

RANCANG BANGUN SISTEM KONTROL ADAPTIF UNTUK RUMAH TANAMAN DI KAWASAN BERIKLIM TROPIKA

FOLKES E. LAUMAL



**PROGRAM STUDI ILMU KETEKNIKAN PERTANIAN
SEKOLAH PASCASARJANA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2023**

@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
Bogor Indonesia

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mempublikasikan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University



PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa disertasi dengan judul “Rancang bangun sistem kontrol adaptif untuk rumah tanaman di kawasan beriklim tropika” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir disertasi ini. Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, 4 Mei Tahun 2023

Folkes E. Laumal
F163190061

RINGKASAN

Folkes E. Laumal. Rancang bangun sistem kontrol adaptif untuk rumah tanaman di kawasan beriklim tropika. Dibimbing oleh Prof. Dr. Ir. Herry Suhardiyanto, M.Sc., Dr. Ir. Mohamad Solahudin, M.Si. dan Dr. Slamet Widodo, S.TP., M.Sc.

Rumah tanaman merupakan bangunan untuk membudidayakan tanaman pertanian dengan parameter iklim mikro yang dapat dikendalikan, seperti suhu udara dan kelembaban udara. Peningkatan suhu udara akibat *greenhouse effect* telah berhasil dikurangi melalui penggunaan sistem pendingin seperti evaporasi dan *water chiller*. Untuk tanaman-tanaman yang sensitif terhadap suhu udara rendah, seperti Purwoceng, pembudidayaan di dalam rumah tanaman memerlukan pengendalian yang ketat berupa teknologi kontrol otomatis. Beberapa teknologi kontrol berbasis model dan sensor, telah dikembangkan dan bekerja cukup baik secara simulasi maupun penerapan. Namun penempatan sensor yang tidak representatif, perubahan cuaca terhadap aktivitas kontrol dan tingginya penggunaan energi listrik masih menjadi persoalan dalam upaya memaksimalkan pertumbuhan tanaman pada rumah tanaman di wilayah tropika.

Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem kontrol suhu udara yang adaptif terhadap perubahan cuaca, dengan lokasi penempatan sensor yang representatif dan efisien dalam penggunaan energi listrik. Penelitian berlangsung selama 10 bulan pada rumah tanaman type *arch* berukuran 8x24 m², di Laboratorium Lapangan Siswadi Soepardjo, Departemen Teknik Mesin dan Biosystem IPB. Penelitian dilakukan dalam empat tahapan yaitu identifikasi sebaran suhu udara dan penentuan lokasi sensor di dalam rumah tanaman, pengembangan model adaptif berbasis data *history*, rancang bangun teknologi kontrol berbasis LoRa dan implementasi sistem.

Identifikasi suhu udara diawali dengan mengukur suhu udara pada 36 titik di dalam rumah tanaman, mengolah data sebaran suhu udara, menguji asumsi ketidakseragaman data, menghitung kombinasi sensor, analisa *error* dan menentukan lokasi sensor. Model adaptif dibangun dengan kombinasi *artificial neural network* (ANN) dan *genetic algorit*m (GA) dengan fungsi *fitness* sebagai solusi untuk menemukan nilai frekuensi inverter optimum untuk mengatur kecepatan motor kipas dan mengkondisikan suhu udara di dalam rumah tanaman pada nilai target. Model ANN digunakan untuk memprediksi suhu udara, sedangkan GA dan fungsi *fitness* digunakan untuk menemukan nilai optimasi. Model adaptif ditempatkan pada perangkat teknologi kontrol berbasis LoRa yang terdiri dari *node* sensor sebagai unit pembacaan data, *gateway* sebagai pusat pengolahan data, dan *node controller* sebagai pengendali. Teknologi kontrol adaptif diimplementasikan pada rumah tanaman, dan dievaluasi performa sistem dan penggunaan energi listrik pada cuaca panas dan mendung.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa mayoritas titik-titik di dalam rumah tanaman memiliki sebaran suhu udara yang tidak seragam, berdasarkan profil suhu dan uji non-parametrik. Pengujian *error* pada 4096 kombinasi lokasi menemukan titik lima memiliki nilai MAPE terkecil sehingga representatif sebagai lokasi penempatan sensor. Selanjutnya pemodelan delapan parameter iklim mikro dengan ANN menemukan struktur 7-11-1 sebagai model terbaik untuk memprediksi suhu udara di dalam rumah tanaman. Proses optimasi dengan fungsi *fitness* sebagai solusi



