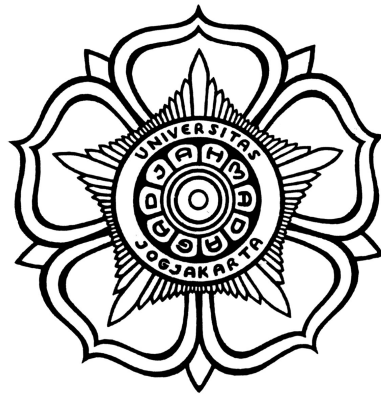


**PERANCANGAN KONTROLER LINGKUNGAN TERMAL  
*CLIMATE CHAMBER* BERBASIS JARINGAN SARAF TIRUAN**

**SKRIPSI**

untuk memenuhi sebagian persyaratan  
untuk memperoleh derajat Sarjana S-1  
Program Studi Teknik Fisika



Diajukan oleh  
**RIDHAN FADHILAH**  
15/384859/TK/43521

kepada  
**DEPARTEMEN TEKNIK NUKLIR DAN TEKNIK FISIKA  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS GADJAH MADA  
YOGYAKARTA  
2020**

## PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ridhan Fadhilah  
NIM : 15/384859/TK/43521  
Tahun terdaftar : 2015  
Program Studi : Teknik Fisika  
Fakultas : Teknik

menyatakan bahwa dokumen ilmiah skripsi ini tidak terdapat bagian dari karya ilmiah lain yang telah diajukan untuk memperoleh gelar akademik di suatu lembaga Pendidikan Tinggi, dan juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang/lembaga lain, kecuali yang secara tertulis disitasi dalam dokumen ini dan disebutkan sumbernya secara lengkap dalam daftar pustaka.

Dengan demikian saya menyatakan bahwa dokumen ilmiah ini bebas dari unsur- unsur plagiasi dan apabila dokumen ilmiah Skripsi ini di kemudian hari terbukti merupakan plagiasi dari hasil karya penulis lain dan/atau dengan sengaja mengajukan karya atau pendapat yang merupakan hasil karya penulis lain, maka penulis bersedia menerima sanksi akademik dan/atau sanksi hukum yang berlaku.

Yogyakarta, ....  
Yang menyatakan,

(Materai Rp. 6000,-)

Ridhan Fadhilah  
NIM. 15/384859/TK/43521

# **HALAMAN PENGESAHAN**

**SKRIPSI**

## **PERANCANGAN KONTROLER LINGKUNGAN TERMAL *CLIMATE* CHAMBER BERBASIS JARINGAN SARAF TIRUAN**

oleh

**Ridhan Fadhilah**  
**15/384859/TK/43521**

telah dipertahankan di depan Tim Penguji  
pada tanggal 26 Agustus 2020

### **Susunan Tim Penguji**

Ketua Sidang

Faridah, S.T., M.Sc.  
NIP. 19760214 200212 2 001

Penguji Utama

Anggota Penguji

Dwi Joko Suroso, S.T., M.Eng.  
NIP. 11119880 820170 6 101

Sentagi Sesotya Utami, S.T., M.Sc., Ph.D.  
NIP. 19750226 200212 2 002

Diterima dan dinyatakan memenuhi  
syarat kelulusan pada tanggal . . . . .

Ketua Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika  
Fakultas Teknik UGM

Nopriadi, S.T., M.Sc. Ph.D  
NIP. 19731119 200212 1 002

**HALAMAN TUGAS**  
**UNIVERSITAS GADJAH MADA**  
**FAKULTAS TEKNIK**  
**DEPARTEMEN TEKNIK NUKLIR DAN TEKNIK FISIKA**

---

Nama : Ridhan Fadhillah  
NIM : 15/384859/TK/43521  
Pembimbing Utama : Faridah, S.T., M.Sc.  
Pembimbing Pendamping : Ir. Agus Arif, M.T.  
Judul Skripsi : Perancangan Kontroler Lingkungan Termal *Climate Chamber* Berbasis Jaringan Saraf Tiruan  
Permasalahan : Untuk memenuhi kebutuhan penelitian kenyamanan termal, kondisi lingkungan termal pada *climate chamber* (sebagai ruang uji termal) haruslah dapat dikondisikan secara otomatis sesuai dengan skema pengujian penelitian.

---

Pembimbing Utama

Pembimbing Pendamping

Faridah, S.T., M.Sc.  
NIP. 19760214 200212 2 001

Ir. Agus Arif, M.T.  
NIP. 196608122 199303 1 004

Mengetahui,

Ketua Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika  
Fakultas Teknik UGM

Nopriadi, S.T., M.Sc. Ph.D  
NIP. 19731119 200212 1 002

*Karya ini ku persembahkan untuk kedua orang tua, adik, keluarga, dan kerabat  
dekat. Terima kasih atas segala dukungan dan doa yang kalian berikan.*

*"The amateur waits for inspiration.*

*The professional knows that it will come after he starts."*

- Steven Pressfield

## **KATA PENGANTAR**

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir beserta penulisan skripsi ini untuk memenuhi sebagian persyaratan untuk memperoleh gelar sarjana teknik fisika.

Dalam pembuatan skripsi ini banyak kesulitan yang penulis alami terutama disebabkan oleh kurangnya pengetahuan dan sumber-sumber informasi yang terbatas. Namun berkat bimbingan dan bantuan dari semua pihak akhirnya skripsi ini dapat terselesaikan tepat pada waktunya. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah mengarahkan dan membantu penulis dalam penyusunan skripsi ini, khususnya kepada:

1. Allah SWT, atas berkat dan rahmat-Nya akhirnya penulis senantiasa diberikan kekuatan, ketabahan, dan ketenangan dalam menjalani lika-liku kehidupan.
2. Ayah dan Ibu yang telah membesarkan, mendidik, memberikan semangat, serta doa yang tak pernah henti sehingga penulis terus bersemangat dalam menjalani kehidupan, khususnya dalam pengerjaan tugas akhir ini.
3. Ibu Faridah selaku pembimbing utama penulis yang senantiasa memberikan masukan, arahan, dan semangat dalam mengerjakan serta menyelesaikan tugas akhir ini.
4. Bapak Agus Arif selaku pembimbing kedua penulis yang telah memberikan masukan, arahan, dan semangat dalam mengerjakan serta menyelesaikan tugas akhir ini.
5. Bapak Nopriadi selaku dosen pembimbing akademik penulis yang senantiasa memberikan masukan, arahan dan semangat dalam menjalani perkuliahan.

6. Seluruh Dosen dan Staf Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika.
7. Kerabat-kerabat dekat penulis, yakni M. Faisal Al Bantani, M. N. Fathurrahman, Salsabila K. Khansa, M. Aldan H. A., dan Irfanda Husni Sahid.
8. Tim TA kerabat Lab SSTK yakni Armand, Fathan, Ivan, Yerico, Shaki, Yogi, Didik, Radit, Muna, Tanto, dan Faisal.
9. Teman-teman TF C 2015 yang senantiasa menjadi teman seperjuangan dalam menjalani kuliah selama lebih kurang 4 tahun di DTNTF FT-UGM.
10. Serta masih banyak lagi berbagai pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Pepatah bilang "tak ada gading yang tak retak", begitu pula dengan penulisan ini. Penulisan yang masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu penulis mohon maaf apabila terdapat kekurangan ataupun kesalahan yang tertera pada skripsi ini. Kritik dan saran sangat diharapkan agar penulis dapat menulis lebih baik serta berdaya guna dimasa yang akan datang.

Yogyakarta, Agustus 2020

Ridhan Fadhilah



## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b>	<b>i</b>
<b>PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI</b>	<b>ii</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b>	<b>iv</b>
<b>HALAMAN TUGAS</b>	<b>iv</b>
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN</b>	<b>v</b>
<b>HALAMAN MOTTO</b>	<b>vi</b>
<b>KATA PENGANTAR</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN</b>	<b>xvi</b>
<b>INTISARI</b>	<b>xviii</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xix</b>
<b>I. PENDAHULUAN</b>	<b>1</b>
I.1. Latar Belakang . . . . .	1
I.2. Perumusan Masalah . . . . .	3
I.3. Tujuan . . . . .	3
I.4. Batasan Masalah . . . . .	4
I.5. Manfaat . . . . .	4
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA</b>	<b>5</b>
II.1. Pengkondisian Lingkungan Termal pada <i>Climate Chamber</i> . . . . .	5

II.2.	Kontrol Jaringan Saraf Tiruan . . . . .	9
<b>III.</b>	<b>DASAR TEORI</b>	<b>12</b>
III.1.	Lingkungan Termal . . . . .	12
III.1.1.	Parameter Lingkungan Termal . . . . .	12
III.1.2.	<i>Climate Chamber</i> . . . . .	13
III.1.3.	Perpindahan Kalor pada Bangunan . . . . .	15
III.2.	Kontrol Otomatis . . . . .	18
III.2.1.	Dasar-dasar Ilmu Kontrol . . . . .	18
III.2.2.	<i>Steady-State Error</i> . . . . .	21
III.3.	Jaringan Saraf Tiruan (JST) . . . . .	22
III.3.1.	Model Matematis Neuron . . . . .	23
III.3.2.	Jaringan Layar Jamak (MLP) . . . . .	26
III.4.	Kontrol Jaringan Saraf Tiruan . . . . .	31
<b>IV.</b>	<b>PELAKSANAAN PENELITIAN</b>	<b>33</b>
IV.1.	Alat dan Bahan Penelitian . . . . .	33
IV.2.	Tata Laksana Penelitian . . . . .	34
IV.2.1.	Studi Pustaka . . . . .	35
IV.2.2.	Penentuan Tuntutan Rancangan . . . . .	35
IV.2.3.	Pengambilan Data Simulasi IES-VE . . . . .	35
IV.2.4.	Model <i>Plant</i> JST . . . . .	39
IV.2.5.	Perancangan Kontrol berbasis JST . . . . .	40
IV.2.6.	Penarikan Kesimpulan . . . . .	41
IV.3.	Rencana Analisis Hasil Penelitian . . . . .	41
<b>V.</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	<b>42</b>
V.1.	Identifikasi Sistem . . . . .	42

V.1.1.	Pengambilan Data Simulasi IES-VE . . . . .	43
V.1.2.	Identifikasi Sistem Pengendalian . . . . .	45
V.2.	Rancangan Kontrol berbasis JST . . . . .	48
V.2.1.	Variasi Pembagian Data Perancangan JST Kontroler . . . . .	48
V.2.2.	Variasi Arsitektur Perancangan JST Kontroler . . . . .	49
V.2.3.	Hasil Rancangan Model JST Kontroler . . . . .	50
V.3.	Hasil Simulasi Kontrol SIMULINK . . . . .	51
V.3.1.	Skenario Pemanasan Pendinginan dengan Variabel Gangguan Konstan . . . . .	51
V.3.2.	Skenario Pemanasan Pendinginan dengan Variabel Gangguan Bergerak . . . . .	54
V.3.3.	Analisis Kegagalan Kendali . . . . .	57
<b>VI.</b>	<b>KESIMPULAN DAN SARAN</b>	<b>60</b>
VI.1.	Kesimpulan . . . . .	60
VI.2.	Saran . . . . .	60
<b>LAMPIRAN</b>		
<b>A.</b>	<b>Data Penelitian</b>	<b>65</b>
A.1.	Data Simulasi IES-VE . . . . .	65
A.2.	Bobot-bobot Model JST Kontroler . . . . .	66
A.3.	Hasil Simulasi 1 Sistem Kontrol . . . . .	67
A.4.	Hasil Simulasi 1 Sistem Kontrol (lanjutan 2) . . . . .	68
A.5.	Hasil Simulasi 1 Sistem Kontrol (lanjutan 3) . . . . .	69
A.6.	Hasil Simulasi 1 Sistem Kontrol (lanjutan 4) . . . . .	70
A.7.	Hasil Simulasi 2 Sistem Kontrol . . . . .	71
A.8.	Hasil Simulasi 2 Sistem Kontrol (lanjutan 2) . . . . .	72

A.9.	Hasil Simulasi 2 Sistem Kontrol (lanjutan 3)	73
A.10.	Hasil Simulasi 2 Sistem Kontrol (lanjutan 4)	74
<b>B.</b>	<b>Listing Program</b>	<b>75</b>
B.1.	Kode Sumber Program Model JST Kontroler	75
B.2.	Fungsi Min Max Scaler	77
B.3.	Fungsi Kuantisasi AC	77
B.4.	Fungsi Kuantisasi Heater	78
B.5.	Fungsi Penskalaan Suhu Ruang	78
B.6.	Fungsi Penskalaan Kelembapan Relatif	78
<b>C.</b>	<b>Diagram Blok</b>	<b>79</b>
C.1.	Diagram Blok Rancangan Sistem Kontrol Simulink	79

## DAFTAR TABEL

2.1. Pengkondisian Lingkungan Termal pada <i>Climate Chamber</i> . . . . .	8
2.2. Tinjauan Pustaka Kontrol JST . . . . .	11
3.1. Perbandingan metode kontrol . . . . .	31
4.1. Daftar alat dan bahan . . . . .	33
4.2. Spesifikasi laptop ASUS N550JX . . . . .	33
4.3. Tabel Rancangan Model Plant JST . . . . .	39
5.1. Tabel Daftar Variasi Pembagian Data . . . . .	48
5.2. Tabel Rancangan Kontroler JST ( <i>NN Inverse Model</i> ) . . . . .	51
A.1. Data Simulasi IES-VE . . . . .	65
A.2. Bobot-bobot Model JST Kontroler . . . . .	66
A.3. Hasil Simulasi 1 Sistem Kontrol . . . . .	67
A.4. Hasil Simulasi 1 Sistem Kontrol . . . . .	68
A.5. Hasil Simulasi 1 Sistem Kontrol . . . . .	69
A.6. Hasil Simulasi 1 Sistem Kontrol . . . . .	70
A.7. Hasil Simulasi 2 Sistem Kontrol . . . . .	71
A.8. Hasil Simulasi 2 Sistem Kontrol . . . . .	72
A.9. Hasil Simulasi 2 Sistem Kontrol . . . . .	73
A.10. Hasil Simulasi 2 Sistem Kontrol . . . . .	74

## DAFTAR GAMBAR

1.1.	<i>Climate chamber</i> DTNTF FT-UGM . . . . .	2
3.1.	Pertukaran kalor bangunan dengan lingkungan [1] . . . . .	17
3.2.	Sistem dengan <b>a.</b> <i>steady-state error</i> bernilai terbatas untuk input fungsi step; <b>b.</b> <i>steady-state error</i> nol untuk input fungsi step [2] . . .	21
3.3.	Anatomi neuron [3] . . . . .	22
3.4.	Model matematis neuron [3] . . . . .	23
3.5.	Fungsi-fungsi aktivasi [3] . . . . .	24
3.6.	Jaringan layar tunggal [3] . . . . .	25
3.7.	Jaringan 2 layar [3] . . . . .	27
3.8.	Taksonomi metode kontrol klasik vs modern [4] . . . . .	32
4.1.	Bagan Tata Laksana Penelitian . . . . .	34
4.2.	Posisi Komponen-Komponen di dalam <i>Climate Chamber</i> . . . . .	36
4.3.	Perangkat AC . . . . .	37
4.4.	Perangkat Heater . . . . .	37
4.5.	Skenario Pengambilan Data . . . . .	38
4.6.	Arsitektur Model Plant JST . . . . .	39
4.7.	Diagram blok sistem kontrol berbasis JST [5] . . . . .	40
4.8.	Pasangan masukan dan keluaran model JST kontroler . . . . .	40
5.1.	Data Konfigurasi AC dan <i>Heater</i> pada Simulasi ISE-VE . . . . .	44
5.2.	Variabel Gangguan Simulasi ISE-VE . . . . .	44
5.3.	Data Hasil Simulasi ISE-VE . . . . .	45
5.4.	Diagram Blok <i>Plant</i> . . . . .	46
5.5.	Diagram Blok Fungsional Sistem . . . . .	46

5.6. Diagram blok sistem kontrol berbasis JST . . . . .	47
5.7. Grafik Variasi Pembagian Data . . . . .	49
5.8. Grafik Persebaran MSE Variasi Arsitektur JST Kontroler . . . . .	50
5.9. Grafik Persebaran MSE Variasi Arsitektur JST Kontroler . . . . .	50
5.10. Grafik Hasil Simulasi 1 Simulink untuk Suhu Ruang . . . . .	52
5.11. Grafik Hasil Simulasi 1 Simulink untuk Kelembapan Relatif . . . . .	52
5.12. Grafik Variabel Manipulasi AC pada Simulasi 1 Simulink . . . . .	53
5.13. Grafik Variabel Manipulasi <i>Heater</i> pada Simulasi 1 Simulink . . . . .	53
5.14. Grafik Nilai Variabel Gangguan Suhu Lingkungan . . . . .	54
5.15. Grafik Nilai Variabel Gangguan Intensitas Radiasi Matahari . . . . .	55
5.16. Grafik Hasil Simulasi 2 Simulink untuk Suhu Ruang . . . . .	55
5.17. Grafik Hasil Simulasi 2 Simulink untuk Kelembapan Relatif . . . . .	55
5.18. Grafik Variabel Manipulasi AC pada Simulasi 2 Simulink . . . . .	56
5.19. Grafik Variabel Manipulasi <i>Heater</i> pada Simulasi 2 Simulink . . . . .	56
5.20. Grafik Hasil Simulasi 3 Simulink untuk Suhu Ruang . . . . .	57
5.21. Grafik Hasil Simulasi 3 Simulink untuk Kelembapan Relatif . . . . .	57
5.22. Grafik Variabel Manipulasi AC pada Simulasi 3 Simulink . . . . .	58
5.23. Grafik Variabel Manipulasi <i>Heater</i> pada Simulasi 3 Simulink . . . . .	58
5.24. Grafik Hasil Uji <i>Plant</i> . . . . .	59
C.1. Diagram Blok Rancangan Sistem Kontrol Simulink . . . . .	79

## DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN

### Lambang Romawi

<i>Lambang</i>	<i>Kuantitas</i>	<i>Satuan</i>
$T_{db}$	Suhu Ruang ( <i>Dry-Bulb Temperature</i> )	$^{\circ}\text{C}$
RH	Kelembapan Relatif	%
$T_o$	Suhu Lingkungan ( <i>Dry-Bulb Temperature</i> )	$^{\circ}\text{C}$
RD	Intensitas Radiasi Matahari	$\text{W/m}^2$
AC	<i>Setting</i> AC	$^{\circ}\text{C}$
HT	Banyak <i>heater</i> menyala	ON
$t$	Waktu	detik
$f$	Frekuensi	Hertz
R	Koefisien Korelasi	%
$\mathbb{R}$	Domain Bilangan Riil	
$R(s)$	Masukan Sistem Kontrol	
$C(s)$	Keluaran Sistem Kontrol	
$E(s)$	Galat Sistem Kontrol	
$K$	Konstanta Pengali	
$T(s)$	Fungsi Pengali Kalang Tertutup	
$G(s)$	Fungsi Pengali Kalang Tertutup Umpan Balik Satuan	
$x$	Lapisan Masukan Jaringan Saraf Tiruan	
$y$	Lapisan Keluaran Jaringan Saraf Tiruan	
$z$	Lapisan Tersembunyi Jaringan Saraf Tiruan	



## Lambang Yunani

<i>Lambang</i>	<i>Kuantitas</i>	<i>Satuan</i>
$\nu$	Bobot Jaringan Saraf Tiruan	
$\sigma$	Fungsi Aktivasi Neuron	

## Subskrip

<i>Lambang</i>	<i>Deskripsi</i>
<i>steady-state</i>	Kondisi-Ajeng

## Superskrip

<i>Lambang</i>	<i>Deskripsi</i>
n	Dimensi n
T	Fungsi Transpos Vektor/Matriks

## Singkatan

ANN	<i>Artificial Neural Network</i>
DBT	<i>Dry-Bulb Temperature</i>
IES-VE	<i>Integrated Environmental Solutions - Virtual Environment</i>
DTNTF	Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika
JST	Jaringan Saraf Tiruan
MRT	<i>Mean Radiant Temperature</i>
MAE	<i>Mean Absolute Error</i>
MSE	<i>Mean Squared Error</i>
NN	<i>Neural Network</i>

# PERANCANGAN KONTROLER LINGKUNGAN TERMAL *CLIMATE CHAMBER* BERBASIS JARINGAN SARAF TIRUAN

oleh

Ridhan Fadhilah  
15/384859/TK/43521

Diajukan kepada Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika Fakultas Teknik  
Universitas Gadjah Mada pada tanggal 26 Agustus 2020  
untuk memenuhi sebagian persyaratan untuk memperoleh derajat  
Sarjana Program Studi Teknik Fisika

## INTISARI

Penelitian-penelitian kenyamanan termal membutuhkan kondisi lingkungan termal pada *climate chamber* (sebagai ruang uji eksperimental) untuk dapat dikondisikan secara otomatis sesuai dengan skema pengujian penelitian. *Climate chamber* dapat terwujud jika kondisi iklim di dalamnya dapat dikendalikan sesuai dengan kebutuhan skenario penelitian. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu sistem kontrol yang mampu mengendalikan lingkungan termal pada *climate chamber*.

Penelitian ini menggunakan sampel data sebanyak 24.000 yang didapatkan dari simulasi IES-VE. Dengan menggunakan data tersebut, dibangun kontroler berbasis jaringan saraf tiruan (JST) untuk mengendalikan suhu ruang ( $T_{db}$ ) dan kelembapan relatif (RH) pada *climate chamber*. Kontroler dibangun dari model JST dengan menggunakan prinsip model invers dari model *plant* berdasarkan data simulasi IES-VE. Kontroler dirancang dengan memvariasikan pembagian data pelatihan, fungsi aktivasi, serta banyak neuron pada *hidden layer*. Model dipilih berdasarkan nilai *mean squared error* terkecil dari hasil variasi model. Simulasi kontrol dilakukan dengan skenario pemanasan dengan laju  $0,625^{\circ}\text{C}$ . Kinerja hasil simulasi ditinjau melalui nilai *steady-state error*.

Kontroler dibangun dengan menggunakan MATLAB dan disimulasikan dengan menggunakan Simulink. Model JST Kontroler dibangun dengan pembagian data 80% data latih, 10% data validasi, dan 10% data uji. Model JST Kontroler menggunakan fungsi aktivasi *hyperbolic tangent* dengan algoritma pembelajaran Levenberg-Marquardt. Model JST Kontroler memiliki arsitektur jaringan dengan 1 lapisan tersembunyi (*hidden layer*) berisi 35 neuron. Hasil perancangan mampu mengendalikan lingkungan termal *climate chamber* dengan nilai *steady-state error* sebesar  $0,18^{\circ}\text{C}$  untuk suhu ruang dan sebesar 0,04% untuk kelembapan relatif.

**Kata kunci:** Lingkungan Termal, Kontroler, Jaringan Saraf Tiruan, Ruang Iklim.

Pembimbing Utama: Faridah, S.T., M.Sc.

Pembimbing Pendamping: Ir. Agus Arif, M.T.

# DESIGN OF ANN BASED CONTROLLER FOR THERMAL ENVIRONMENT CLIMATE CHAMBER

by

Ridhan Fadhilah  
15/384859/TK/43521

Submitted to the Department of Nuclear Engineering and Engineering Physics  
Faculty of Engineering Universitas Gadjah Mada on August 26th, 2020  
in partial fulfillment of the requirement for the Degree of  
Bachelor of Engineering in Engineering Physics

## ABSTRACT

Thermal comfort studies require the thermal environment conditions in the climate chamber (as a thermal test room) to be automatically conditioned according to the research test scheme. Climate chamber can be realized if the climatic conditions in it can be controlled according to the needs of the research scenario. Therefore, we need a control system capable of controlling the thermal environment in the climate chamber.

This study uses a sample of 24,000 data obtained from the IES-VE simulation. By using this data, a controller based on an artificial neural network (ANN) was built to control air temperature ( $T_{ab}$ ) and relative humidity (RH) in the climate chamber. The Controller is designed from ANN model using the principle of plant inverse model based on IES-VE simulation data. Controller was designed by varying the distribution of training data, activation functions, and many neurons in the hidden layer. The model is selected based on the smallest mean squared error from the variation in the model. The control simulation is carried out with a heating scenario with a rate of 0.625 der C. The performance of the simulation results is reviewed through the steady-state error value.

Controller was built using MATLAB and simulated using Simulink. ANN Controller was created by split the data into 80% training data, 10% validation data, and 10% testing data. ANN controller uses the hyperbolic tangent activation function with the Levenberg-Marquardt learning algorithm. ANN Controller has a network architecture with one hidden layer containing 35 neurons. The results of the author's design able to control the thermal environment of the climate chamber with a steady-state error value 0.18°C for room temperature and 0.04% for relative humidity.

**Keywords:** Thermal Environment, Controller, Artificial Neural Network, Climate Chamber.

Supervisor: Faridah, S.T., M.Sc.  
Co-supervisor: Ir. Agus Arif, M.T.

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **I.1. Latar Belakang**

Kenyamanan termal didefinisikan sebagai kondisi pikiran yang mengekspresikan kepuasan terhadap lingkungan termal [6]. Lingkungan termal adalah lingkungan yang mempengaruhi manusia dalam hal kualitas termalnya, sehingga manusia dapat merasakan lingkungan tersebut sebagai lingkungan yang dingin atau panas. Kenyamanan termal penting untuk kesehatan dan kebugaran tubuh manusia. Hal tersebut berpengaruh terhadap produktivitas manusia dalam melakukan kegiatan. Kurangnya kenyamanan termal dapat mengakibatkan kondisi stres bagi penghuni bangunan. Apabila kondisi bangunan terlalu panas, maka penghuni akan merasa lelah. Apabila kondisi bangunan terlalu dingin, maka penghuni akan merasa gelisah dan bimbang. Karena terdapat variasi yang besar, baik secara fisiologis maupun psikologis, dari orang ke orang, sulit untuk memuaskan semua orang di suatu ruang. Kondisi lingkungan yang dibutuhkan untuk kenyamanan tidak sama untuk semua orang.

Kenyamanan termal secara fisiologis bergantung kepada proses perpindahan kalor antara tubuh dan lingkungan di mana respon fisiologis tubuh berupaya untuk mempertahankan suhu inti tubuh agar tetap bernilai konstan. Untuk mempelajari respon fisiologis tersebut, dibutuhkan sebuah *climate chamber* di mana kondisi iklim di dalamnya dapat dikendalikan sesuai dengan kebutuhan penelitian.

Pada penelitian ini studi kasus diambil di *climate chamber* Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika (DTNTF) Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada (FT-UGM) yang digunakan sebagai ruang uji eksperimental penelitian kenyamanan termal yang ditunjukkan oleh Gambar 1.1. *Climate chamber* DTNTF dilengkapi de-

ngan beberapa perangkat sensor untuk mengukur faktor lingkungan termal. Sensor yang digunakan yakni sensor suhu, sensor kelembaban relatif dan sensor kecepatan udara. *Climate chamber* DTNTF pun dilengkapi dengan perangkat aktuator berupa *Air Conditioner* (AC) dan *heater* sebagai sistem *Heating, Ventilation, and Air Conditioning* (HVAC). Semua sistem yang digunakan pada *climate chamber* ini masih dioperasikan secara manual.



## *Climate Chamber*

**Gambar 1.1.** *Climate chamber* DTNTF FT-UGM

*Climate chamber* merupakan suatu ruangan tertutup yang digunakan untuk menguji efek dari kondisi lingkungan yang ditentukan pada objek biologis, produk industri, bahan, dan/atau perangkat elektronik. Pada penulisan ini, *climate chamber* yang dimaksud berfokus pada objek biologis mengenai penelitian kenyamanan termal. Dalam melakukan penelitian kenyamanan termal, peneliti tersebut membu-

tuhkan suatu *climate chamber* untuk dapat melakukan pengujian. Kondisi lingkungan termal di dalam *climate chamber* dapat berubah sesuai dengan skema pengujian. Terdapat 6 faktor lingkungan termal yang mempengaruhi kenyamanan termal. Faktor lingkungan termal tersebut meliputi tingkat metabolisme tubuh, insulasi pakaian, suhu udara, suhu radian, kecepatan udara dan kelembapan [6].

*Climate chamber* dapat terwujud jika kondisi iklim di dalamnya dapat dikendalikan sesuai dengan kebutuhan penelitian. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu sistem kontrol yang mampu mengendalikan lingkungan termal pada *climate chamber* dengan meninjau nilai *steady-state error* suhu ruang dan kelembapan relatif. *Climate chamber* memiliki banyak nilai masukan dan keluaran atau dikatakan sebagai sistem MIMO (*multiple input multiple output*). Untuk dapat mengendalikan sistem MIMO, diperlukan sistem kontrol cerdas (*intelligent control system*). Salah satu sistem kontrol cerdas yang dapat digunakan untuk sistem MIMO ini yaitu pengendali dengan menggunakan jaringan saraf tiruan (*neural network controller*).

## **I.2. Perumusan Masalah**

Perumusan masalah pada penelitian ini yaitu bagaimana merancang kontroler lingkungan termal berbasis jaringan saraf tiruan untuk dapat mencapai kondisi ajeg sesuai dengan skenario penggunaan *climate chamber* DTNTF FT-UGM.

## **I.3. Tujuan**

Penelitian ini bertujuan untuk membangun model kontroler berbasis jaringan saraf tiruan dengan meninjau nilai *steady-state error* untuk mengendalikan lingkungan termal pada *climate chamber* DTNTF FT-UGM.

#### **I.4. Batasan Masalah**

Berikut batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini:

1. Data yang digunakan merupakan data simulasi IES-VE.
2. Model *plant* dibangun dengan menggunakan model jaringan saraf tiruan.
3. Kinerja kontroler hanya ditinjau melalui nilai *steady-state error* karena secara fisis respon transien termal pada bangunan berlangsung cukup lama.
4. *Climate chamber* dituntut untuk mampu menjaga kondisi lingkungan termal pada nilai tertentu dengan galat suhu kurang dari  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  dan galat kelembapan relatif kurang dari  $\pm 10\%$ .

#### **I.5. Manfaat**

Berikut manfaat dari penelitian ini:

1. Penelitian ini diharapkan mampu mengembangkan ilmu pengetahuan dan aplikasinya di bidang fisika bangunan, sistem kontrol dan kecerdasan buatan.
2. Penelitian ini diharapkan mampu menjadi referensi bagi praktisi kecerdasan buatan atau praktisi dalam pengembangan kenyamanan termal suatu bangunan.
3. Penelitian ini diharapkan mampu memajukan perkembangan teknologi sistem bangunan di Indonesia.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### II.1. Pengkondisian Lingkungan Termal pada *Climate Chamber*

Pengkondisian lingkungan termal pada penelitian *climate chamber* telah banyak dilakukan oleh peneliti-peneliti sebelumnya. Penelitian yang dilakukan meliputi bidang biologi pada [7, 8] dan bidang lingkungan pada [9]. Variabel lingkungan termal dalam *climate chamber* berfungsi sebagai stimulan pada objek penelitian untuk meneliti sensasi dan/atau sensitivitas termal.

Pada [7], subjek yang terpapar pada lingkungan seragam disurvei untuk sensasi dan kenyamanan termal lokal dan keseluruhan (seluruh tubuh). Sensasi dan kenyamanan bagian tubuh lokal sangat bervariasi. Di lingkungan yang sejuk, tangan dan kaki terasa lebih dingin dibandingkan bagian tubuh lainnya. Kepala, tidak peka terhadap dingin tetapi peka terhadap hangat, terasa lebih hangat daripada bagian tubuh lainnya di lingkungan yang hangat. Sensasi dan kenyamanan keseluruhan mengikuti sensasi lokal (kepala) terhangat di lingkungan hangat dan terdingin (tangan dan kaki) di lingkungan sejuk. Subjek mengevaluasi kondisi netral sebagai "nyaman", tidak pernah "sangat nyaman", dan sensasi dan kenyamanan berlebihan selama perubahan langkah seluruh tubuh adalah kecil. Pada artikel ini, *climate chamber* dikondisikan dengan 2 metode. Metode 1 dikondisikan untuk berada pada suhu 16-32°C (*steady-state*). Metode 2 dikondisikan dengan perubahan step  $\Delta T = \pm 9^\circ\text{C}$ .

Tujuan dari penelitian Lee [8] adalah untuk menyelidiki perbedaan etnis di ambang sensasi termal kulit dan zona sensorik antar-ambang antara tropis (Malaysia) dan penduduk asli beriklim sedang (Jepang). Hasil penelitian menunjukkan bahwa (1) laki-laki Malaysia merasakan kehangatan di dahi pada suhu kulit yang lebih tinggi



(Tsk) dibandingkan laki-laki Jepang ( $p < 0,05$ ), sedangkan sensasi dingin pada tangan dan kaki, dirasakan pada Tsk yang lebih rendah pada orang Malaysia ( $p < 0,05$ ); (2) Secara keseluruhan, sensitivitas untuk mendeteksi kehangatan lebih besar di Jepang dibandingkan pria Malaysia; (3) Wilayah tubuh orang Jepang yang paling sensitif terhadap panas adalah dahi untuk pemanasan dan pendinginan, sedangkan sensitivitas termal wilayah orang Malaysia memiliki perbedaan yang lebih kecil daripada orang Jepang; (4) Perbedaan etnis di zona sensorik antar-ambang adalah terutama terlihat di dahi ( $1,9 \pm 1,2^{\circ}\text{C}$  untuk orang Jepang,  $3,2 \pm 1,6^{\circ}\text{C}$  untuk orang Malaysia,  $p < 0,05$ ). Kesimpulannya, penduduk asli tropis cenderung merasakan hangat pada Tsk yang lebih tinggi dan lebih lambat pada kecepatan pemanasan yang sama dan memiliki jangkauan zona sensorik antar-ambang yang lebih luas daripada penduduk asli beriklim sedang. Pada artikel ini suhu *climate chamber* dijaga tetap pada  $28^{\circ}\text{C}$  *operative temperature*.

Penelitian Soebarto pada [9] menyelidiki apakah ketika terpapar pada kondisi yang sama, orang tua (mereka yang berusia 65 ke atas) memiliki sensasi termal, kenyamanan, penerimaan, dan preferensi yang berbeda dari rekan-rekan mereka yang lebih muda. Penelitian dilakukan di ruang lingkungan kenyamanan termal, yang melibatkan 22 subjek yang lebih tua (rata-rata 69,7 tahun) dan 20 subjek yang lebih muda (29,6 tahun), terpapar pada empat kondisi pengujian antara sedikit dingin dan sedikit hangat. Persepsi kenyamanan termal subyektif untuk bagian tubuh lokal dan seluruh tubuh disurvei. Suhu kulit diukur di empat lokasi tubuh: leher, tulang belikat kanan, tangan kiri, dan tulang kering kanan. Kami juga menyelidiki korelasi antara tingkat kelemahan subjek dan tingkat kenyamanan termal mereka. Studi tersebut tidak menemukan perbedaan yang signifikan antara sensasi termal, kenyamanan, dan penerimaan subjek yang lebih tua dan yang lebih muda. Kami juga tidak menemukan korelasi antara tingkat kelemahan subjek dan sensasi termal, kenyamanan, penerima-

an, dan preferensi mereka, tetapi kami tidak memiliki banyak subjek yang lemah. Pada subjek yang lebih tua dan lebih muda, suhu kulit tangan memiliki korelasi yang signifikan dengan sensasi termal lokal dan keseluruhan. Pada artikel ini suhu *climate chamber* diatur pada nilai 20°C dan 25°C.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan Nadiya [10], penghuni ruang yang terbiasa terpapar kondisi lingkungan termal yang panas dan lembap mampu merasakan perubahan 1 level sensasi akibat perubahan suhu naik, minimal sebesar 2,78°C dan perubahan suhu turun, minimal sebesar 2,70°C. Dengan kata lain, tuntutan dari penelitian yaitu memastikan nilai variabel lingkungan suhu untuk dapat dijaga pada nilai tertentu dengan galat  $\pm 2,7^\circ\text{C}$ .

