruhi *output* seperti efisiensi panel surya dan degradasi modul tidak dibahas secara mendalam.

- d. Model CNN untuk Prediksi Pertumbuhan dan Hasil Panen

Pendekatan CNN yang diaplikasikan dalam penelitian ini untuk prediksi pertumbuhan tanaman dan hasil panen dan hanya difokuskan pada analisis citra visual tanaman yang diambil secara berkala menggunakan kamera.

Data tambahan seperti pengukuran manual atau citra hiperspektral tidak termasuk dalam cakupan penelitian.

- e. *IoT Monitoring*

Dalam kajian ini, ruang lingkup dibatasi pada penggunaan sistem IoT monitoring melalui aplikasi Node-Red yang hanya bertujuan untuk pemantauan suhu,

kelembapan tanah, dan kelembapan udara. Kegiatan pengendalian atau manajemen variabel tersebut dari jarak jauh tidak termasuk dalam cakupan penelitian ini. Selain itu, proses pengembangan teknis atau pembangunan sistem program di Node-Red juga tidak akan dibahas secara mendalam, dengan fokus utama hanya pada aspek pengumpulan dan penyajian data.

f. Lokasi dan Kondisi Uji Coba

Pengujian dan pengumpulan data dilakukan di Talang Kemang Kelurahan Gandus Kecamatan Gandus Palembang dengan kondisi cuaca dan iklim yang cukup spesifik, yaitu termasuk dalam iklim tropis (3.0073° S, 104.7197° E) dengan iradiasi matahari tertinggi mencapai 1278 W/m^2 . Variasi iklim di luar lokasi penelitian tidak menjadi bagian dari penelitian ini.

g. Objek Penelitian

Tanaman cabai yang menjadi objek penelitian ini adalah cabai rawit dengan nama ilmiah *Capsicum Frutescens* L untuk pengamatan pertumbuhan dan jumlah buah untuk analisis hasil panen. Parameter tingkat kematangan, ukuran, warna, kandungan nutrisi spesifik, atau studi mendalam mengenai senyawa capsaicin tidak termasuk dalam ruang lingkup penelitian ini.

1.6 Metodologi Penelitian

Penelitian ini mengaplikasikan pendekatan deskriptif dengan teknik pengumpulan data melalui data primer dan sekunder. Data primer diperoleh langsung dari pengamatan di lapangan, sedangkan data sekunder berasal dari kajian pustaka terkait. Analisis data dilakukan dengan menggunakan *content analysis*, yang bertujuan untuk menelaah data secara kritis sehingga dapat menarik kesimpulan dan memberikan rekomendasi atau saran yang relevan. Tahapan penulisan dalam penelitian ini meliputi:

1. Studi Literatur (*State of the Art*):

Tahap awal penelitian dilakukan dengan studi literatur untuk memahami perkembangan terkini (*state of the art*) dalam teknologi *agrivoltaic*, sistem kontrol iklim mikro, *IoT monitoring*, dan model (LSTM-ANN dan CNN-Transfer Learning). Studi ini juga bertujuan untuk mengidentifikasi *research gap* dan merumuskan kerangka kerja penelitian.

2. Desain Sistem
 - a. Sistem *off-grid* : sistem fotovoltaik dirancang untuk menyediakan suplai daya *off-grid* pada sistem agrivoltaik di *greenhouse*. Desain ini memastikan pemanfaatan energi surya untuk mendukung operasional sistem
 - b. Kendali iklim mikro *greenhouse* : *greenhouse* dirancang dengan fokus pada kendali iklim mikro (suhu lingkungan, kelembapan udara, kelembapan tanah) untuk memastikan kondisi yang optimal bagi pertumbuhan tanaman.
 - c. Desain *IoT monitoring* : Sistem IoT dirancang untuk memantau variabel lingkungan di *greenhouse*, seperti suhu, kelembapan, kelembapan tanah, dan pertumbuhan tanaman melalui perangkat kamera.
 - d. Desain model hibrid LSTM-ANN dan CNN
 - LSTM-ANN dirancang untuk memprediksi *output* PLTS guna memastikan stabilitas suplai energi.
 - CNN-*Transfer Learning* digunakan untuk prediksi pertumbuhan tanaman dan hasil panen berbasis analisis citra visual.
3. Realisasi sistem
4. Simulasi dan Pengujian: Dilakukan untuk mendesain sistem yang optimal dan mempersiapkan pengembangan sistem secara lebih efektif.
5. Implementasi dan validasi sistem: Pengujian langsung di lapangan serta pengujian *online* untuk memvalidasi sistem yang telah dirancang.