menemukan nilai frekuensi inverter optimum selalu tercapai pada nilai *error* terkecil dan konvergen. Hasil evaluasi model setelah terintegrasi ke perangkat teknologi LoRa, menunjukkan kinerja baik di atas 90 % pada cuaca panas dan cuaca mendung, meskipun masih terjadi perbedaan suhu udara terhadap nilai target antara 0,5 derajat di cuaca mendung dan 2 derajat di cuaca panas. Kinerja sistem yang adaptif dengan kecepatan motor *fan* yang selalu berubah, berdampak kepada penghematan penggunaan energi listrik sebesar 18,5 % pada cuaca panas atau menghemat Rp. 1,5 juta/bulan, dan 33,9 % pada cuaca mendung atau menghemat Rp. 2,8 juta/bulan. Sistem kontrol adaptif ini cocok diterapkan pada wilayah tropika dengan cuaca yang selalu berubah seperti wilayah Bogor.

Kata kunci: rumah tanaman, metode berbasis *error*, model adaptif, LoRa, *artificial neural network*, *genetic algorithm*, *fitness*.

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

SUMMARY

Folkes E. Laumal. Adaptive control design system for tropical greenhouses. Supervised by Prof. Dr. Ir. Herry Suhardiyanto, M.Sc., Dr. Ir. Mohamad Solahudin, M.Si. and Dr. Slamet Widodo, S.TP., M.Sc.

A greenhouse is a building for cultivating agricultural crops with controllable microclimate parameters, such as air temperature and air humidity. The increase in air temperature due to the greenhouse effect has been successfully reduced through the use of cooling systems such as evaporation and water chillers. For crops that are sensitive to low temperatures, such as Purwoceng, greenhouse cultivation requires strict control in the form of automatic control technology. Several modelling and sensor-based control technologies have been developed and work quite well in simulation and application. However, unrepresentative sensor placement, weather changes to control activities and high electrical energy use are still issues in an effort to maximise plant growth in tropical greenhouses.

The purpose of this research is to develop an air temperature control system that is adaptive to weather changes, with representative sensor placement locations and efficient in the use of electrical energy. The research took place over 10 months in an 8x24 m² arch-type smart greenhouse, at the Siswadi Soepardjo Field Laboratory, Department of Mechanical Engineering and Biosystems IPB, in four stages, namely identification of air temperature distribution and determination of sensor locations in the greenhouse, development of adaptive models based on historical data, design of LoRa-based control technology and system implementation.

The identification of air temperature begins with measurements at 36 points in the greenhouse, processing air temperature distribution data, assumption tests, calculation of sensor combinations, error analysis and determination of sensor locations. The adaptive model is built with a combination of artificial neural network (ANN) and genetic algorithm (GA) with a fitness function as a solution to find the optimum inverter frequency value to adjust the fan motor speed and condition the air temperature inside the greenhouse at the target value. The ANN model is used to predict the air temperature, while the GA and fitness function are used to find the optimising value. The adaptive model is placed on a LoRa-based control technology device consisting of sensor nodes as data reading units, gateways as data processing centre, and controller nodes as controllers. The adaptive control technology was implemented in a greenhouse, and the system performance and electrical energy usage in sunny and cloudy were evaluated.