Variabel lingkungan termal yang mempengaruhi objek penelitian beragam bergantung pada tujuan dari penelitian yang akan dijalankan. Variabel yang dimaksud yaitu seperti variabel suhu, kelembaban udara, tekanan, ataupun kombinasi dari 2 atau lebih variabel lingkungan termal. Nilai dari variabel lingkungan termal harus dapat dikendalikan sesuai dengan skenario penelitian yang akan dijalankan. Terdapat penelitian yang menginginkan nilai variabel lingkungan termal terkendali pada nilai *set point* tertentu dengan akurasi yang tinggi dan distribusi yang merata pada titik-titik dalam *climate chamber*. Terdapat pula penelitian yang tidak perlu memiliki pengendalian variabel lingkungan termal berakurasi tinggi dengan nilai galat yang masih dapat diterima. Akan tetapi, dituntut untuk dapat dijaga tetap berada pada rentang nilai tersebut untuk waktu yang lama. Lalu, terdapat pula penelitian yang menginginkan perubahan variabel lingkungan termal dengan waktu yang cepat.

Pada penelitian ini, kondisi *climate chamber* dituntut untuk mampu menjaga kondisi lingkungan termal pada nilai tertentu dengan galat suhu kurang dari  $\pm 1^\circ\text{C}$  dan galat kelembapan relatif kurang dari  $\pm 10\%$ . Penelitian-penelitian yang telah dijabarkan di atas dirangkum secara ringkas pada Tabel 2.1.

**Tabel 2.1.** Pengkondisian Lingkungan Termal pada *Climate Chamber*

Tahun	Peneliti	Lokasi Penelitian	Variabel	Fungsi Chamber	Kondisi Lingkungan Termal
2006 [7]	Arens, Zhang, dan Huizenga	<i>Climate Chamber</i>	Sensasi termal	<i>Climate chamber</i> digunakan sebagai sarana pengujian sensasi termal	Metode 1: suhu 16-32°C ( <i>steady state</i> ). Metode 2: $\Delta T = \pm 9^\circ\text{C}$ ( <i>step change</i> )
2010 [8]	Lee, Saat, dkk.	<i>Climate Chamber</i>	Sensitivitas termal	<i>Climate chamber</i> digunakan sebagai sarana pengujian sensitivitas termal	Suhu di dalam climate chamber dijaga tetap pada 28°C ( <i>Operative Temperature</i> )
2019 [9]	Soebarto, Zhang, dan Schiavon	<i>Climate Chamber</i>	Sensasi Termal, Suhu Nyaman, Preferensi Termal	<i>Climate chamber</i> digunakan sebagai sarana pengujian sensasi termal	Kondisi <i>climate chamber</i> diatur pada suhu 20°C dan 25°C
2020 [10]	Nadiya	<i>Climate Chamber</i> DTNTF FT UGM	Suhu ruang	<i>Climate chamber</i> digunakan sebagai prasarana penelitian sensasi dan kenyamanan termal bangunan	Menggunakan <i>set point</i> ramp dengan kecepatan pemanasan dan pendinginan sebesar 0,4°C (16°C-30°C)
2020	Penelitian ini	<i>Climate Chamber</i> DTNTF FT UGM	Suhu ruang dan kelembapan relatif	<i>Climate chamber</i> merupakan objek penelitian yang akan dikendalikan	Menggunakan <i>set point</i> ramp (16°C-30°C) dengan lompatan 2°C

## II.2. Kontrol Jaringan Saraf Tiruan

Penelitian mengenai aplikasi jaringan saraf tiruan sebagai kontroler telah banyak dilakukan oleh peneliti-peneliti sebelumnya. Penelitian yang dilakukan menggunakan tipe bangunan berupa rumah/tempat tinggal [11, 12] dan bangunan residensial [13]. Variabel kontrol dalam kontroler merupakan parameter yang mempengaruhi kenyamanan termal.

Nilai dari variabel kontrol harus dapat dikendalikan sesuai dengan skenario penelitian yang akan dijalankan. Terdapat penelitian yang menggunakan jaringan saraf tiruan secara langsung sebagai kontroler. Terdapat pula penelitian yang membandingkan JST dengan metode lain, seperti logika *fuzzy*, *proportional–integral–derivative* (PID), *ruled-based controller* (RBC), *model predictive control* (MPC), dan *time delay neural network* (TDNN) [13]. Dengan kata lain, penggunaan metode jaringan saraf tiruan untuk kontroler memang sudah terbukti cukup baik.

Moon dan Kim melakukan penelitian mengenai model kontrol termal berbasis jaringan saraf tiruan untuk bangunan residensial. Tipe bangunan yang digunakan merupakan sebuah rumah di Amerika. Moon dan Kim mencoba mengendalikan kondisi termal dengan menjadikan suhu, kelembapan relatif dan PMV (*Predicted Mean Vote*) sebagai variabel kontrol. Pada penelitian tersebut JST mampu memenuhi tuntutan kontrol pada variabel suhu (20-23)°C di semua kasus, sedangkan kelembapan (35-60)% hanya memenuhi 98% dari total kasus yang ada [11].

Studi perbandingan metode kontrol termal bangunan berbasis jaringan saraf tiruan dilakukan oleh Moon, Jung, Kim, dan Han pada tahun 2016. Tipe bangunan yang digunakan merupakan sebuah tempat tinggal di Amerika. Jin Woo Moon dan peneliti lainnya mencoba membandingkan metode kontrol ANN (JST), logika *fuzzy*, dan ANFIS (*adaptive neuro-fuzzy*). Pada penelitian tersebut ANN dan ANFIS lebih mendekati set point yang ditentukan (21,5°C untuk musim dingin dan 24,5 °C untuk

musim panas). ANN dan ANFIS memiliki nilai galat  $0,13^{\circ}\text{C}$  (musim dingin) dengan nilai penyimpangan sebesar  $0,19^{\circ}\text{C}$  untuk ANN (musim panas) dan  $0,17^{\circ}\text{C}$  untuk ANFIS (musim panas) [12].

Penelitian sistem kontrol bangunan diteliti oleh Drgoña pada rumah bertingkat dengan 6 zona ruang. Penelitian bertujuan untuk memanipulasi sistem HVAC yang ada. Sistem HVAC yang digunakan berupa radiator yang berjumlah 1 buah di setiap ruang. Dia membandingkan pengendalian dengan menggunakan beberapa metode, yakni *model predictive control* (MPC), PID, RBC, TDNN dan *Regression Tree*. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa kontroler TDNN mampu mempertahankan kenyamanan tinggi dan penghematan energi dengan kehilangan kinerja yang kecil dibandingkan MPC yg orisinil, sementara itu TDNN mampu mengurangi kompleksitas solusi secara drastis [13].

Pada penelitian ini perancangan kontroller JST menggunakan suhu ruang dan kelembapan relatif sebagai variabel kontrol dengan menggunakan AC dan Heater sebagai pengkondisi ruang. Perancangan kontroler JST memperhitungkan variabel gangguan sistem sebagai bagian dari proses perancangan. Variabel gangguan tersebut berupa suhu lingkungan dan intensitas radiasi matahari. Penelitian-penelitian yang telah dijabarkan di atas dirangkum dengan ringkas pada Tabel 2.2.

**Tabel 2.2.** Tinjauan Pustaka Kontrol JST

Tahun	Peneliti	Tipe Bangunan	Variabel kontrol	Manipulator	Variabel Gangguan	Metode Kontrol	Hasil Penelitian
2010 [11]	Moon dan Kim	Rumah	Suhu, kelembapan relatif, dan PMV	AC, Heater, Humidifier, dan Dehumidifier	-	ANN	ANN mampu memenuhi tuntutan kontrol pada variabel suhu (20-23)°C di semua kasus, sedangkan kelembapan (35-60)% hanya memenuhi 98% dari total kasus yang ada
2011 [12]	Moon, Jung, dkk.	Bangunan tempat tinggal	Suhu dan kenyamanan termal	AC dan Heater	-	ANN, <i>Fuzzy Logic</i> , dan ANFIS	ANN dan ANFIS lebih mendekati set point yang ditentukan. ANN dan ANFIS memiliki penyimpangan (musim dingin) sebesar 0,13°C dan penyimpangan (musim panas) sebesar 0,19°C untuk ANN dan 0,17°C untuk ANFIS.
2017 [13]	Drgoňa, dkk.	Bangunan residensial dengan 6 ruang	Suhu operasional ruang	Sistem HVAC Bangunan: 1 Radiator tiap ruang	Suhu radiasi matahari, intensitas radiasi matahari, suhu ambien, dan suhu tanah	MPC, PID, RBC, dan TDNN	Kontroler TDNN mampu mempertahankan kenyamanan tinggi dan penghematan energi dengan kehilangan kinerja yang kecil dibandingkan MPC yg orisinal, sementara itu mampu mengurangi kompleksitas solusi secara drastis.
2020	Penelitian ini	<i>Climate Chamber</i> DTNTF FT UGM	Suhu ruang dan kelembapan relatif	AC dan Heater	Intensitas Radiasi Matahari dan Suhu Lingkungan	ANN	-

## **BAB III**

### **DASAR TEORI**

#### **III.1. Lingkungan Termal**

Lingkungan termal dapat didefinisikan sebagai karakteristik lingkungan yang mempengaruhi perpindahan kalor seseorang [6] atau aspek-aspek lingkungan fisik individu atau populasi yang secara langsung mempengaruhi potensi perpindahan kalor antara subjek atau populasi dan lingkungannya [14]. Lingkungan yang dimaksud yaitu segala sesuatu yang mengelilingi objek, organisme, ataupun populasi yang diteliti.

##### **III.1.1. Parameter Lingkungan Termal**

Kualitas lingkungan termal dapat ditentukan berdasarkan beberapa parameter. Secara umum, beberapa penelitian kualitas lingkungan termal menggunakan empat parameter meteorologis, yakni suhu, kelembapan relatif, kecepatan angin, dan radiasi matahari [14].

Perbedaan antara lingkungan luar (lapangan) dan bangunan (dalam ruang) dapat bergantung relatif kepada seberapa penting perbedaan parameter-parameter lingkungan tersebut, tetapi empat parameter yang sama masih dapat digunakan dalam menetapkan kondisi lingkungan termal. Interior bangunan mencakup variasi yang hampir tak terbatas, mulai dari kantor modern bertingkat tinggi hingga garasi dan hanggar tanpa pemanas. Dalam bangunan tertutup dengan iklim terkendali, kondisi termal sering diwakili dengan suhu ruang, terlepas dari kontribusi parameter lainnya, karena keempat parameter tersebut pada dasarnya konstan pada pengaturan suhu tertentu.

### III.1.2. *Climate Chamber*

*Climate chamber* merupakan ruangan yang dirancang khusus untuk tujuan penelitian di mana nilai dari variabel lingkungan termal didalamnya dapat dikendalikan. Ruangan ini memang dibangun untuk tujuan penelitian dan bukan untuk ruang huni. Jenis penelitian yang dilakukan dengan menggunakan *climate chamber* dapat berasal dari berbagai bidang ilmu yang berbeda seperti biologi, ilmu lingkungan, *engineering*, dsb. Variabel kontrol lingkungan termal di dalam *climate chamber* bergantung terhadap tujuan dan metode penelitian. Variabel-variabel yang biasa diteliti yaitu seperti variabel suhu, kelembaban udara, tekanan udara, dsb.

Nilai variabel lingkungan termal di dalam *climate chamber* harus dapat dikendalikan sesuai dengan skenario penelitian. Terdapat penelitian yang menginginkan variabel lingkungan termal terkendali pada suatu nilai *set point* dengan akurasi yang tinggi dan distribusi yang merata [15]. Terdapat pula penelitian yang tidak dituntut untuk mencapai *set point* dengan akurasi yang tinggi, namun dengan rentang nilai variabel lingkungan termal yang lebar dan dijaga dalam rentang waktu yang lama [16, 17, 18, 19]. Serta terdapat penelitian yang menginginkan variabel lingkungan termal dalam *climate chamber* mencapai *set point* dengan waktu perubahan yang cepat [20].

Pada penelitian-penelitian yang menggunakan *climate chamber*, peneliti tersebut ingin mengetahui bagaimana pengaruh paparan variabel lingkungan termal terhadap objek penelitian dengan rentang waktu tertentu sesuai dengan skenario penelitian. Pengaruh dari paparan tersebut dapat berupa perubahan secara fisis ataupun secara kimiawi. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui bagaimana pengaruh paparan variabel lingkungan termal terhadap objek penelitian.



### III.1.2.2. Psikrometrik

Psikrometrik merupakan bidang ilmu yang mempelajari tentang cara menentukan sifat-sifat fisis dan termodinamika dari suatu gas dengan campuran antara gas-uap didalamnya. Psikrometrik digunakan untuk menganalisa kondisi dan proses yang melibatkan udara yang mengandung uap. Rentang suhu yang dibahas berada pada suhu  $-40^{\circ}\text{C}$  sampai  $50^{\circ}\text{C}$ . Sifat-sifat dari udara dapat didapatkan dengan mudah melalui *psychrometric chart*. Variabel-variabel yang menunjukkan sifat dari udara yang mengandung uap air di dalamnya diantaranya: [1]

1. *Dry-Bulb Temperature* ( $T_{db}$ )

$T_{db}$  (disebut juga sebagai suhu udara) merupakan ukuran suhu yang menggambarkan sifat dari udara yang umum digunakan.  $T_{db}$  dapat diukur dengan menggunakan termometer biasa.

2. *Wet-Bulb Temperature* ( $T_{wb}$ )

$T_{wb}$  merupakan ukuran suhu yang menggambarkan sifat yang berhubungan dengan kandungan uap air di udara.  $T_{wb}$  selalu lebih rendah dengan  $T_{db}$ .  $T_{wb}$  dapat diukur dengan termometer yang dilapisi kain basah.

3. *Dew Point Temperature* ( $T_{dp}$ )

$T_{dp}$  merupakan ukuran suhu ketika uap air mulai mengembun dan mulai memisahkan diri dari campuran gas.

4. *Humidity Ratio* ( $W$ )

*Humidity ratio* merupakan massa uap air (pada udara basah) per satuan massa udara kering. *Humidity ratio* dapat dihitung dengan Persamaan 3.1

$$W = \frac{m_w}{m_a} \quad (3.1)$$

di mana  $m_w$  = massa uap air;  $m_a$  = massa udara kering.

#### 5. Kelembapan relatif (RH)

RH didefinisikan sebagai rasio tekanan parsial uap air dalam campuran udara-air dengan tekanan uap air jenuh di atas permukaan datar air murni pada suhu tertentu. Kelembapan relatif menggunakan satuan persen dan dihitung menggunakan Persamaan 3.2.

$$RH = \frac{P_a}{P_{sa}(T)} \times 100\% \quad (3.2)$$

di mana  $P_a$  = tekanan parsial uap air;  $P_{sa}(T)$  = tekanan uap air jenuh di suhu T.

### III.1.3. Perpindahan Kalor pada Bangunan

Perpindahan kalor adalah salah satu bentuk energi termal yang dapat dipindahkan karena perbedaan suhu dari suatu tempat ke tempat lain [21]. Setiap kali ada perbedaan suhu dalam suatu medium atau antar media maka perpindahan kalor pasti terjadi. Kalor muncul dalam bentuk sensitif, yang artinya berhubungan dengan suhu atau dalam bentuk laten (kalor transformasi). Kalor sensitif dipindahkan dengan cara: [22]

#### 1. Konduksi

Konduksi mengacu pada energi kalor yang dipindahkan ketika atom bergetar bertabrakan dan elektron bebas bergerak secara kolektif. Kalor berpindah seperti itu di antara benda padat pada suhu yang berbeda dalam kontak satu sama lain dan perbedaan suhu di antara titik-titik dalam benda padat.

#### 2. Konveksi

Konveksi dapat diartikan sebagai perpindahan kelompok molekul pada suhu

yang berbeda. Koneveksi pada dasarnya adalah konsekuensi dari gerakan (transfer entalpi) dan terjadi dengan cara yang jelas dekat dengan kontak antara benda cair dan gas di satu sisi dan benda padat di sisi lain.

### 3. Radiasi

Radiasi mengacu pada perpindahan kalor yang disebabkan oleh emisi dan penyerapan gelombang elektromagnetik. Pada suhu di atas 0 K, setiap permukaan memancarkan energi elektromagnetik. Antara permukaan pada temperatur yang berbeda, emisi tersebut menghasilkan pertukaran kalor. Perpindahan kalor melalui radiasi tidak membutuhkan media.

Terdapat beberapa definisi pada proses perpindahan kalor terkait bangunan. Definisi-definisi tersebut di antaranya: [22]

#### 1. Kalor

Kuantitas yang menunjukkan pertukaran energi dalam bentuk kalor. Karena energi adalah skalar, kalor juga skalar.