1.7 Sistematika Penulisan Disertasi

Laporan disertasi ini terdiri dari 7 bab, yaitu Bab 1 menjelaskan pendahuluan dari penelitian. Bab 2 membahas *state of the art*, teori mendasar tentang *smart farming* yaitu tentang *agrivoltaic*, *PV system*, *monitoring* dan kendali kecerdasan buatan iklim mikro *greenhouse* dan analisa *PV system*. Bab 3 menjelaskan metodologi penelitian. Bab 4 membahas kontrol iklim mikro *greenhouse* dalam skema *agrivoltaic*. Bab 5 membahas prediksi energi surya dengan pendekatan LSTM-ANN. Bab 6 membahas prediksi pertumbuhan dan hasil panen cabai dengan CNN *transfer learning*. Bab 7 berisi kesimpulan dan saran.

DAFTAR PUSTAKA

1. Badan Pusat Statistik. Hasil Sensus Penduduk (SP2020). *Badan Pusat Statistik* <https://www.bps.go.id/id/pressrelease/2021/01/21/1854/hasil-sensus-penduduk-2020.html> (2021).
2. Badan Pusat Statistik. Luas Penutupan Lahan Indonesia di Dalam dan di Luar Kawasan Hutan Tahun 2014-2021 menurut Kelas (Ribu Ha). *Badan Pusat Statistik* <https://www.bps.go.id/id/statistics-table/1/MjA4NCMx/luas-penutupan-lahan-indonesia-di-dalam-dan-di-luar-kawasan-hutan-tahun-2014-2021-menurut-kelas-ribu-ha-.html>. (2023).
3. Badan Pusat Statistik. Produksi Tanaman Sayuran 2020. *Badan Pusat Statistik* (2021).
4. Winoto, J. & Siregar, H. *1 AGRICULTURAL DEVELOPMENT IN INDONESIA: CURRENT PROBLEMS, ISSUES, AND POLICIES AGRICULTURAL DEVELOPMENT IN INDONESIA: CURRENT PROBLEMS, ISSUES, AND POLICIES*.
5. Shang, L., Heckelei, T., Gerullis, M. K., Börner, J. & Rasch, S. Adoption and diffusion of digital farming technologies - integrating farm-level evidence and system interaction. *Agricultural Systems* vol. 190 at <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103074> (2021).
6. Budiyanto, H., Haris, M., Setiawan, A. B. & Budiyantoputra, M. I. N. *Greenhouse Bambu Untuk Tanaman Sayur Hidrokanik Dengan Listrik Tenaga Surya*. (Selaras Media Kreasindo, Malang, 2019).
7. Telaumbanua, Mareli;Purwantana, Bambang;Sutiarso, L. rancang bangun aktuator. *Agritech* **34**, 213–222 (2014).
8. Badan Pusat Statistik. Konsumsi Cabai. *Badan Pusat Statistik* <https://www.bps.go.id/publication/2019/06/25/bbf8ec1716fb4583687996c3/kajian-konsumsi-bahan-pokok-tahun-2017.html> (2017).
9. Warisno, S. P. K. P. K. D. *Peluang Usaha Dan Budi Daya Cabai*. (Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 2018).
10. Sunarjono Hendro. *Budidaya Dan Pengaturan Panen Sayuran Dataran Rendah*. (Penebar Swadaya Pusat Survei Geologi, Jakarta, 2013).
11. Dewi, T., Risma, P., Oktarina, Y. & Muslimin, S. *Visual Servoing Design and*