The results show that most points in the greenhouse have non-uniform air temperature distribution, based on temperature profiles and non-parametric tests. Error testing on 4096 combinations of locations showed that point five had the smallest MAPE value, making it representative as a sensor placement location. Furthermore, modelling eight microclimate parameters with ANN resulted in the 7-11-1 structure as the best model to predict air temperature inside the greenhouse. The optimisation process with fitness function as a solution to find the optimum inverter frequency value is always achieved at the smallest error value and converges. The model evaluation results after being integrated into the LoRa technology device, showed good performance above 90% in sunny and cloudy,

although there was still a difference in air temperature against the target value between 0,5 degrees in cloudy and 2 degrees in sunny. The adaptive performance of the system with the fan motor speed always changing, has an impact on saving the use of electrical energy by 18,5 % in sunny or saving Rp. 1,5 million per month, and 33,9 % in cloudy or saving Rp. 2,8 million per month. This adaptive control system is suitable for tropical areas with ever-changing weather such as the Bogor.

Keywords: greenhouse, error-based method, adaptive model, LoRa, artificial neural network, genetic algorithm.

@Hak cipta milik IPB University

IPB University



- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkannya dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2023
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.



KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penyusunan disertasi dengan judul “Rancang bangun sistem kontrol adaptif untuk rumah tanaman di kawasan beriklim tropika” dapat diselesaikan. Penyelesaian disertasi ini didukung oleh berbagai pihak, sehingga pada kesempatan ini, Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada pihak-pihak sebagai berikut.

1. Lembaga Penjamin Dana Pendidikan (LPDP), Departemen Keuangan Republik Indonesia, yang membiayai seluruh proses pendidikan melalui pemberian beasiswa selama menempuh pendidikan dan penelitian di IPB.
2. Prof. Dr. Ir. Herry Suhardiyanto, M.Sc. sebagai ketua komisi pembimbing, yang telah meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan dan arahan selama proses penelitian hingga penyelesaian penelitian ini.
3. Dr. Ir. Mohamad Solahudin. M.Si. dan Dr. Slamet Widodo, S.TP., M.Sc., sebagai anggota komisi pembimbing yang telah meluangkan waktu untuk mengarahkan penulis selama proses hingga penyelesaian penelitian ini.
4. Ibunda tercinta, Agustina Lado, dan keluarga yang senantiasa mendukung dalam doa sehingga penulis dapat menyelesaikan proses pendidikan ini.
5. Patrisia Y. Djami dan Chatrine C. Laumal, sebagai isteri dan anak yang senantiasa memberikan doa dan semangat kepada penulis selama proses pendidikan dan penelitian di IPB.
6. Dr. Supriyanto, S.TP., M.Kom, yang senantiasa menyemangati penulis dalam proses penelitian di Leuwikopo, Bogor.
7. Ernianti, S.TP., M.Sc, rekan diskusi, yang banyak membantu dan bekerja bersama sejak awal hingga akhir penelitian di *smart greenhouse* TMB, Leuwikopo.
8. Seluruh dosen beserta staf tenaga kependidikan di Program Studi TEP, Program Pascasarjana IPB, yang telah membagikan ilmu dan pelajaran berharga selama masa perkuliahan.



9. Rekan-rekan seangkatan (bu erni, bu amnah, pa jony, mas radi, mas furqon, pa taufik, pa ajat,) yang telah memberi warna tersendiri kepada penulis selama perkuliahan .
10. Rekan-rekan tim lapangan (pa ahmad, pa darma, pa angga, rahman, caca, bagas, anand, dafa, luluk, ruslan, haryo, angga, tegar) yang telah ikut membantu penulis selama proses penelitian di Leuwikopo.
11. Semua pihak yang telah membantu penulis dalam penyelesaian penelitian yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Semoga karya ilmiah ini dapat bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan serta bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, 1 Juni 2023,

Folkes E. Laumal



LEMBAR PENGESAHAN

Judul Disertasi : Rancang bangun sistem kontrol adaptif untuk rumah tanaman di kawasan beriklim tropika
Nama : Folkes E. Laumal
NIM : F163190061

Disetujui oleh

Pembimbing 1:

Prof. Dr. Ir. Herry Suhardiyanto, M.Sc.