Simbol:  $Q$ ; satuan: [J] (Joule)

#### 2. Aliran Kalor

Kalor per satuan waktu. Aliran kalor merupakan ukuran daya. Serupa dengan kalor, aliran kalor adalah skalar.

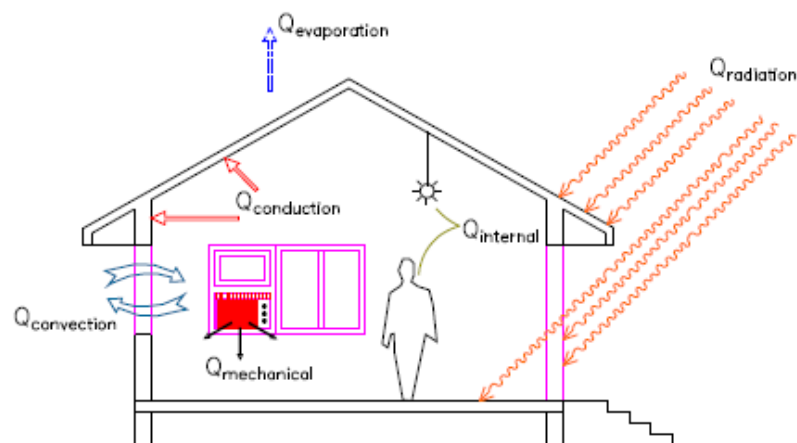
Simbol:  $\Phi$ ; satuan: [J/s] = [W] (Joule per second = Watt)

#### 3. Laju Aliran Kalor

Kalor per satuan waktu yang mengalir melalui satuan permukaan yang tegak lurus terhadap arah aliran. Laju aliran kalor merupakan vektor dengan arah yang sama dengan permukaan. Komponen:  $q_x, q_y, q_z$  pada koordinat kartesian atau  $q_R, q_\Phi, q_{\theta}$  pada koordinat polar.

Simbol:  $q$ ; satuan: [ $W/m^2$ ] (Watt per  $m^2$ )

Proses perpindahan kalor yang terjadi antara bangunan dan lingkungan terbagi menjadi berbagai macam. Proses tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.1. Perpindahan panas konduksi terjadi di beberapa bagian bangunan yang padat seperti dinding, atap, lantai, dsb. Selain itu, terjadi juga perpindahan kalor konveksi dan radiasi pada bangunan. Radiasi matahari ditransmisikan melalui bagian bangunan yang transparan seperti kaca kemudian diserap oleh permukaan internal bangunan. Kalor ruangan juga akan bertambah apabila terdapat sumber kalor lain seperti penghuni ruang maupun peralatan elektronik. [1]



**Gambar 3.1.** Pertukaran kalor bangunan dengan lingkungan [1]

Lingkungan termal bangunan dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor-faktor tersebut diantaranya geometri bangunan, material bangunan, iklim, dan penggunaan bangunan itu sendiri. Proses perpindahan kalor yang membentuk lingkungan termal secara rinci dibagi menjadi 4 bagian, yaitu:

1. Proses perpindahan panas yang terjadi di muka luar dari selubung bangunan
2. Proses perpindahan panas yang terjadi di selubung bangunan
3. Proses perpindahan panas yang terjadi di muka dalam dari selubung bangunan
4. Proses perpindahan panas dan massa yang terjadi di udara dalam bangunan

### III.2. Kontrol Otomatis

Kontrol otomatis telah memegang peranan yang sangat penting dalam perkembangan ilmu dan teknologi. Di samping sangat diperlukan pada pesawat ruang angkasa, peluru kendali, sistem kontrol pesawat, dan sebagainya, sistem kontrol juga menjadi bagian penting dan terpadu dari proses-proses dalam pabrik dan industri modern. Sistem kontrol otomatis sangat diperlukan dalam operasi-operasi di industri untuk mengendalikan tekanan, temperatur, laju aliran dan sebagainya. [2]

#### III.2.1. Dasar-dasar Ilmu Kontrol

Sistem adalah kombinasi dari beberapa komponen yang bekerja bersama-sama dan bersinergi untuk mencapai tujuan yang diinginkan. Sistem tidak dibatasi hanya untuk sistem fisik saja. Konsep sistem dapat digunakan pada gejala yang abstrak dan dinamis lainnya seperti sistem ekonomi, biologi, organisasi, dan lain sebagainya. Sistem kontrol adalah interkoneksi dari berbagai komponen kontrol yang membentuk suatu konfigurasi sistem yang akan menghasilkan respon sistem yang diinginkan. [2]

Komponen utama dari sistem kontrol terdiri dari proses dan kontroler. Proses adalah komponen atau grup yang terdiri dari beberapa komponen yang dikendalikan. Kontroler adalah komponen yang mengendalikan proses. Keluaran dari kontroler adalah nilai variabel yang memanipulasi proses.

Sistem kontrol dapat dikategorikan menjadi dua macam, yakni sistem kontrol kalang terbuka dan sistem kontrol kalang tertutup. Sistem kontrol kalang terbuka adalah sistem kontrol yang keluarannya tidak berpengaruh pada aksi kontrol. Pada sistem ini keluaran tidak dibandingkan dengan *set point*. Dengan demikian, setiap *setpoint* memiliki suatu kondisi operasi yang tetap. Jadi ketelitian sistem tergantung dari kalibrasi sistem. Sistem kontrol kalang terbuka ini juga tidak akan mampu bekerja jika ada gangguan internal maupun eksternal pada sistem. Sistem kontrol

kalang tertutup atau sistem kontrol berumpan balik adalah sistem kontrol yang sinyal keluarannya mempunyai pengaruh langsung pada aksi kontrol. Sinyal kesalahan penggerak, yang merupakan selisih antara nilai keluaran sistem dan nilai *set point* diumpankan ke kontroler untuk memperkecil kesalahan dan membuat agar nilai keluaran sistem mendekati harga yang diinginkan (*set point*). Penggunaan umpan balik membuat respon sistem menjadi kurang peka terhadap gangguan internal maupun eksternal. Dengan demikian, jika dibandingkan dengan sistem kontrol kalang terbuka, sangat mungkin diperoleh sistem kontrol yang lebih teliti meskipun menggunakan komponen-komponen yang relatif kurang teliti. [2]

Sistem kontrol merupakan hal yang dinamis. Sistem akan memberikan respon terhadap input yang diberikan, di mana pada awalnya sistem akan memberikan suatu respon transien yang selanjutnya tercapai kondisi keadaan-ajeg yang akan mengikuti input yang diberikan. Terdapat tiga hal utama tujuan desain dan analisis dari sistem kontrol, yaitu: [2]

1. Menghasilkan spesifikasi dari respon transien yang diinginkan.
2. Mengurangi kesalahan pada keadaan-ajeg.
3. Mencapai kestabilan sistem.

### **Respon Transien**

Jika suatu sistem kontrol dikenakan suatu input tertentu, sistem tidak dapat langsung mengikuti input yang diberikan, tetapi sistem terlebih dahulu akan berusaha untuk menyesuaikan karakter naturalnya dengan input yang diberikan. Respon inilah yang dinamakan respon transien dan menjadi hal penting untuk dianalisis dalam desain sistem kontrol. Sebagai contoh adalah respon sistem kontrol posisi elevator. Jika respon transien terlalu lambat maka akan membuat penumpang tidak sabar. Tetapi jika respon transien terlalu cepat maka akan membuat penumpang merasa tidak nyaman.

an. Respon transien juga penting untuk alasan struktur. Respon transien yang terlalu cepat dapat juga menyebabkan kerusakan fisik pada peralatan yang dikendalikan.[2]

### **Kestabilan Sistem**

Respon dari sistem merupakan hasil penjumlahan dari respon natural sistem dan respon paksaan. Respon natural merupakan respon sistem karena karakter natural dari sistem. Respon paksaan adalah respon sistem terhadap input atau paksaan yang diberikan pada sistem. Sistem kontrol dikatakan stabil jika respon natural:

1. pada rentang tertentu bernilai mendekati nol, sehingga keseluruhan respon hanya menyisakan respon paksaan, atau
2. berosilasi.

Jika respon natural dari sistem membesar sehingga lebih besar dari respon paksaannya, maka sistem dikatakan tidak stabil. Hal ini bisa mengakibatkan kondisi-kondisi yang tidak menguntungkan. Misalnya, suatu elevator akan meluncur sampai menembus atap, posisi antena akan terus berputar dan sebagainya.

### **Proses Pengendalian**

Proses pengendalian merupakan tugas seorang insinyur kontrol untuk menganalisis sistem yang ada, dan merancang sistem baru untuk memenuhi kebutuhan spesifik. Terkadang sistem baru perlu dirancang, tetapi suatu unit kontroler lebih sering dirancang untuk meningkatkan kinerja sistem yang ada. Ketika perancangan suatu sistem atau penerapan suatu kontroler dalam menambah sistem yang ada, perlu mengikuti beberapa langkah berikut: [2]

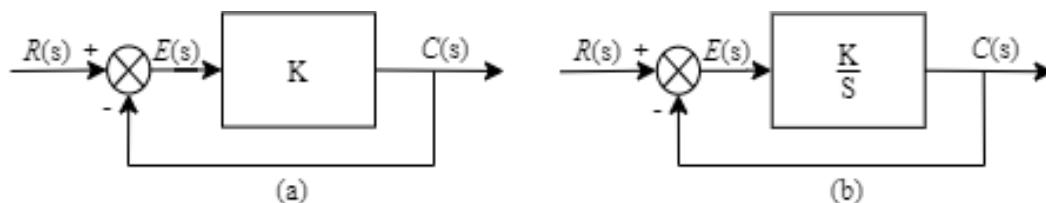
1. Pemodelan sistem
2. Analisis sistem

3. Perancangan kontroler
4. Penerapan kontroler dan pengujian

### III.2.2. *Steady-State Error*

Salah satu tujuan dari desain dan analisis dari sistem kontrol difokuskan pada respon keadaan-ajeg. Misalnya dalam sistem kontrol posisi elevator, kesalahan pada keadaan-ajeg akan menyebabkan posisi elevator tidak tepat pada lantai yang dituju, tetapi mungkin pada posisi di atas atau di bawahnya. Dalam keadaan-ajeg diharapkan respon sistem sesuai dengan input yang diberikan. Tujuan dari desain dan analisis sistem kontrol diarahkan pada bagaimana memperkecil kesalahan pada keadaan-ajeg.

kesalahan keadaan-ajeg (*steady-state error*) adalah perbedaan antara input dan output untuk input tes yang ditentukan ketika  $t \rightarrow \infty$ . Dalam sistem kontrol diperhatikan perbedaan antara input dan output dari sistem kontrol umpan balik setelah mencapai keadaan-ajeg. [2]



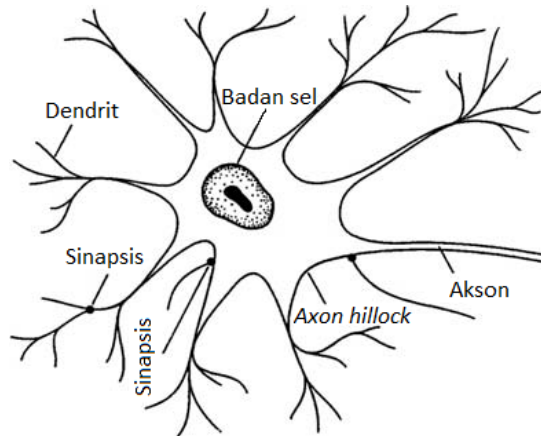
**Gambar 3.2.** Sistem dengan **a.** *steady-state error* bernilai terbatas untuk input fungsi step; **b.** *steady-state error* nol untuk input fungsi step [2]

Contohnya, amati Gambar 3.2(a) di mana  $R(s)$  merupakan input,  $C(s)$  merupakan output, dan  $E(s) = R(s) - C(s)$  adalah galat (galat keadaan-ajeg). Pada keadaan-ajeg, jika  $c(t) = r(t)$ , maka  $e(t)$  bernilai nol.



### III.3. Jaringan Saraf Tiruan (JST)

Jaringan Saraf Tiruan (JST) dimodelkan dengan mengadaptasi proses biologis untuk pemrosesan informasi, termasuk secara khusus sistem saraf dan unit dasarnya, neuron (sel saraf). Sinyal didistribusikan dalam bentuk beda potensial antara bagian dalam dan luar sel. Komponen sel saraf (neuron) ditunjukkan pada Gambar 3.3. Dendrit membawa sinyal dari neuron lain ke dalam badan sel (soma), kemungkinan dengan memperkalikan setiap sinyal yang masuk dengan koefisien pembobotan pengiriman. [3]

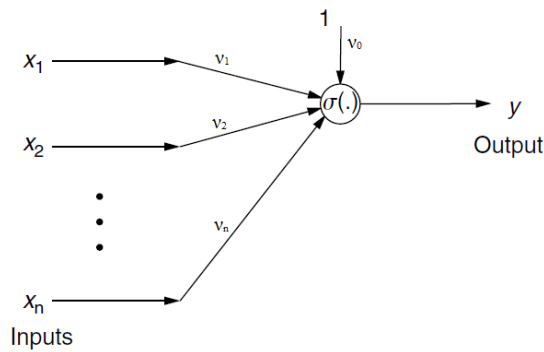


**Gambar 3.3.** Anatomi neuron [3]

Pada badan sel, kapasitansi sel mengintegrasikan sinyal yang terkumpul di *axon hillock* (bagian khusus dari badan sel neuron yang terhubung dengan akson). Sekalinya sinyal gabungan melebihi ambang batas nilai tertentu, sinyal/impuls ditransmisikan melalui akson. Ketidaklinieran sel menjadikan impuls komposit sebagai fungsi nonlinier dari kombinasi sinyal yang datang. Akson tersebut, melalui sinapsis, terhubung dengan dendrit pada neuron berikutnya. Sinapsis beroperasi melalui pelepasan kimiawi *neurotransmitter* melintasi celah antar sel, dan dapat berupa *excitatory* (kecenderungan dalam pengaktifan neuron berikutnya) atau *inhibitory* (kecenderungan dalam mencegah pengaktifan neuron berikutnya) [3].

### III.3.1. Model Matematis Neuron

Model matematis dari suatu neuron dilukiskan oleh Gambar 3.4, yang mana menunjukkan pembobotan dendrit  $v_j$ , nilai ambang batas  $v_0$  (disebut juga sebagai bias), penjumlahan dari sinyal masuk yang diberi bobot, dan fungsi nonlinear  $\sigma(\cdot)$ . Sel input adalah sinyal ke- $n$  pada waktu instan  $x_1(k), x_2(k), x_3(k), \dots, x_n(k)$  dan outputnya adalah nilai skalar  $y(k)$ , yang dapat dinyatakan sebagai

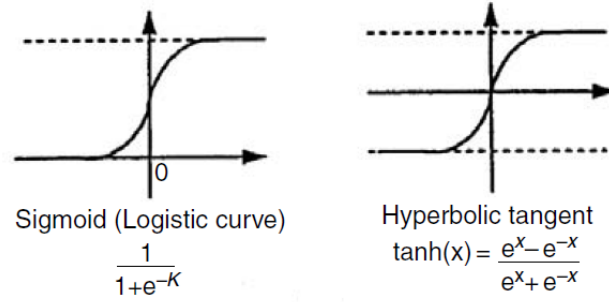


**Gambar 3.4.** Model matematis neuron [3]

$$y(k) = \sigma \left( \sum_{j=1}^n v_j x_j(k) + v_0 \right) \quad (3.3)$$

Bobot-bobot positif  $v_j$  berhubungan dengan sinapsis *exitatory* dan bobot-bobot negatif dengan sinapsis *inhibitory*. Jaringan ini disebut sebagai *perceptron* oleh Rosenblatt pada tahun 1959. [3]

Fungsi sel nonlinear dikenal sebagai fungsi aktivasi. Fungsi aktivasi dipilih secara khusus untuk aplikasi-aplikasi meskipun beberapa pilihan yg umum diilustrasikan pada Gambar 3.5. Intensi pada fungsi aktivasi adalah untuk memodelkan perilaku nonlinier suatu sel di mana tidak terdapat output di bawah nilai tertentu suatu argumen. Fungsi sigmoid adalah sebuah kelas umum dari fungsi yang tidak meningkat secara monoton dengan mengambil nilai-nilai yang dibatasi antara nilai  $-\infty$  dan  $+\infty$ . Perlu dicatat bahwa ketika nilai ambang batas atau bias  $v_0$  berubah, fungsi



**Gambar 3.5.** Fungsi-fungsi aktivasi [3]

aktivasi bergeser ke kiri atau ke kanan. Untuk kebanyakan algoritma pelatihan JST (termasuk *backpropagation*), turunan dari  $\sigma(\cdot)$  dibutuhkan sehingga fungsi aktivasi yang dipilih haruslah dapat terdiferensiasi. [3]

Ekspresi untuk output neuron  $y(k)$  pada waktu instan  $k$  (dalam kasus waktu yang kontinyu) dapat dirampingkan dengan menentukan vektor kolom dari bobot-bobot JST  $\bar{v}(k) \in \mathbb{R}^n$  sebagai

$$\bar{x}(k) = [x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_n]^T, \quad \bar{v}(k) = [v_1 \ v_2 \ \cdots \ v_n]^T \quad (3.4)$$

Kemudian, ini memungkinkan untuk ditulis dalam notasi matriks

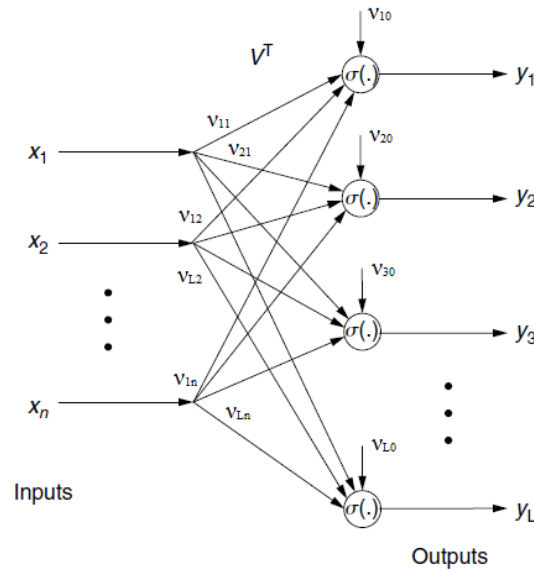
$$y = \sigma(\bar{v}^T \bar{x}) + v_0 \quad (3.5)$$

Vektor kolom input *augmented*  $x(k) \in \mathbb{R}^{n+1}$  dan vektor kolom bobot JST  $v(k) \in \mathbb{R}^{n+1}$  didefinisikan sebagai

$$\begin{aligned} x(k) &= [1 \ \bar{x}^T]^T = [1 \ x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_n]^T \\ v(k) &= [v_0 \ \bar{v}^T]^T = [v_0 \ v_1 \ v_2 \ \cdots \ v_n]^T \end{aligned} \quad (3.6)$$

yang dapat juga ditulis sebagai

$$y = \sigma(v^T x) \quad (3.7)$$



**Gambar 3.6.** Jaringan layar tunggal [3]

Meskipun vektor input  $\bar{x}(k) \in \mathbb{R}^n$  dan vektor bobot  $\bar{v}(k) \in \mathbb{R}^n$  masing-masing telah ditambahkan dengan 1 dan  $v_0$ , untuk memasukkan nilai bias, terkadang dengan bebas dapat dinyatakan bahwa  $x(k)$  dan  $v$  adalah elemen  $\mathbb{R}^n$ .