- Control for Agriculture Robot; a Review. 2018 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICECOS) (2018).*
12. Oktarina, Y., Dewi, T., Risma, P. & Nawawi, M. Tomato Harvesting Arm Robot Manipulator; A Pilot Project. in *Journal of Physics: Conference Series* vol. 1500 (Institute of Physics Publishing, 2020).
 13. Dewi, T., Risma, P. & Oktarina, Y. Fruit sorting robot based on color and size for an agricultural product packaging system. *Bull. Electr. Eng. Informatics* **9**, 1438–1445 (2020).
 14. Yusuf, M. D., Kusumanto, R. D., Oktarina, Y., Dewi, T. & Risma, P. BLOB Analysis for Fruit Recognition and Detection. *Comput. Eng. Appl.* **7**, (2018).
 15. Dewi, T., Anggraini, C., Risma, P., Oktarina, Y. & Muslikhin, M. MOTION CONTROL ANALYSIS OF TWO COLLABORATIVE ARM ROBOTS IN FRUIT PACKAGING SYSTEM. *SINERGI* **25**, 217 (2021).
 16. Oktarina, Y., Risma, P., Dewi, T. & Pratama, K. R. *Pneumatic-Powered Fruit Sorting Arm Robot Manipulator Tresna Dewi Sriwijaya State Polytechnic Pneumatic-Powered Fruit Sorting Arm Robot Manipulator.* vol. 63 <https://www.researchgate.net/publication/350792854> (2021).
 17. Dewi, T. & Kusumanto, R. D. *Workspace and Collaboration System Design of Two Robot Manipulators.*
 18. Achour, Y., Ouammi, A. & Zejli, D. Technological progresses in modern sustainable greenhouses cultivation as the path towards precision agriculture. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **147**, 111251 (2021).
 19. Castañeda-Miranda, A. & Castaño-Meneses, V. M. Internet of things for smart farming and frost intelligent control in greenhouses. *Comput. Electron. Agric.* **176**, 105614 (2020).
 20. Liao, M.-S. *et al.* On precisely relating the growth of *Phalaenopsis* leaves to greenhouse environmental factors by using an IoT-based monitoring system. *Comput. Electron. Agric.* **136**, 125–139 (2017).
 21. Kumar, A., Singh, V., Kumar, S., Jaiswal, S. P. & Bhadoria, V. S. IoT enabled system to monitor and control greenhouse. *Mater. Today Proc.* **49**, 3137–3141 (2022).
 22. Singh, G., Singh, P. P., Lubana, P. P. S. & Singh, K. G. Formulation and validation

- of a mathematical model of the microclimate of a greenhouse. *Renew. Energy* **31**, 1541–1560 (2006).
23. Kim, H.-J. *et al.* Design and testing of an autonomous irrigation controller for precision water management of greenhouse crops. *Eng. Agric. Environ. Food* **8**, 228–234 (2015).
 24. Paraforos, D. S. & Griepentrog, H. W. Multivariable greenhouse climate control using dynamic decoupling controllers. *IFAC Proc. Vol.* **46**, 305–310 (2013).
 25. Hernández-Morales, C. A., Luna-Rivera, J. M. & Perez-Jimenez, R. Design and deployment of a practical IoT-based monitoring system for protected cultivations. *Comput. Commun.* **186**, 51–64 (2022).
 26. Chang, C.-L., Chung, S.-C., Fu, W.-L. & Huang, C.-C. Artificial intelligence approaches to predict growth, harvest day, and quality of lettuce (*Lactuca sativa* L.) in a IoT-enabled greenhouse system. *Biosyst. Eng.* **212**, 77–105 (2021).
 27. Abioye, E. A. *et al.* IoT-based monitoring and data-driven modelling of drip irrigation system for mustard leaf cultivation experiment. *Inf. Process. Agric.* **8**, 270–283 (2021).
 28. Benyazza, H., Bouhedda, M. & Rebouh, S. Zoning irrigation smart system based on fuzzy control technology and IoT for water and energy saving. *J. Clean. Prod.* **302**, 127001 (2021).
 29. Collado, E., Valdés, E., García, A. & Sáez, Y. Design and implementation of a low-cost IoT-based agroclimatic monitoring system for greenhouses. *AIMS Electron. Electr. Eng.* **5**, 251–283 (2021).
 30. Ouammi, A., Achour, Y., Dagdougui, H. & Zejli, D. Optimal operation scheduling for a smart greenhouse integrated microgrid. *Energy Sustain. Dev.* **58**, 129–137 (2020).
 31. Jamil, F. *et al.* Optimal smart contract for autonomous greenhouse environment based on IoT blockchain network in agriculture. *Comput. Electron. Agric.* **192**, 106573 (2022).
 32. La Notte, L. *et al.* Hybrid and organic photovoltaics for greenhouse applications. *Appl. Energy* **278**, 115582 (2020).
 33. Ulum, M. B. DESAIN INTERNET OF THINGS (IoT) UNTUK OPTIMASI PRODUKSI PADA AGROINDUSTRI KARET. *Sebatik* **22**, 69–73 (2018).