Pembimbing 2:

Dr. Ir. Mohamad Solahudin, M.Si.



Pembimbing 3:

Dr. Slamet Widodo, S.TP., M.Sc.



Diketahui oleh

Ketua Program Studi:

Dr. Ir. Sam Herodian, MS., IPU
NIP. 196205291987031002



Dekan Fakultas:

Prof. Dr. Ir. Slamet Budijanto, M.Agr.
NIP. 196105021986031002

Tanggal Ujian: 30 Mei 2023

Tanggal Lulus: 12 Juni 2023

DAFTAR ISI

Daftar Tabel	xii
Daftar Gambar	xiii
Daftar Lampiran	xv
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Ruang lingkup penelitian	4
1.6 Kebaruan penelitian	5
1.7 Hipotesa	5
II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Fenomena <i>greenhouse effect</i> dan pengendalian suhu udara pada rumah tanaman	7
2.2 Teknologi pengendalian suhu udara pada rumah tanaman	10
2.3 Komunikasi nirkabel menggunakan modulasi LoRa	17
2.4 <i>Variable frequency drive</i> sebagai pengatur kecepatan putaran motor Listrik	18
2.5 <i>Artificial neural network</i>	19
2.6 Optimasi berbasis <i>genetic algoritm</i>	22
III METODOLOGI	25
3.1 Waktu dan tempat penelitian	25
3.2 Alat dan bahan penelitian	25
3.3 Tahapan Penelitian	25
IV IDENTIFIKASI SUHU UDARA PADA RUMAH TANAMAN	29
4.1 Pendahuluan	29
4.2 Metode	30
4.3 Hasil dan Pembahasan	32
4.4 Kesimpulan	38
V PENENTUAN LOKASI SENSOR	39
5.1 Pendahuluan	39
5.2 Metode	40
5.3 Hasil dan Pembahasan	42
5.4 Kesimpulan	47
VI PENGEMBANGAN MODEL ADAPTIF	48
6.1 Pendahuluan	48
6.2 Metode	50
6.3 Hasil dan Pembahasan	53
6.4 Kesimpulan	61

VII DESAIN TEKNOLOGI KONTROL BERBASIS LORA	62
7.1 Pendahuluan	62
7.2 Metode	65
7.3 Hasil dan Pembahasan	72
7.4 Kesimpulan	74
VIII IMPLEMENTASI TEKNOLOGI KONTROL ADAPTIF PADA RUMAH TANAMAN	75
8.1 Pendahuluan	75
8.2 Metode	75
8.3 Hasil dan Pembahasan	76
8.4 Kesimpulan	82
IX PEMBAHASAN UMUM	85
9.1 Sistem kontrol adaptif untuk rumah tanaman di kawasan beriklim tropika	83
9.2 Analisis biaya pengembangan sistem kontrol adaptif	87
9.3 Peluang penggunaan sistem kontrol adaptif di masa depan	88
X KESIMPULAN DAN SARAN	90
10.1 Kesimpulan	90
10.2 Saran	90
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	
RIWAYAT HIDUP	

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

DAFTAR TABEL

1	Perbandingan karakteristik <i>platform</i> komunikasi nirkabel	17
2	Klasifikasi nilai persentase MAPE	41
3	Parameter ANN yang digunakan dalam pengembangan model	51
4	Hubungan antara intensitas cahaya matahari dan suhu udara di rumah tanaman pada empat skala frekuensi inverter	55
5	Koefisien korelasi antara suhu udara dan parameter iklim mikro lain di dalam rumah tanaman	55
6	Nilai R^2 dan RMSE model prediksi berdasarkan waktu prediksi	58
7	Nilai R^2 dan RMSE model prediksi berdasarkan jumlah dataset	58
8	Nilai R^2 dan RMSE model prediksi berdasarkan jumlah <i>hidden layer</i>	59
9	Konsumsi energi listrik harian dari semua perangkat kontrol pada rumah tanaman dari jam 06.00 hingga 18.00	80
10	Penggunaan energi listrik selama 2 minggu penerapan teknologi kontrol adaptif di dalam rumah tanaman	81
11	Analisis biaya pengembangan sistem kontrol adaptif dan perbandingan analisis biaya budidaya tanaman purwoceng dengan penggunaan kontrol adaptif dan tanpa penggunaan kontrol adaptif	89