Vektor penggambaran output neuron  $y(k)$  disebut sebagai mekanisme penarikan sel. Vektor tersebut mendeskripsikan bagaimana output itu direkonstruksi dari sinyal input dan nilai parameter sel.

Gambar 3.6 menunjukkan sebuah JST yang mengandung  $L$  buah sel, semuanya diberi umpan oleh sinyal input yang sama dan memproduksi satu output  $y(k)$  per neuron. Hal ini disebut sebagai jaringan layar tunggal. Persamaan *recall* untuk jaringan ini ditunjukkan sebagai berikut

$$y_l(k) = \sigma \left( \sum_{j=1}^n v_{lj} x_j(k) + v_{l0} \right); \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (3.8)$$

Akan lebih mudah untuk menulis bobot dan bias masing-masing dalam bentuk matriks dan vektor. Dengan menentukan matriks bobot dan vektor bias sebagai

berikut

$$\bar{V}^T \equiv \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{L1} & v_{L2} & \cdots & v_{Ln} \end{bmatrix}, \quad b_v = \begin{bmatrix} v_{10} \\ v_{20} \\ \vdots \\ v_{L0} \end{bmatrix}, \quad (3.9)$$

Salah satu cara menulis vektor output  $y(t) = [y_0 \ y_1 \ y_2 \ \cdots \ y_L]^T$  sebagai berikut

$$y = \bar{\sigma}(\bar{V}^T \bar{x} + b_v) \quad (3.10)$$

Vektor fungsi aktivasi yang ditentukan oleh vektor  $w \equiv [w_1 \ w_2 \ \cdots \ w_L]^T$  adalah

$$\bar{\sigma}(w) \equiv [\bar{\sigma}(w)_1 \ \bar{\sigma}(w)_2 \ \cdots \ \bar{\sigma}(w)_L]^T \quad (3.11)$$

Penyempurnaan lebih lanjut dapat dicapai dengan memasukkan vektor bias sebagai kolom pertama dari matriks *augmented* bobot sebagai berikut

$$V^T \equiv \begin{bmatrix} v_{10} & v_{11} & \cdots & v_{1n} \\ v_{20} & v_{21} & \cdots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{L0} & v_{L1} & \cdots & v_{Ln} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

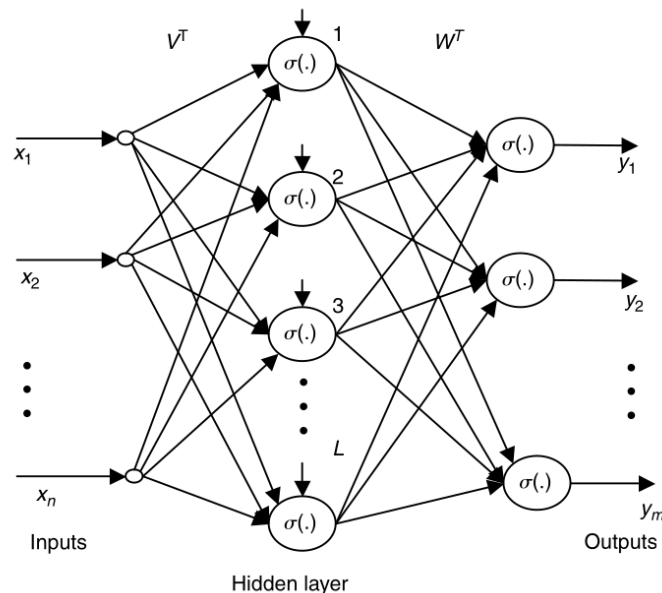
Kemudian output JST dapat digambarkan dalam bentuk vektor *augmented* input  $x(k)$  sebagai

$$y = \bar{\sigma}(V^T x) \quad (3.13)$$

### III.3.2. Jaringan Layar Jamak (MLP)

Jaringan layar jamak (*Multilayer Perceptron*) merupakan perluasan dari jaringan layar tunggal (*perceptron*). Sebuah JST 2 layar memiliki dua lapisan neuron dengan satu layar memiliki  $L$  buah neuron yang memberikan umpan kepada lapis-

an kedua yang memiliki  $m$  buah neuron, digambarkan pada Gambar 3.7. Lapisan pertama dikenal sebagai lapisan tersembunyi, dengan  $L$  sebagai jumlah neuron pada lapisan tersembunyi tersebut. Lapisan kedua dikenal sebagai lapisan output. Jaringan saraf tiruan yang terdiri dari banyak lapisan disebut sebagai *multilayer perceptron*. Daya komputasi untuk lapisan ini perlu ditingkatkan secara signifikan dibandingkan jaringan layar tunggal. Dengan jaringan layar tunggal, dimungkinkan untuk menerapkan operasi digital seperti AND, OR, dan COMPLEMENT. Namun, penelitian



**Gambar 3.7.** Jaringan 2 layer [3]

mengenai JST telah dihentikan bertahun-tahun yang lalu ketika ditunjukkan bahwa jaringan layar tunggal tidak mampu melakukan operasi EXCLUSIVE OR (X-OR), yang merupakan masalah dasar dalam perancangan sistem logika digital. Kemudian telah ditunjukkan bahwa jaringan 2 layer dapat menerapkan operasi EXCLUSIVE OR (X-OR) dan ini kembali mempercepat penelitian JST di awal 1980-an. Beberapa peneliti (Hush dan Horne 1993) mempresentasikan solusi untuk operasi X-OR dengan menggunakan fungsi aktivasi sigmoid. [3]

Output jaringan 2 layar ditunjukkan oleh persamaan *recall* berikut

$$y_i = \sigma \left( \sum_{l=1}^L w_{il} \sigma \left( \sum_{j=1}^n v_{lj} x_j + v_{l0} \right) + w_{i0} \right); \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3.14)$$

Definisi output jaringan tersembunyi  $z_1$  dapat ditulis sebagai berikut

$$\begin{aligned} z_l &= \sigma \left( \sum_{j=1}^n v_{lj} x_j + v_{l0} \right); \quad l = 1, 2, \dots, L \\ y_i &= \sigma \left( \sum_{l=1}^L w_{il} z_l + w_{i0} \right); \quad l = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (3.15)$$

Definisi matriks bobot layar pertama  $\bar{V}$  dan  $V$  dan matriks bobot layar kedua sebagai berikut

$$\bar{W}^T \equiv \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1n} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{L1} & w_{L2} & \cdots & w_{Ln} \end{bmatrix}, \quad b_w = \begin{bmatrix} w_{10} \\ w_{20} \\ \vdots \\ w_{L0} \end{bmatrix}, \quad (3.16)$$

$$W^T \equiv \begin{bmatrix} w_{10} & w_{11} & \cdots & w_{1n} \\ w_{20} & w_{21} & \cdots & w_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{L0} & w_{L1} & \cdots & w_{Ln} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Output JST dapat ditulis sebagai berikut

$$y = \bar{\sigma} \left( \bar{W}^T \bar{\sigma} (\bar{V}^T \bar{x} + b_v) + b_w \right), \quad (3.18)$$

atau

$$y = \bar{\sigma} \left( W^T \sigma(V^T x) \right). \quad (3.19)$$

Pada Persamaan 3.19, notasi  $\bar{\sigma}$  berarti bahwa vektor ditentukan sesuai dengan Persamaan (3.11). Dalam Persamaan (3.19) perlu digunakan vektor *augmented*

$$\sigma(w) \equiv [1 \quad \bar{\sigma}(w)^T]^T = [1 \quad \sigma(w_1) \sigma(w_2) \dots \sigma(w_L)]^T, \quad (3.20)$$

di mana nilai 1 ditempatkan sebagai entri pertama untuk memungkinkan penggabungan bias  $w_{i0}$  sebagai kolom pertama dari  $W^T$ . Dalam hal vektor output layar tersembunyi  $z \in \mathbb{R}^L$  seseorang dapat menuliskan

$$\bar{z} = \sigma(V^T x), \quad (3.21)$$

$$y = \sigma(W^T z). \quad (3.22)$$

di mana  $z \equiv [1 \quad \bar{z}^T]^T$

### III.3.2.2. Penskalaan Fitur

Salah satu transformasi terpenting yang perlu diterapkan pada data sebelum pelatihan model JST adalah penskalaan fitur. Dengan sedikit pengecualian, algoritma JST tidak berfungsi dengan baik saat atribut numerik masukan memiliki skala yang sangat berbeda. Akan tetapi, harus diperhatikan bahwa penskalaan nilai data target umumnya tidak diperlukan. Ada dua cara umum untuk membuat semua atribut memiliki skala yang sama, yaitu dengan metode *Min-Max Scaling* dan metode *Standardization* [23]. Pada penelitian ini hanya digunakan penskalaan fitur metode *Min-Max Scaling*. Penskalaan min-maks (*Min-Max Scaling*) bertujuan untuk meningkatkan kinerja JST menjadi optimal dengan menyamakan rentang nilai dan besar satuan dari



setiap variabel (berupa rentang nilai dari 0 hingga 1). Masing-masing variabel diubah menjadi skala satuan dengan melakukan transformasi data secara statistik. Data dari setiap variabel akan dikurangi dengan nilai minimum variabel tersebut yang kemudian dibagi oleh selisih dari nilai maksimum dan nilai minimum variabel tersebut. Secara lengkap dapat dituliskan pada Persamaan 3.23.

$$z = \frac{x_i - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (3.23)$$

### III.3.2.2. Evaluasi Kinerja Model JST

Dalam mengevaluasi model JST untuk permasalahan regresi terdapat beberapa evaluasi kinerja seperti *mean absolute error* (MAE) dan *mean squared error* (MSE). Perhitungan evaluasi kinerja tersebut didefinisikan sebagai berikut:

$$MAE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |y^i - T^i| \quad (3.24)$$

$$MSE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y^i - T^i)^2 \quad (3.25)$$

di mana:

$y$  = nilai prediksi model

$T$  = nilai data target

Pada umumnya, MSE digunakan untuk mengevaluasi kinerja arsitektur model JST. Nilai MSE jauh lebih sensitif dibandingkan nilai MAE dalam menunjukan galat prediksi model. Hal itu dikarenakan MSE mampu menunjukkan galat yang diakibatkan oleh adanya penyimpangan (standar deviasi) dan akibat adanya data *outliers*. Dengan demikian, MSE biasa digunakan dalam proses pelatihan model dan penentuan rancangan model JST. Kemudian, MAE dapat digunakan untuk melakukan padanan

galat prediksi model dengan besaran fisis aslinya. Nilai MAE dapat dijadikan tolak ukur kelayakan akhir suatu model JST. Toleransi MAE bergantung kepada besaran fisis dari variabel yang sedang diteliti. [23]

#### III.4. Kontrol Jaringan Saraf Tiruan

Untuk mengendalikan lingkungan termal, pada umumnya digunakan sistem kontrol modern (*modern control system*). Hal ini didasarkan pada karakteristik lingkungan termal yang memiliki sifat MIMO (*multiple input multiple output*). Dengan demikian, sistem kontrol klasik tidak tepat digunakan untuk sistem *climate chamber*.

**Tabel 3.1.** Perbandingan metode kontrol

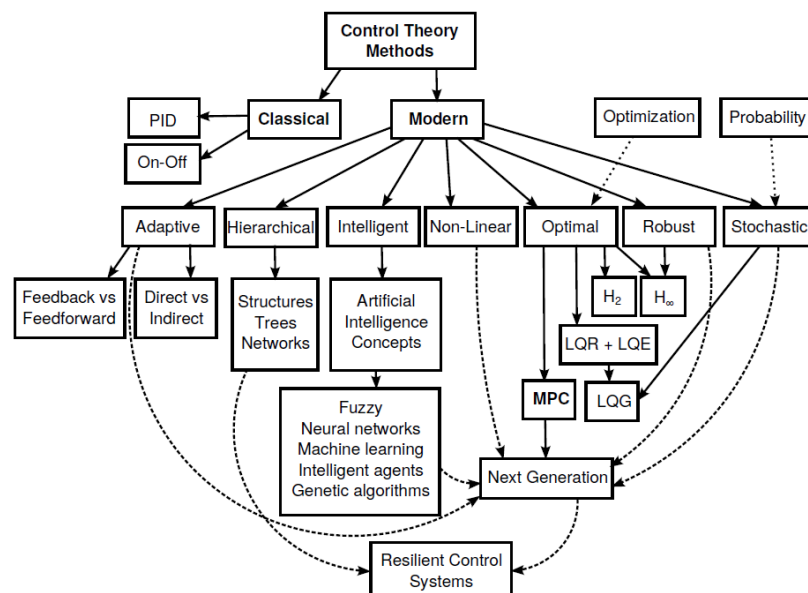
Metode kontrol	Klasik	Modern
Domain	Frekuensi, Domain-S	Waktu, Domain-t
Representasi Model	Fungsi Transfer	State-Space
Kontinuitas	Kontinyu	Kontinyu, Diskrit, <i>Hybrid</i>
Linieritas	Linier	Linier, Nonlinier
Variansi waktu	<i>Time-invariant</i> (TI)	<i>Time-variant</i> (TV)
Dimensi	SISO	MIMO
Determinisme	Deterministik	Deterministik, Stokastik
Optimisasi	Tidak	Ya
Batasan	Tidak	Ya
Implementasi	Murah, Mudah	Mahal, Kompleks

Pada umumnya, metode kontrol klasik menggunakan perubahan domain dinamika sistem yang digambarkan oleh Persamaan Diferensial Ordiner (PDE) untuk menghindari kompleksitas dari solusi PDE domain waktu. PDE dinamika sistem diubah dari domain waktu ke dalam domain frekuensi menggunakan transformasi Fourier atau secara umum menggunakan transformasi Laplace untuk domain frekuensi bilangan kompleks (domain-s), yang ekuivalen dengan transformasi Z untuk waktu diskret. Pada metode kontrol modern, alih-alih mengubah domain lebih baik meng-

gunakan konversi persamaan diferensial orde tinggi ke dalam persamaan orde 1 domain waktu yang disebut sebagai persamaan keadaan. Selain itu, representasi langsung dan penanganan sistem multi-input multi-output (MIMO) diperbolehkan dengan menggunakan representasi model fungsi keadaan. [4]

Kelemahan utama dari kontrol klasik adalah bahwa kontrol ini hanya dapat digunakan untuk mengendalikan sistem *single-input single-output* (SISO), dengan persyaratan pada model sistem untuk menjadi *linear time-invariant* (LTI). Metode klasik memberikan hasil yang memuaskan hanya dalam mengendalikan proses sederhana, tetapi hasil yang tidak memuaskan dalam kontrol sistem yang lebih kompleks. [4]

Pada dasarnya ada banyak sekali metode kontrol yang merupakan bagian dari metode kontrol modern. Metode-metode tersebut dapat dikelompokkan menjadi beberapa sub kategori. Kategori-kategori tersebut digambarkan dalam bentuk gambar taksonomi pada Gambar 3.8. Berdasarkan taksonomi yang digambarkan pada Gambar 3.8, dapat dilihat bahwa Jaringan Saraf Tiruan (*Neural networks*) merupakan salah satu metode kontrol modern.



**Gambar 3.8.** Taksonomi metode kontrol klasik vs modern [4]

## BAB IV

### PELAKSANAAN PENELITIAN

#### IV.1. Alat dan Bahan Penelitian

Penelitian ini tidak dapat dilakukan tanpa adanya alat dan bahan yang memudahkan proses pelaksanaan penelitian. Alat dan bahan yang digunakan dijabarkan secara rinci pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2.

**Tabel 4.1.** Daftar alat dan bahan

No.	Nama alat/bahan	Fungsi
1	ASUS N550JX	Perangkat komputer
2	<i>Climate chamber</i>	Objek penelitian
3	IES-VE 2019	Perangkat lunak untuk pengambilan data lingkungan termal <i>climate chamber</i> dan variasi gangguan
4	MS Excel 365	Perangkat lunak pengolahan data tabular
5	MATLAB R2018a	Perangkat lunak pemrograman dalam merancang jaringan saraf tiruan untuk kontroler.
6	SIMULINK	Perangkat lunak untuk mewujudkan simulasi sistem kontrol.