34. Rusdianasari, R., Panca Putra, P. & Dewi, T. *MPPT Implementation for Solar-Powered Watering System Performance Enhancement Robotics for Agriculture View Project Journa; View Project Tresna Dewi Sriwijaya State Polytechnic MPPT Implementation for Solar-Powered Watering System Performance Enhancement.* vol. 63 <https://www.researchgate.net/publication/348919500> (2021).
35. Dewi, T., Mulya, Z., Risma, P. & Oktarina, Y. BLOB analysis of an automatic vision guided system for a fruit picking and placing robot. *Int. J. Comput. Vis. Robot.* **11**, 315–327 (2021).
36. Dewi, T., Risma, P., Oktarina, Y. & Muslimin, S. *Visual Servoing Design and Control for Agriculture Robot; a Review.* (2018).
37. Dewi, T. & Kusumanto, R. D. Workspace and Collaboration System Design of Two Robot Manipulators. in.
38. Hahn, F. Fuzzy controller decreases tomato cracking in greenhouses. *Comput. Electron. Agric.* **77**, 21–27 (2011).
39. Dewi, T. & Kusumanto, R. *Geographical Location Effects on PV Panel Output-Comparison Between Highland and Lowland Installation in South Sumatra, Indonesia.* vol. 63 (2021).
40. Dewi, T., Risma, P. & Oktarina, Y. A Review of Factors Affecting the Efficiency and Output of a PV System Applied in Tropical Climate. in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* vol. 258 (Institute of Physics Publishing, 2019).
41. Sasmanto, A. A., Dewi, T. & Rusdianasari. Eligibility Study on Floating Solar Panel Installation over Brackish Water in Sungsang, South Sumatra. *Emit. Int. J. Eng. Technol.* **8**, 240–255 (2020).
42. Junianto, B., Dewi, T. & Sitompul, C. R. Development and Feasibility Analysis of Floating Solar Panel Application in Palembang, South Sumatra. in *Journal of Physics: Conference Series* vol. 1500 (Institute of Physics Publishing, 2020).
43. Zhang, K., Yu, J. & Ren, Y. Demand side management of energy consumption in a photovoltaic integrated greenhouse. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* **134**, 107433 (2022).
44. Santos, D. O. S., Mj, C. & Technology, E. MASTER THESIS REPORT