DAFTAR GAMBAR

1	Peristiwa <i>greenhouse effect</i>	8
2	Fungsi dan elemen pengelolaan rumah tanaman di wilayah tropika	9
3	Komponen umum sistem pemantauan pada rumah tanaman	12
4	Komponen pemantauan berbasis IoT pada rumah tanaman	13
5	Rancangan sistem kontrol untuk optimasi tanaman anggrek	14
6	Blok diagram VFD	18
7	Struktur <i>artificial neural network</i>	20
8	Diagram alir <i>genetic algoritim</i>	23
9	Rumah tanaman di wilayah tropika (a) rumah tanaman tipe <i>arch</i> berukuran 8x24 m ² , (b) lingkungan internal rumah tanaman	25
10	Tahapan penelitian	26
11	Skema penempatan <i>termocouple</i> dua kawat di dalam rumah tanaman dan <i>weather station</i> di luar rumah tanaman	30
12	Skema identifikasi sebaran suhu udara di dalam rumah tanaman	31
13	Perbandingan suhu udara di dalam dan luar rumah tanaman menggunakan sistem pendingin evaporasi	32
14	Perbandingan suhu udara di dalam dan luar rumah tanaman menggunakan pendingin evaporasi dan <i>water chiller</i>	32
15	Profil suhu udara di dalam rumah tanaman pada frek. inverter 20 HZ (a) ketinggian 0,65 m, (b) 1,75 m dan (c) 2,75 m	34
16	Profil suhu udara di dalam rumah tanaman pada frek. inverter 30 HZ (a) ketinggian 0,65 m, (b) 1,75 m dan (c) 2,75 m	35
17	Profil suhu udara di dalam rumah tanaman pada frek. inverter 40 HZ (a) ketinggian 0,65 m, (b) 1,75 m dan (c) 2,75 m	36
18	Profil suhu udara di dalam rumah tanaman pada frek. inverter 50 HZ (a) ketinggian 0,65 m, (b) 1,75 m dan (c) 2,75 m	37
19	Mekanisme penentuan lokasi sensor terbaik di dalam rumah tanaman	40
20	Perbandingan suhu udara di setiap lokasi pengukuran dengan rata-rata suhu udara ruangan selama 4 hari dari jam 06.00 hingga 18.00	42
21	Kombinasi 1 lokasi sensor dengan urutan nilai MAPE dan RMSE	43
22	Kombinasi 2 lokasi sensor dengan urutan nilai RMSE dan MAPE	43
23	Kombinasi 3 lokasi sensor dengan urutan nilai MAPE dan RMSE	43
24	Kombinasi 4 lokasi sensor dengan urutan nilai MAPE dan RMSE	43
25	Kombinasi 5 lokasi sensor dengan urutan nilai MAPE dan RMSE	43
26	Kombinasi 6 lokasi sensor dengan urutan nilai MAPE dan RMSE	43
27	Tren <i>error</i> 6 kombinasi lokasi sensor dengan metode berbasis <i>error</i> (a) nilai RMSE (b) nilai MAPE	45
28	Layout lokasi sensor berdasarkan metode berbasis <i>error</i>	46
29	Perbandingan nilai suhu udara di titik 5 dengan suhu udara rata-rata pada rumah tanaman selama 2 hari pengukuran	46
30	Arsitektur model prediksi <i>multilayer</i> yang digunakan	50
31	Seknario optimasi menggunakan <i>genetic algoritim</i>	52
32	Perbedaan suhu udara di dalam rumah tanaman tanpa pendingin evaporasi, dengan pendingin evaporasi, dan kombinasi pendingin evaporasi + <i>water chiller</i>	53