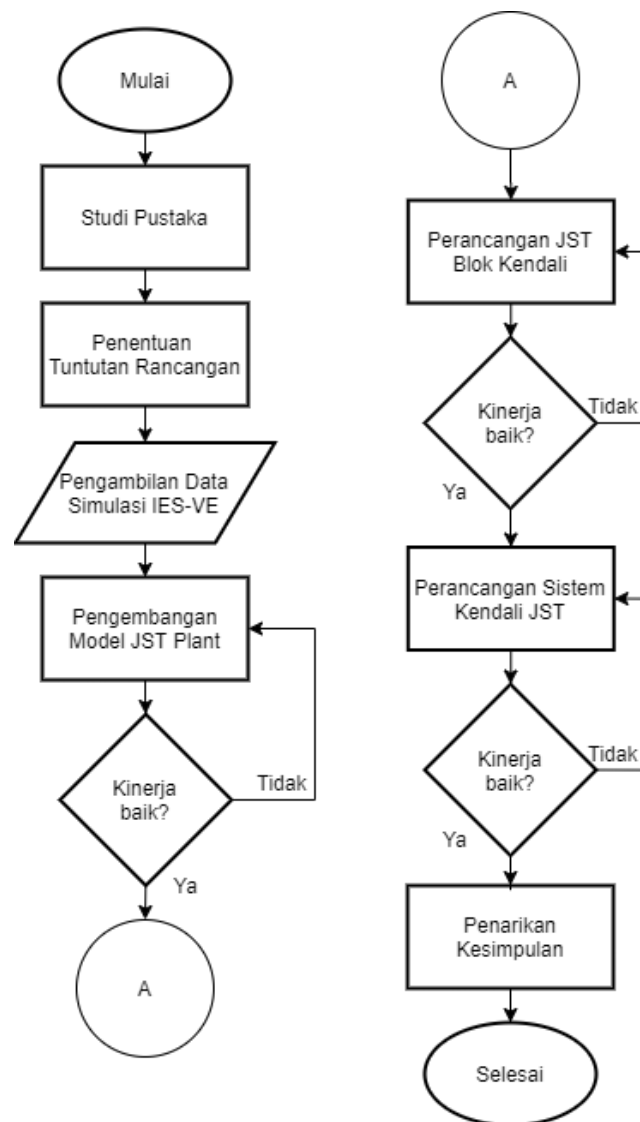
**Tabel 4.2.** Spesifikasi laptop ASUS N550JX

No.	Komponen	Spesifikasi
1	<i>Processor</i>	Intel Core i7-4720HQ CPU @ 2.60GHz x 8
2	<i>Graphics</i>	Intel Haswell Mobile
3	RAM	8 GB
4	Tipe sistem operasi	64-bit
5	Sistem operasi	Windows 10 Home Single Language

*Climate chamber* memiliki fungsi sebagai prasarana uji eksperimental pada penelitian yang menggunakan variabel lingkungan termal. Salah satu penelitian yang menggunakan *climate chamber* yaitu penelitian mengenai kenyamanan termal.

#### IV.2. Tata Laksana Penelitian

Alur penelitian yang digunakan dalam mencapai tujuan dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut.



**Gambar 4.1.** Bagan Tata Laksana Penelitian

#### IV.2.1. Studi Pustaka

Studi pustaka bertujuan untuk mendapatkan pemahaman dalam penyelesaian masalah yang diangkat dalam penelitian ini. Studi pustaka juga membantu menegaskan tujuan penelitian sehingga penulis mampu mengetahui perbedaan penelitian ini dengan penelitian terkait yang telah dilakukan sebelumnya. Dari studi pustaka yang telah dilakukan maka akan memperjelas tuntutan perancangan dari sistem yang akan dibuat. Informasi yang digunakan bersumber dari berbagai artikel ilmiah, jurnal, skripsi, buku, dan/atau sumber tertulis lainnya yang membahas mengenai sistem kontrol lingkungan termal dan/atau jaringan saraf tiruan.

#### IV.2.2. Penentuan Tuntutan Rancangan

Tuntutan rancangan Tugas Akhir ini yaitu kontroler mampu mengendalikan *plant* pada skenario penggunaan *climate chamber* dengan galat suhu kurang dari  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  dan galat kelembapan relatif kurang dari  $\pm 10\%$ .

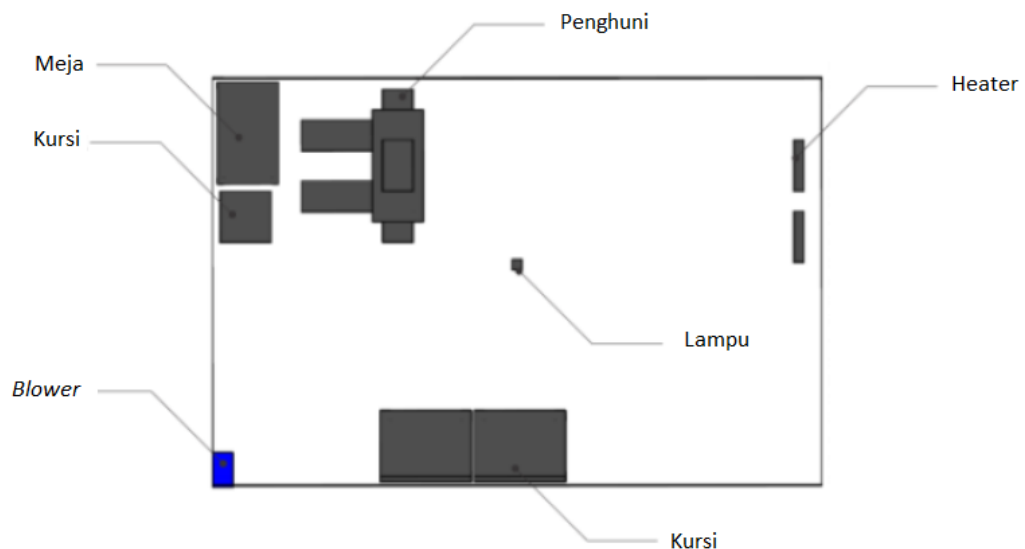
#### IV.2.3. Pengambilan Data Simulasi IES-VE

Pada penelitian ini, digunakan model IES-VE untuk melakukan proses simulasi lingkungan termal. Bersamaan dengan penelitian Hartanto [24], data bersumber dari model yang telah dibuat pada penelitian sebelumnya berjudul "Karakterisasi Lingkungan Termal Chamber Iklim Menggunakan Metode Simulasi CFD dengan Perangkat Lunak IES-VE" yang diteliti oleh Kurniawan [1]. Data tersebut merupakan hasil simulasi pada *software* IES-VE dengan menerapkan beberapa variasi kondisi lingkungan pada model *climate chamber*. Variasi tersebut yaitu kondisi batas lingkungan (radiasi matahari dan suhu bola kering luar/*outdoor dry bulb temperature*), kondisi AC, dan kondisi *heater*. Variasi kondisi batas lingkungan tersebut diwujudkan-

an dalam pembagian 4 musim dalam 1 tahun, yakni bulan Maret, Juni, September dan Desember. Keluaran dari model IES-VE berupa nilai suhu ruang (*air temperature*) *chamber* dan kelembapan relatif (RH) *chamber*. Dari model tersebut didapatkan nilai MAE perhitungan selisih variabel lingkungan termal hasil simulasi dan pengukuran lapangan sebesar  $0,8 \pm 0,7^{\circ}\text{C}$  untuk suhu udara ruang dan  $2,5 \pm 3,8\%$  untuk kelembapan relatif [1]. Data yang sudah terkumpul disajikan dalam bentuk tabular dan diolah dengan menggunakan komputer.

### Kondisi *Climate Chamber*

*Climate chamber* memiliki ukuran panjang  $\times$  lebar  $\times$  tinggi = 3 m  $\times$  2 m  $\times$  3 m. Komponen-komponen di dalam *climate chamber* terdiri dari meja, kursi, *blower*, penghuni, lampu, *heater*, dan AC. Posisi setiap komponen di dalam *climate chamber* digambarkan pada Gambar 4.2.



**Gambar 4.2.** Posisi Komponen-Komponen di dalam *Climate Chamber*

Perangkat AC yang berada di dalam *climate chamber* DTNTF FT-UGM memiliki daya sebesar 2800W (1 PK). Perangkat AC mampu mengkondisikan lingkungan melalui aliran udara yang keluar. Oleh karena itu, Perangkat AC sangatlah berpengaruh terhadap kondisi lingkungan termal di dalam ruangan. Penampakan wujud perangkat AC dapat dilihat pada Gambar 4.3



**Gambar 4.3.** Perangkat AC

Perangkat pemanas (*heater*) yang berada di dalam *climate chamber* memiliki daya sebesar 900W. Terdapat dua buah perangkat pemanas di dalam *climate chamber*. Semakin banyak perangkat pemanas yang aktif maka suhu ruang akan menjadi semakin meningkat. Kenaikan rerata suhu ruang yaitu sebesar  $\pm 1,9^{\circ}\text{C}$  untuk setiap perangkat pemanas. Penampakan wujud *heater* dapat dilihat pada Gambar 4.4.



**Gambar 4.4.** Perangkat Heater

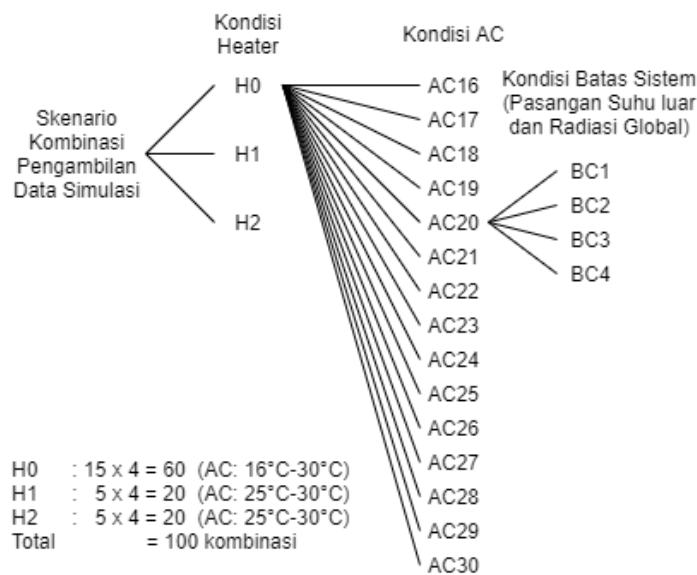
Selain faktor di dalam *climate chamber*, faktor dari luar ruangan pun secara tidak langsung mempengaruhi kondisi lingkungan termal *climate chamber*, di antaranya adalah suhu lingkungan (*dry bulb temperature*) dan intensitas radiasi matahari. Posisi harian matahari mempengaruhi perubahan nilai suhu lingkungan dan intensitas



radiasi matahari. Pada siang hari (posisi *altitude* matahari ketika berada tepat di atas *climate chamber*) memberikan paparan radiasi matahari yang mengenai selubung bangunan. Hal ini menyebabkan kenaikan suhu di dalam *climate chamber*.

### Rancangan Skenario Pengambilan Data

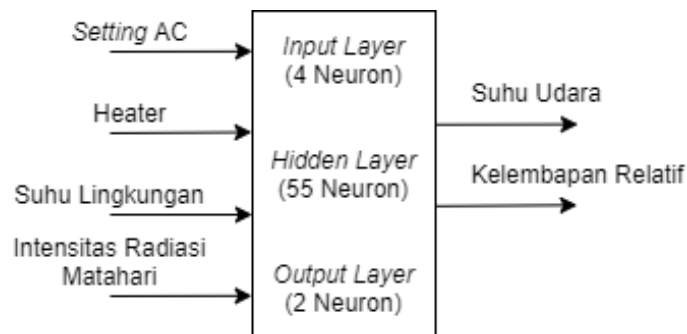
Rancangan skenario pada *climate chamber* menghasilkan kombinasi antara perangkat AC dan jumlah *heater* dalam kondisi ON. Perangkat AC dikondisikan untuk menyala dari pukul 08:00 sampai dengan pukul 17:00 WIB bervariasi dengan rentang nilai 16°C - 30°C dengan lompatan 1°C. Jumlah *heater* dalam kondisi ON terbagi menjadi 3 kondisi, yaitu keduanya tidak menyala (berkode 0), salah satu menyala (berkode 1), dan keduanya menyala (berkode 2). Kombinasi tersebut menghasilkan 25 variasi skenario. Untuk variasi suhu lingkungan dan intensitas radiasi matahari digunakan 4 titik ekstrim bumi terhadap matahari yaitu pada tanggal 21 Maret, 21 Juni, 23 September dan 22 Desember. Kemudian dilakukan simulasi pada setiap titik tersebut dengan kombinasi pada Gambar 4.5. Dengan demikian, total skenario yang dihasilkan dari kombinasi tersebut berjumlah 100 skenario.



**Gambar 4.5.** Skenario Pengambilan Data

#### IV.2.4. Model Plant JST

Model *plant* pada penelitian ini menggunakan model JST yang telah dibangun oleh Hartanto pada [24]. Arsitektur Model Plant JST digambarkan pada Gambar 4.6. Model plant yang digunakan memiliki nilai MAE perhitungan antara target dan prediksi sebesar 0,59°C untuk suhu ruang dan 5,44% untuk kelembapan relatif. Akurasi JST sebesar 96,23% untuk suhu ruang dan 68,90% untuk kelembapan relatif. Keseluruhan nilai *hyperparameter* model JST yang dirangkum pada Tabel 4.3.



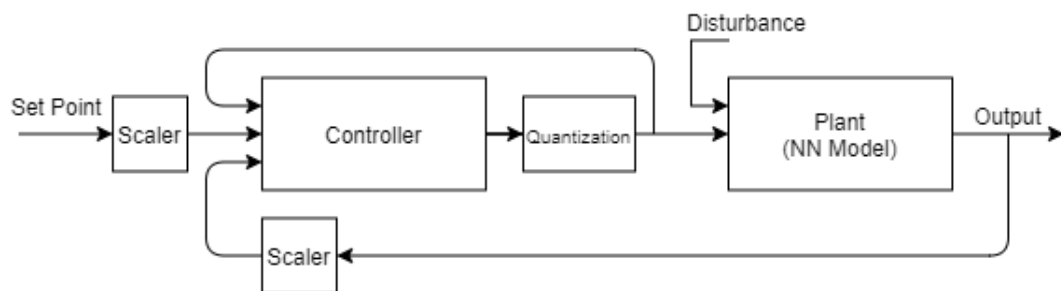
**Gambar 4.6.** Arsitektur Model Plant JST

**Tabel 4.3.** Tabel Rancangan Model Plant JST

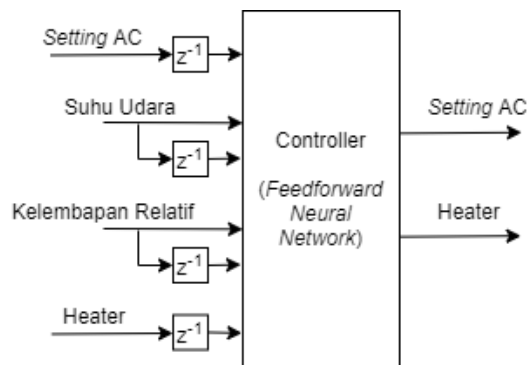
Nama Hyperparameter	Nilai Hyperparameter
Arsitektur	Feedforward Neural Network
Pembagian Data	50% 25% 25%
Jumlah Layer Tersembunyi	1
Jumlah Neuron pada Layer	[55]
Fungsi Aktivasi Layer	Hyperbolic Tangent
Algoritma Pembelajaran	Levenberg-Marquardt
Mean Absolute Error (MAE)	$T_{db}$ : 0,59°C ; RH: 5,44%
Mean Squared Error (MSE)	$T_{db}$ : 0,75°C ; RH: 52,33%
Koefisien Korelasi (R)	$T_{db}$ : 96,23% ; RH: 68,90%

#### IV.2.5. Perancangan Kontrol berbasis JST

Dalam melakukan pemodelan kontrol, pertama-tama didefinisikan terlebih dahulu pasangan data masukan dan keluaran dari sistem kendali. Pasangan data masukan dan keluaran tersebut didapatkan dengan memperhatikan diagram blok sistem pengendalian yang ditunjukkan pada Gambar 4.7. Nilai pasangan masukan dan keluaran kontrol ditunjukkan pada Gambar 4.8.



**Gambar 4.7.** Diagram blok sistem kontrol berbasis JST [5]



**Gambar 4.8.** Pasangan masukan dan keluaran model JST kontroler

Kontroler dibangun dari model JST dengan menggunakan prinsip model invers dari model *plant*. Perancangan JST untuk kontroler menggunakan *delay* umpan balik AC, *delay* umpan balik heater, output *plant* dan *delay* output *plant* sebagai masukan untuk pelatihan JST. Kemudian, pasangan data AC dan heater digunakan sebagai pasangan data keluaran (data target) untuk pelatihan JST. Arsitektur JST kontroler dibangun dengan menggunakan *feedforward neural network* atau biasa

disebut juga sebagai *multilayer perceptron* (MLP). Model JST akan dilatih menggunakan data hasil simulai IES-VE yang telah digunakan pula dalam pemodelan *plant* oleh Hartanto [24]. Pada proses pelatihan JST, dilakukan penskalaan terhadap semua input JST menggunakan metode *Min Max Scaling* kecuali variabel *delay* umpan masuk AC dan *heater*. Penskalaan bertujuan untuk meningkatkan kinerja JST menjadi optimal dengan menyamakan rentang nilai dan besar satuan dari setiap variabel (berupa rentang nilai dari 0 hingga 1).