- Agrivoltaic system : a possible synergy between agriculture and solar energy. (2020).
45. Malu, P. R., Sharma, U. S. & Pearce, J. M. Agrivoltaic potential on grape farms in India. *Sustain. Energy Technol. Assessments* **23**, 104–110 (2017).
 46. Asep Harpenas, R. D. *Budi Daya Cabai Unggul*. (PT Niaga Swadaya).
 47. Zahrawi, A. A. & Aly, A. M. A Review of Agrivoltaic Systems: Addressing Challenges and Enhancing Sustainability. *Sustainability* vol. 16 at <https://doi.org/10.3390/su16188271> (2024).
 48. Jäger, K.-D., Isabella, O., Smets, A. H. M., Swaaij, R. A. C. M. M. van & Zeman, M. T. A.-T. T.-. Solar energy : fundamentals, technology and systems. at <https://doi.org/LK> - <https://worldcat.org/title/1013815023> (2016).
 49. Rahman, M. M. *et al.* Prospective Methodologies in Hybrid Renewable Energy Systems for Energy Prediction Using Artificial Neural Networks. *Sustainability* vol. 13 at <https://doi.org/10.3390/su13042393> (2021).
 50. ABB Ltd. Photovoltaic plants. Cutting edge technology. From sun to socket. 1–158 (2019).
 51. Al-shamani, A. N. *et al.* Design & sizing of stand-alone solar power systems a house Iraq. *Recent Adv. Renew. Energy Sources* 145–150 (2013).
 52. 35. K. Jäger, O. Isabella, A. H. M. Smets, R A.C.M.M van Swaaij, and M. Z. *Solar Energy - The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems*. (UIT Cambridge, 2016).
 53. Gorjian, Shiva ; Bousi, Erion, Ö. E. Ö. Progress and challenges of crop production and electricity generation in agrivoltaic systems using semi-transparent photovoltaic technology. *Renew. Sustain. Energy Rev.* (2022) doi:10.1016/j.rser.2022.112126.
 54. Larasati, N., Dewi, T. & Oktarina, Y. Object Following Design for a Mobile Robot using Neural Network. *Comput. Eng. Appl. J.* **6**, 5–14 (2017).
 55. Van Beveren, P. J. M., Bontsema, J., Van Straten, G. & Van Henten, E. J. Minimal heating and cooling in a modern rose greenhouse. *Appl. Energy* **137**, 97–109 (2015).
 56. Joudi, K. A. & Farhan, A. A. A dynamic model and an experimental study for the internal air and soil temperatures in an innovative greenhouse. *Energy Convers.*

- Manag.* **91**, 76–82 (2015).
57. Omar, M. N. *et al.* Simulation and validation model of cooling greenhouse by solar energy (P V) integrated with painting its cover and its effect on the cucumber production. *Renew. Energy* **172**, 1154–1173 (2021).
 58. Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S. & Bochtis, D. Machine Learning in Agriculture: A Review. *Sensors* vol. 18 at <https://doi.org/10.3390/s18082674> (2018).
 59. Sharma, R. Artificial Intelligence in Agriculture: A Review. in *2021 5th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)* 937–942 (2021). doi:10.1109/ICICCS51141.2021.9432187.
 60. Bezari, S., Adda, A., Kherrou, S. & Zarrit, R. Artificial Neural Network Application for the Prediction of Global Solar Radiation Inside a Greenhouse BT - Renewable Energy Resources and Conservation. in (ed. Pong, P.) 3–9 (Springer Nature Switzerland, Cham, 2024). doi:10.1007/978-3-031-59005-4_1.
 61. Escamilla-García, A., Soto-Zarazúa, G. M., Toledano-Ayala, M., Rivas-Araiza, E. & Gastélum-Barrios, A. Applications of Artificial Neural Networks in Greenhouse Technology and Overview for Smart Agriculture Development. *Applied Sciences* vol. 10 at <https://doi.org/10.3390/app10113835> (2020).
 62. Mukhtar, M. *et al.* Development and Comparison of Two Novel Hybrid Neural Network Models for Hourly Solar Radiation Prediction. *Applied Sciences* vol. 12 at <https://doi.org/10.3390/app12031435> (2022).
 63. Faris Ali, N. & Atef, M. An efficient hybrid LSTM-ANN joint classification-regression model for PPG based blood pressure monitoring. *Biomed. Signal Process. Control* **84**, 104782 (2023).
 64. Kowsher, M. *et al.* LSTM-ANN & BiLSTM-ANN: Hybrid deep learning models for enhanced classification accuracy. *Procedia Comput. Sci.* **193**, 131–140 (2021).
 65. Ghosh, A., Sufian, A., Sultana, F., Chakrabarti, A. & De, D. *Fundamental Concepts of Convolutional Neural Network. Intelligent Systems Reference Library* vol. 172 (2019).
 66. Agga, A., Abbou, A., Labbadi, M., Houm, Y. El & Ou Ali, I. H. CNN-LSTM: An efficient hybrid deep learning architecture for predicting short-term photovoltaic power production. *Electr. Power Syst. Res.* **208**, 107908 (2022).