33	Hubungan antara suhu udara internal dan radiasi matahari yang diukur pada empat skala kecepatan putaran <i>fan</i>	54
34	Model adaptif yang dikembangkan	56
35	Perbandingan data suhu udara aktual dan prediksi hasil pemodelan	57
36	Perbandingan data suhu udara aktual dan prediksi hasil validasi	57
37	Grafik proses optimasi pada frekuensi 20 Hz (a) perubahan nilai <i>fitness</i> selama proses optimasi; (b) perubahan nilai optimum frekuensi inverter selama proses optimasi	60
38	Grafik proses optimasi pada frekuensi 30 Hz (a) perubahan nilai <i>fitness</i> selama proses optimasi; (b) perubahan nilai optimum frekuensi inverter selama proses optimasi	60
39	Grafik proses optimasi pada frekuensi 40 Hz (a) perubahan nilai <i>fitness</i> selama proses optimasi; (b) perubahan nilai optimum frekuensi inverter selama proses optimasi	61
40	Grafik proses optimasi pada frekuensi 50 Hz (a) perubahan nilai <i>fitness</i> selama proses optimasi; (b) perubahan nilai optimum frekuensi inverter selama proses optimasi	61
41	Skema sistem kontrol berbasis LoRa yang dikembangkan	64
42	Rancangan perangkat <i>node</i> sensor	66
43	Rancangan perangkat <i>gateway</i>	67
44	Rancangan perangkat <i>controller</i>	67
45	Skema aliran data di <i>node</i> sensor	68
46	Skema pengolahan data di <i>gateway</i>	69
47	Skema komunikasi data pada <i>node controller</i>	70
48	Skema interaksi pada sistem pemantauan rumah tanaman	71
49	<i>Layout</i> tampilan sistem pemantauan lingkungan rumah tanaman	72
50	Perangkat teknologi kontrol yang dikembangkan (a) <i>node</i> sensor, (b) <i>gateway</i> (c) <i>node controller</i>	72
51	Kalibrasi sensor yang digunakan pada perangkat teknologi kontrol (a) kalibrasi sensor suhu (b) kalibrasi sensor kelembaban (c) kalibrasi sensor cahaya	73
52	<i>Screenshot user interface</i> yang menampilkan parameter iklim mikro pada rumah tanaman dalam bentuk angka	74
53	<i>Screenshot user interface</i> yang menampilkan parameter iklim mikro pada rumah tanaman dalam bentuk grafik	74
54	Performansi model pada cuaca panas dengan data set 26 Agustus 2022 (a) tren suhu udara yang diprediksi, suhu udara aktual, suhu udara luar, dan suhu target; (b) perbandingan suhu udara prediksi dan aktual	77
55	Performansi model pada cuaca mendung dengan dataset 9 Sep.2022 (a) tren suhu udara prediksi, suhu udara aktual, suhu udara luar dan suhu udara target, (b) perbandingan suhu udara prediksi dan aktual	78
56	Kontrol suhu udara di dalam rumah tanaman (a) cuaca panas menggunakan data 26 Agust. 2022; (b) cuaca mendung menggunakan data 9 Sept. 2022	79
57	Tren penggunaan energi listrik selama dua minggu penerapan teknologi kontrol adaptif pada rumah tanaman	82



DAFTAR LAMPIRAN

- 1 Daftar komponen/alat/program yang digunakan pada pengembangan teknologi kontrol adaptif
- 2 Data sebaran suhu udara pada 36 titik di dalam rumah tanaman dan parameter lain yang digunakan untuk pengembangan model adaptif
- 3 Rincian analisis biaya penggunaan sistem kendali adaptif selama 1 musim budidaya purwoceng menggunakan *smart greenhouse* tipe *arch*.
- 4 Dokumen publikasi ilmiah

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mempublikasikan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.