Perancangan model JST kontroler dilakukan dengan membandingkan variasi pembagian data latih, data validasi, dan data uji. Kemudian akan divariasikan pula fungsi aktivasi dan jumlah neuron untuk memperoleh model JST yang optimal. Evaluasi kinerja model JST kontroler menggunakan perbandingan nilai MSE pada setiap rancangan. Rancangan model JST dengan nilai MSE terkecil akan digunakan sebagai model kontroler.

#### **IV.2.6. Penarikan Kesimpulan**

Penarikan kesimpulan didapatkan berdasarkan hasil rancangan kontroler dengan kinerja dari model jaringan saraf tiruan di dalamnya. Kesimpulan menggambarkan bagaimana rancangan kontroler dapat digunakan pada *climate chamber*.

#### **IV.3. Rencana Analisis Hasil Penelitian**

Kinerja model JST akan dievaluasi berdasarkan nilai MAE (*Mean Absolute Error*) dan R (koefisien korelasi) dari rancangan tersebut. Kinerja dari kontroler akan dievaluasi berdasarkan nilai rerata galat (*steady-state error*) untuk suhu ruang dan kelembapan relatif.

## BAB V

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem bangunan yang dijadikan objek penelitian adalah *climate chamber* DTNTF FT-UGM. Dalam bab ini, akan dibahas mengenai hasil perancangan kontroler sesuai dengan langkah-langkah yang dijelaskan pada Bab IV.

#### V.1. Identifikasi Sistem

Pada penelitian [1], Kurniawan melakukan karakterisasi lingkungan termal dengan pendekatan numerik yaitu menggunakan pendekatan numerik melalui simulasi CFD. Metode yang digunakan Kurniawan yaitu dengan melakukan pemodelan kawasan *climate chamber* dengan menggunakan piranti lunak IES-VE. Model yang dibangun Kurniawan divalidasi dengan hasil pengukuran di 4 titik *climate chamber*. Model yang dibangun digunakan untuk memprediksi karakter lingkungan termal *climate chamber* dengan memvariasikan berbagai skenario gangguan. Model IES-VE yang dibangun Kurniawan dapat mewakili variabel lingkungan termal meliputi variabel suhu dengan selisih  $0,8 \pm 0,7^{\circ}\text{C}$ , variabel kelembapan relatif dengan selisih  $2,5 \pm 3,8\%$ , serta variabel kecepatan udara dengan selisih  $0,056 \pm 0,004 \text{ m/s}$ . Perangkat yang paling mempengaruhi *climate chamber* merupakan perangkat AC dan *heater*. AC menyebabkan perubahan suhu sesuai *set point*. *Heater* menyebabkan perubahan suhu hingga  $3,2^{\circ}\text{C}$ /perangkat dan kelembapan relatif  $3,5\%$ /perangkat. Manipulasi dari AC berpengaruh besar pada variabel kecepatan udara yang menyebabkan perubahan kecepatan udara sebesar  $0,9 \text{ m/s}$ .

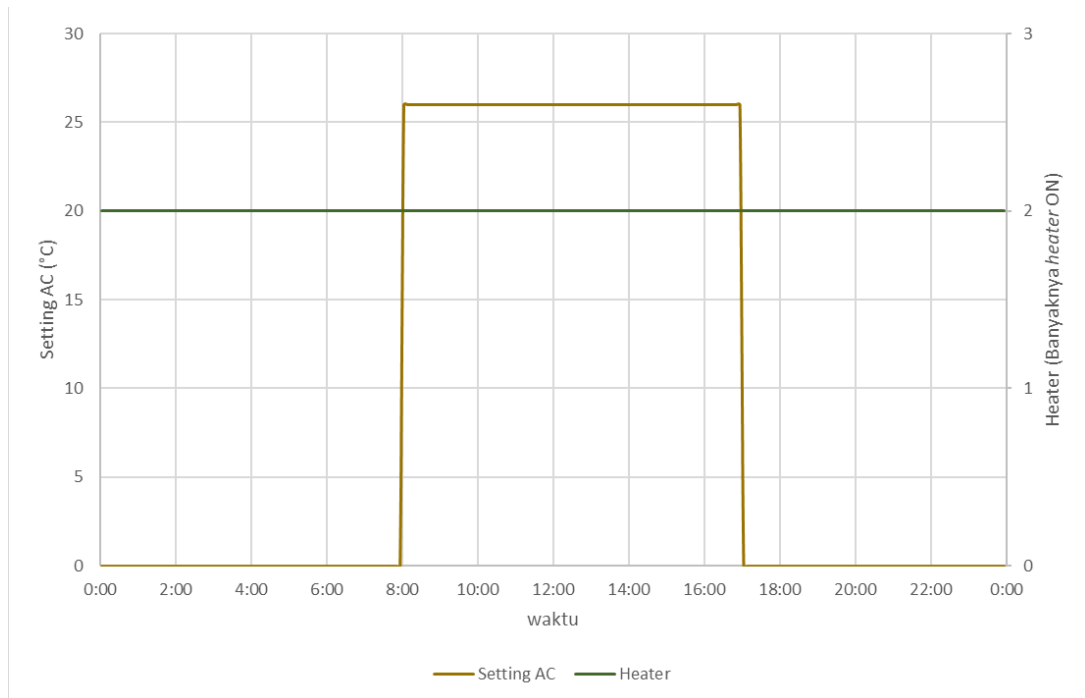
Pada penelitian Hartanto [24], model IES-VE yang telah dibangun Kurniawan digunakan untuk memperoleh data lingkungan termal. Sampel data yang digunakan sebanyak 24.000 data. Data tersebut digunakan untuk membangun model *plant* ling-

kungan termal sistem *climate chamber* menggunakan jaringan saraf tiruan. Jaringan dengan model terpilih menghasilkan MAE antara target dengan prediksi suhu sebesar  $0,59^{\circ}\text{C}$ . Sedangkan antara target dan prediksi kelembapan relatif sebesar 5,44%. Akurasi jaringan terpilih sebesar 96,23% untuk suhu udara dan 68,90% untuk kelembapan relatif.

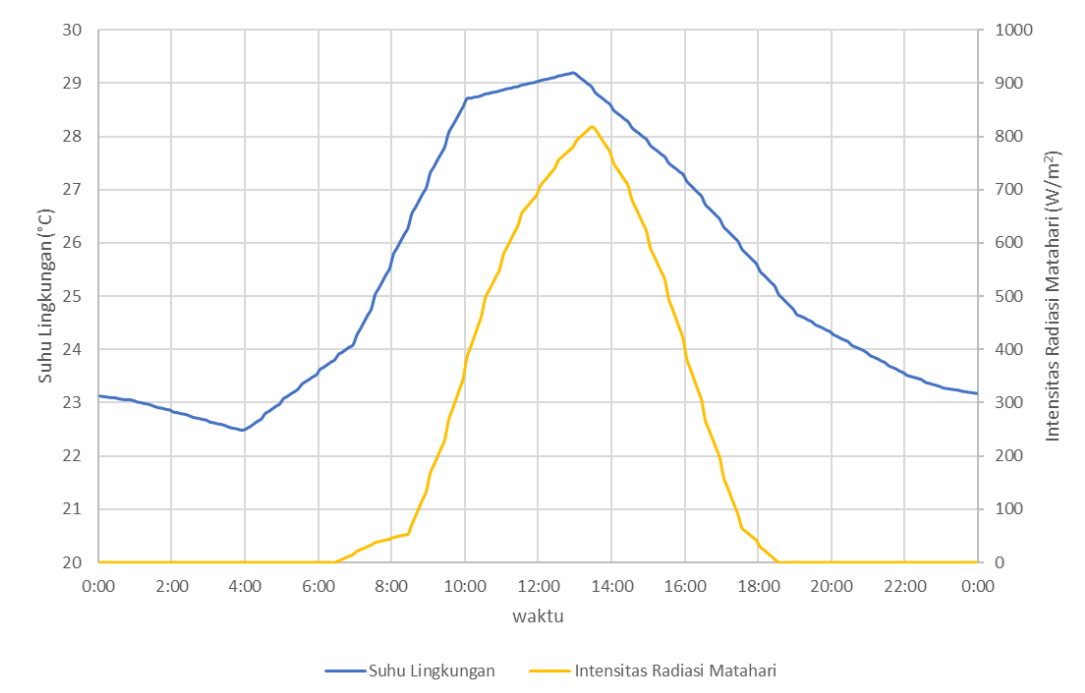
Pada penelitian ini, digunakan model IES-VE yang dibangun Kurniawan untuk memperoleh data lingkungan termal *climate chamber* bersamaan dengan Hartanto. Kemudian, model yang dibangun Hartanto digunakan dalam penelitian ini sebagai model *plant* dalam proses simulasi.

#### **V.1.1. Pengambilan Data Simulasi IES-VE**

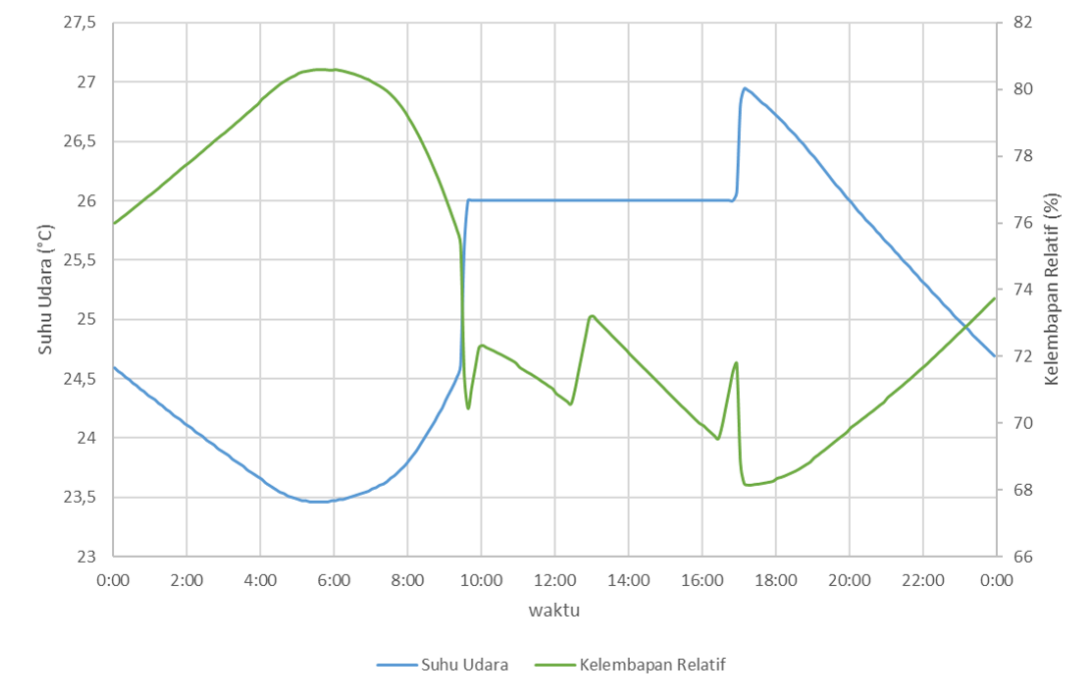
Pada Gambar 5.3 ditunjukkan salah satu hasil simulasi untuk skenario AC  $26^{\circ}\text{C}$  dan *heater* ON 2 buah dengan variabel gangguan yang digambarkan pada Gambar 5.2. Grafik yang ditampilkan terdiri dari 4 parameter yaitu suhu lingkungan ( $T_o$ ), intensitas radiasi matahari (RD), suhu ruang ( $T_{db}$ ), dan kelembapan relatif (RH). Skenario ini dilakukan selama 24 jam dengan selang waktu pengambilan data selama 6 menit dimulai dari pukul 00:03 hingga 23:57 WIB. Selang waktu tersebut adalah waktu tersingkat yang dapat dilakukan pada software IES-VE 2019. Respon waktu suhu ruang terhadap aktivasi AC tidak diperhitungkan dikarenakan secara fisis, respons transien termal pada bangunan berlangsung cukup lama, sehingga hanya berfokus untuk meninjau nilai *steady-state error*.



**Gambar 5.1.** Data Konfigurasi AC dan *Heater* pada Simulasi ISE-VE



**Gambar 5.2.** Variabel Gangguan Simulasi ISE-VE



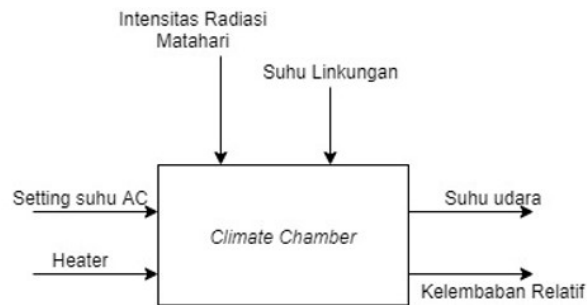
**Gambar 5.3.** Data Hasil Simulasi ISE-VE

### V.1.2. Identifikasi Sistem Pengendalian

Dalam perancangan sistem kendali, perlu diidentifikasi terlebih dahulu variabel-variabel yang terlibat pada suatu sistem. Terdapat beberapa variabel yang terlibat pada sistem *climate chamber*. Variabel-variabel yang diangkat pada penelitian ini tunjukkan oleh diagram blok *plant* pada Gambar 5.4. Berdasarkan diagram tersebut, dapat dikatakan bahwa sistem merupakan sistem MIMO (*Multi Input Multi Output*) yaitu sistem yang memiliki beberapa masukan dan beberapa keluaran. Identifikasi sistem yang telah dilakukan akan menghasilkan suatu diagram blok fungsional sistem seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.5.

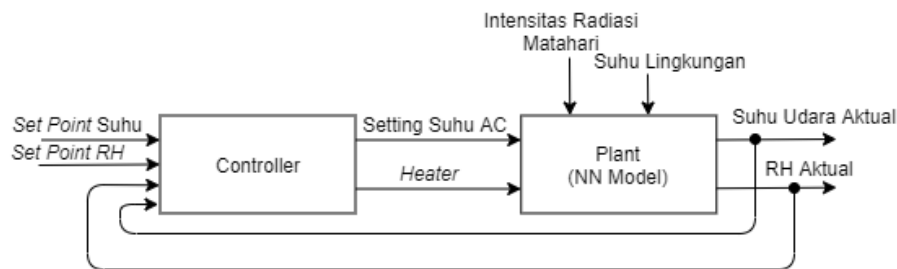
Dalam sistem *climate chamber*, variabel manipulasi yang digunakan adalah *setting* suhu AC dan *heater* (jumlah *heater* ON). Kemudian, variabel kontrol yang digunakan yaitu suhu udara ( $T_{db}$ ) dan kelembapan relatif (RH) pada *plant* (*climate chamber*). Ada pula variabel gangguan sistem yaitu berupa intensitas radiasi mata-





**Gambar 5.4.** Diagram Blok *Plant*

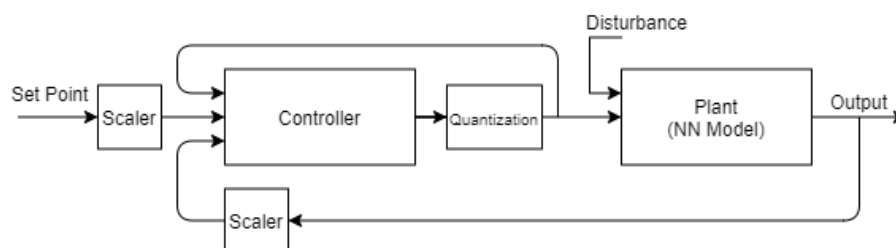
hari dan suhu lingkungan. Perubahan suhu oleh AC hanya mampu bekerja dengan kenaikan nilai sebesar  $1^{\circ}\text{C}$ . Dengan memperhatikan *manipulator (final control elements)* yang digunakan, secara fisis RH tidaklah mungkin dapat dikendalikan oleh kontroler. Perubahan nilai RH yang terjadi diakibatkan oleh pengaruh AC secara tidak langsung. Untuk pengujian *set point*, skenario pengujian mengadaptasi Tugas Akhir pengujian level sensasi termal yang dilakukan oleh Nadiya[10]. Hanya saja pada penelitian menggunakan *set point* step bertingkat dengan lompatan  $2^{\circ}\text{C}$  dari nilai suhu sebesar  $16^{\circ}\text{C}$  hingga  $30^{\circ}\text{C}$ .



**Gambar 5.5.** Diagram Blok Fungsional Sistem

Kontroler pada *climate chamber* memiliki enam buah variabel masukan dan dua buah variabel keluaran. Variabel masukan kendali ini yaitu nilai *set point* suhu udara, *set point* kelembapan relatif, nilai aktual umpan balik suhu udara, nilai aktual umpan balik kelembapan relatif, nilai umpan balik *setting* suhu AC, dan nilai umpan balik *heater*. Sementara, variabel keluaran kontroler ini adalah *setting* suhu AC dan *heater* (jumlah *heater* ON).

Untuk memaksimalkan kinerja kontroler, pada proses pelatihan JST (kontroler) dilakukan penskalaan terhadap semua variabel masukan JST menggunakan metode *Min Max Scaling* kecuali variabel umpan balik *setting* suhu AC dan variabel umpan balik *heater*. Penskalaan bertujuan untuk meningkatkan kinerja JST menjadi optimal dengan menyamakan rentang nilai dan besar satuan dari setiap variabel (berupa rentang nilai dari 0 hingga 1). Masing-masing variabel diubah menjadi skala satuan dengan melakukan transformasi data secara statistik. Data dari setiap variabel akan dikurangi dengan nilai minimum variabel tersebut yang dikemudian dibagi oleh selisih dari nilai maksimum dan nilai minimum variabel tersebut. Dengan demikian, ditambahkan pula blok *scaler* pada diagram blok sistem kontrol agar nilai masukan kontroler dapat disesuaikan.