67. Madondo, M. & Gibbons, T. Learning and Modeling Chaos Using LSTM Recurrent Neural Networks. *MICS 2018 Proc.* 1–14 (2018).
68. Tovar, M., Robles, M. & Rashid, F. PV Power Prediction, Using CNN-LSTM Hybrid Neural Network Model. Case of Study: Temixco-Morelos, México. *Energies* vol. 13 at <https://doi.org/10.3390/en13246512> (2020).
69. Al-azazi, F. A. & Ghurab, M. ANN-LSTM: A deep learning model for early student performance prediction in MOOC. *Heliyon* **9**, (2023).
70. Battisti, F. *et al.* hLSTM-Aging: A Hybrid LSTM Model for Software Aging Forecast. *Applied Sciences* vol. 12 at <https://doi.org/10.3390/app12136412> (2022).
71. Ibrahim, M. S., Gharghory, S. M. & Kamal, H. A. A hybrid model of CNN and LSTM autoencoder-based short-term PV power generation forecasting. *Electr. Eng.* **106**, 4239–4255 (2024).
72. Asrari, A., Wu, T. X. & Ramos, B. A Hybrid Algorithm for Short-Term Solar Power Prediction—Sunshine State Case Study. *IEEE Trans. Sustain. Energy* **8**, 582–591 (2017).
73. Wentz, V. H., Maciel, J. N., Gimenez Ledesma, J. J. & Ando Junior, O. H. Solar Irradiance Forecasting to Short-Term PV Power: Accuracy Comparison of ANN and LSTM Models. *Energies* vol. 15 at <https://doi.org/10.3390/en15072457> (2022).
74. Chen, S., Li, C., Stull, R. & Li, M. Improved satellite-based intra-day solar forecasting with a chain of deep learning models. *Energy Convers. Manag.* **313**, 118598 (2024).
75. Sushmit, M. M. & Mahbulul, I. M. Forecasting solar irradiance with hybrid classical–quantum models: A comprehensive evaluation of deep learning and quantum-enhanced techniques. *Energy Convers. Manag.* **294**, 117555 (2023).
76. Phan, Q.-T., Wu, Y.-K. & Phan, Q.-D. An Approach Using Transformer-based Model for Short-term PV generation forecasting. in *2022 8th International Conference on Applied System Innovation (ICASI)* 17–20 (2022). doi:10.1109/ICASI55125.2022.9774491.
77. Chamara, N., Bai, G. & Ge, Y. AICropCAM: Deploying classification, segmentation, detection, and counting deep-learning models for crop monitoring on the edge. *Computers and Electronics in Agriculture* at

- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169923008086> (2023).
78. Mohammed, A. A. Radiation use efficiency of maize under influence of different levels of nitrogen fertilization and two different seasonal conditions. *Iraqi J. Agric. Sci.* **49**, 1146–1159 (2018).
 79. Zhang, X., Bu, J., Zhou, X. & Wang, X. Automatic pest identification system in the greenhouse based on deep learning and machine vision. *Front. Plant Sci.* **14**, 1–13 (2023).
 80. Baig, M. J. A., Iqbal, M. T., Jamil, M. & Khan, J. Design and implementation of an open-Source IoT and blockchain-based peer-to-peer energy trading platform using ESP32-S2, Node-Red and, MQTT protocol. *Energy Reports* **7**, 5733–5746 (2021).