**Gambar 5.6.** Diagram blok sistem kontrol berbasis JST

Diagram blok sistem kontrol juga memiliki blok tambahan berupa blok kuantisasi (*Quantization*). Blok ini berperan sebagai penyesuai nilai variabel manipulasi yang dihasilkan kontroler. Hal ini dilakukan karena pada praktiknya nilai *setting* suhu AC merupakan nilai bilangan bulat dan bukan nilai bilangan desimal. Hal ini pun berlaku untuk variabel manipulasi *heater* di mana nilainya berupa nilai 0, 1, atau 2 yang menunjukkan jumlah *heater* ON/menyalakan. Sehingga tidak mungkin ada nilai diantara nilai tersebut. Dengan demikian, diagram blok dipasang sebuah blok kuantisasi (*Quantization*) yang berfungsi untuk menghindari nilai desimal atau pun nilai yang berada di luar rentang nilai variabel manipulasi. Pada akhirnya dihasilkan diagram

blok sistem kontrol yang ditunjukkan pada Gambar 5.6.

## V.2. Rancangan Kontrol berbasis JST

Model JST kontroler dibangun dengan menggunakan model jaringan saraf tiruan arsitektur *feedforward neural network* dengan 1 lapisan tersembunyi. Pada Sub Bab ini akan dijabarkan hasil dari proses perancangan model JST untuk kontroler.

### V.2.1. Variasi Pembagian Data Perancangan JST Kontroler

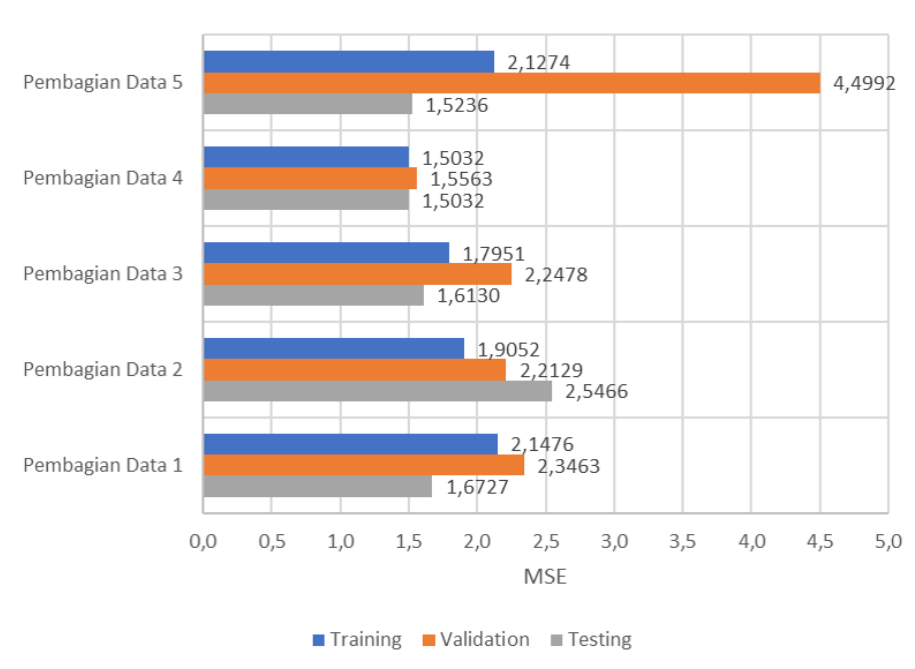
Dalam memvariasikan pembagian data digunakan metode *trial-and-error* berdasarkan artikel [25]. Pada penelitian ini, variasi pembagian data dilakukan dengan membandingkan beberapa variasi pembagian data ke dalam 5 variasi. Kemudian kinerja dari setiap pembagian data dibandingkan dengan konfigurasi *hyperparameter* pada Tabel 5.1.

**Tabel 5.1.** Tabel Daftar Variasi Pembagian Data

Pembagian Data	Persentase Data
Pembagian Data 1	(50% 25% 25%)
Pembagian Data 2	(60% 20% 20%)
Pembagian Data 3	(70% 15% 15%)
Pembagian Data 4	(80% 10% 10%)
Pembagian Data 5	(80% 15% 05%)

Model JST untuk membandingkan variasi pembagian data menggunakan arsitektur *feedforward network* dengan 1 lapisan tersembunyi berisi 10 neuron. Pada tabel yang disajikan, pembagian data ditulis dengan format "Pembagian Data n" dan "(x% y% z%)" di mana n = nomor variasi, x = pembagian data pelatihan, y = pembagian data validasi, dan z = pembagian data pengujian. Berdasarkan hasil variasi yang ditunjukkan pada Gambar 5.7, didapatkan pembagian data terbaik yaitu pembagian data bernama "Pembagian Data 4". Data dibagi menjadi 3 bagian, yakni 80% data

pelatihan, 10% data validasi, dan 10% data pengujian.

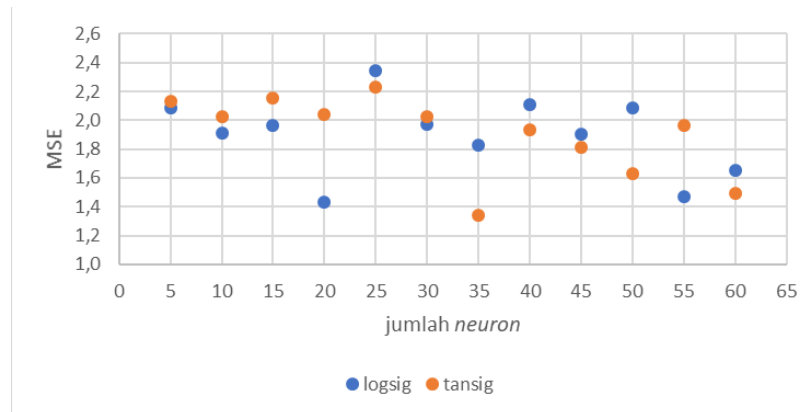


**Gambar 5.7.** Grafik Variasi Pembagian Data

## V.2.2. Variasi Arsitektur Perancangan JST Kontroler

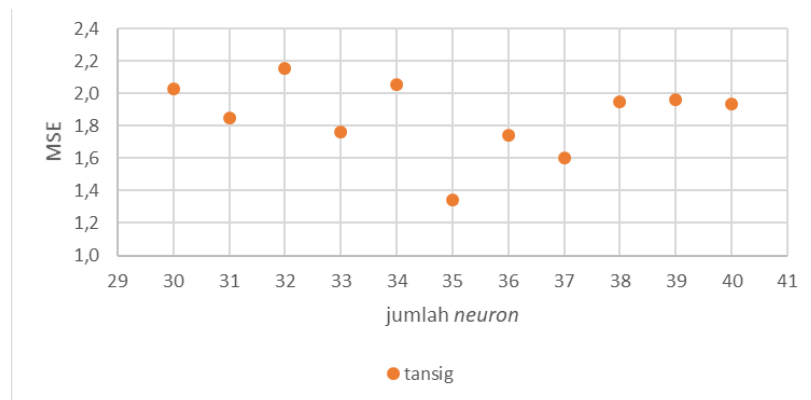
Pada perancangan model JST kontroler digunakan 2 variasi fungsi aktivasi, yaitu fungsi tansig (fungsi *hyperbolic tangent*) dan fungsi logsig (fungsi sigmoid). Kemudian masing-masing dilatih dengan jumlah neuron yang bervariasi dari 5 neuron hingga 60 neuron dengan lompatan sebesar 5 neuron. Dari proses variasi ini, didapatkan hasil bahwa model yang menggunakan fungsi aktivasi tansig dengan 35 neuron menghasilkan kinerja dengan nilai MSE terkecil. Hasil dari variasi ini ditunjukkan pada Gambar 5.8.

Kemudian arsitektur JST divariasikan kembali menggunakan fungsi aktivasi tansig dari 30 neuron hingga 40 neuron dengan lompatan sebesar 1 neuron untuk mengetahui kinerja model pada jumlah neuron yang berdekatan. Setelah dilakukan variasi, didapatkan hasil bahwa model JST dengan 35 neuron masih merupakan mo-



**Gambar 5.8.** Grafik Persebaran MSE Variasi Arsitektur JST Kontroler

del arsitektur terbaik dengan nilai MSE terkecil. Hasil variasi ini dapat dilihat pada Gambar 5.9.



**Gambar 5.9.** Grafik Persebaran MSE Variasi Arsitektur JST Kontroler

### V.2.3. Hasil Rancangan Model JST Kontroler

Setelah dilakukan perancangan model JST melalui variasi arsitektur model, didapatkan rancangan model JST kontroler terbaik. Model JST dibangun dengan arsitektur *feedforward neural network* 1 lapisan tersembunyi dengan 35 neuron. Model JST menggunakan fungsi aktivasi tansig (*hyperbolic tanget*) dan algoritma pembelajaran Levenberg-Marquardt. Model JST Kontroler terbaik memiliki nilai *hyperparameter* yang diringkas pada Tabel 5.2.

**Tabel 5.2.** Tabel Rancangan Kontroler JST (*NN Inverse Model*)

Nama Hyperparameter	Nilai Hyperparameter
Arsitektur	Feedforward Neural Network
Pembagian Data	80% 10% 10%
Jumlah Layer Tersembunyi	1
Jumlah Neuron pada Layer	[35]
Fungsi Aktivasi Layer	Hyperbolic Tangent (tansig)
Algoritma Pembelajaran	Levenberg-Marquardt
Mean Absolute Error (MAE)	AC: 0,37°C ; HT: 0,02 Perangkat ON
Mean Squared Error (MSE)	AC: 2,68°C ; HT: 0,01 Perangkat ON
Koefisien Korelasi (R)	AC: 99,12% ; HT: 99,65%

Model JST Kontroler memiliki nilai MAE sebesar 0,37°C di mana nilai ini di bawah 1°C. Dengan demikian, model JST dapat digunakan sebagai model kontroler. Model hasil rancangan ini kemudian diubah ke dalam bentuk blok SIMULINK dengan menggunakan perintah *gensim* yang kemudian akan dijadikan blok kontroler untuk simulasi sistem kontrol pada SIMULINK.

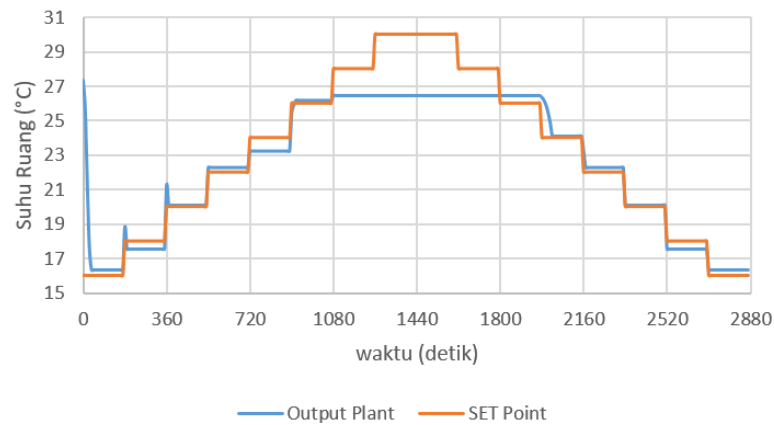
### V.3. Hasil Simulasi Kontrol SIMULINK

Pada simulasi kontrol, digunakan nilai *set point* sesuai dengan uji eksperimental level sensasi termal yang dilakukan oleh Nadiya pada *climate chamber* [10]. Perbedaannya, pada penelitian ini variasi naik turun suhu dari 16°C hingga 30°C menggunakan lompatan sebesar 2°C.

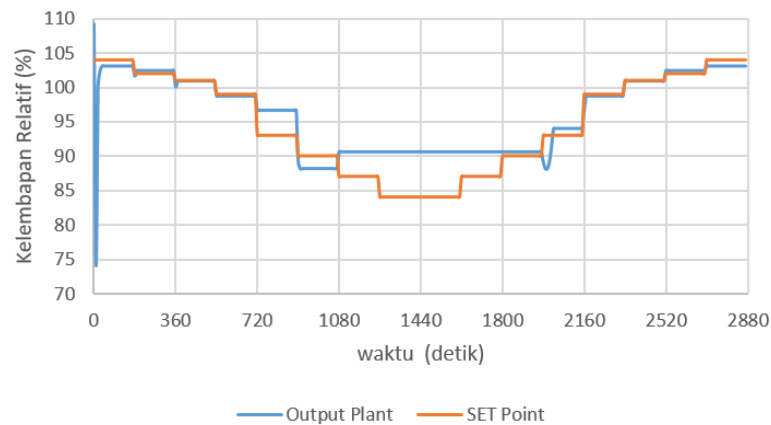
#### V.3.1. Skenario Pemanasan Pendinginan dengan Variabel Gangguan Konstan

Pada simulasi ini digunakan nilai variabel gangguan konstan sebesar 26,8°C untuk suhu lingkungan dan 423,343  $W/m^2$  untuk intensitas radiasi matahari. Nilai-nilai variabel gangguan tersebut merupakan nilai rerata dari variabel gangguan pada jam operasi penggunaan *climate chamber*, yaitu pukul 08:00 WIB sampai dengan pukul 17:00 WIB. Berdasarkan hasil simulasi, kontroler mampu mengendalikan su-

hu ruang dan kelembapan relatif mengikuti nilai *set point*. Akan tetapi, kontroler tidak mampu menaikkan suhu ruang mencapai nilai lebih dari 27°C. Hal ini terjadi disebabkan kontroler gagal dalam mengaktifkan 2 *heater* disaat nilai *setting* AC tidak mampu melebihi nilai maksimum (SET 30°C). Kombinasi *set point* dan hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 5.10 dan Gambar 5.11.

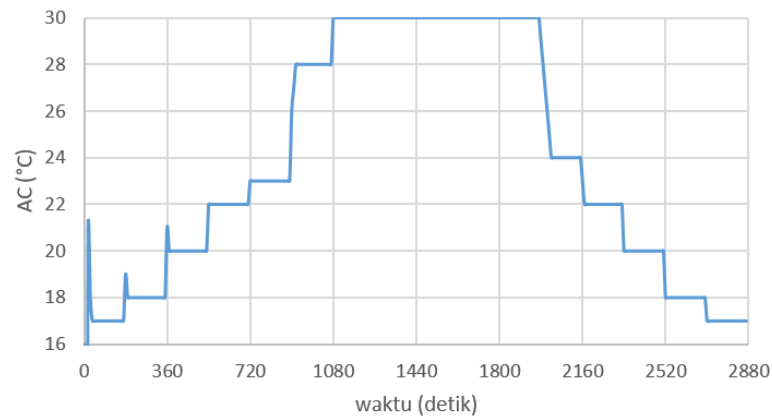


**Gambar 5.10.** Grafik Hasil Simulasi 1 Simulink untuk Suhu Ruang

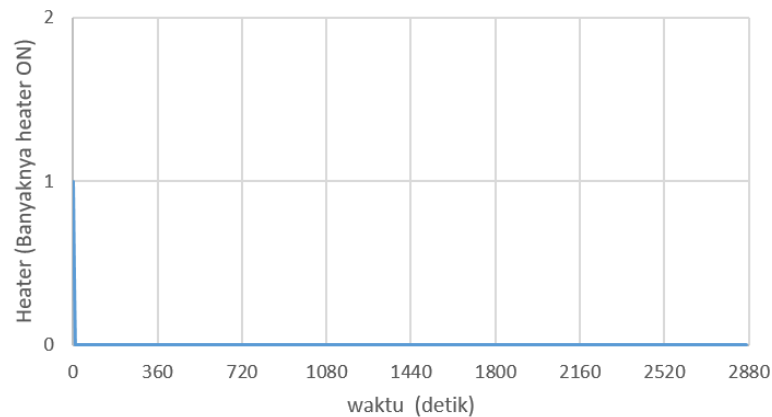


**Gambar 5.11.** Grafik Hasil Simulasi 1 Simulink untuk Kelembapan Relatif

Dengan meninjau nilai variabel manipulasi AC yang ditunjukkan pada Gambar 5.12, dapat dilihat bahwa untuk mengendalikan suhu mencapai *set point* 26°C, perangkat AC perlu mengeluarkan sinyal sebesar 28°C (waktu ke-100 hingga ke-



**Gambar 5.12.** Grafik Variabel Manipulasi AC pada Simulasi 1 Simulink



**Gambar 5.13.** Grafik Variabel Manipulasi *Heater* pada Simulasi 1 Simulink

120). Dengan demikian, ketika *set point* bernilai 28°C, perangkat AC hanya mampu mengeluarkan sinyal maksimum 30°C (waktu ke-120 hingga ke-140).

Kurangnya keandalan kinerja kontroler pada penelitian ini untuk mengendalikan suhu ruang di atas *set point* 26°C disebabkan oleh salah satu kelemahan model JST dalam pemodelan *plant*. Secara fisis, proses pemanasan pada sistem bangunan (dalam hal ini *climate chamber*) membutuhkan waktu yang cukup lama. Dengan demikian, proses pemanasan pada kenyataannya tetap bisa mencapai *set point* suhu di atas 26°C. Hanya saja proses tersebut membutuhkan waktu (*settling time*) yang cukup lama. Akan tetapi, proses tersebut tidak dapat disimulasikan secara sempurna

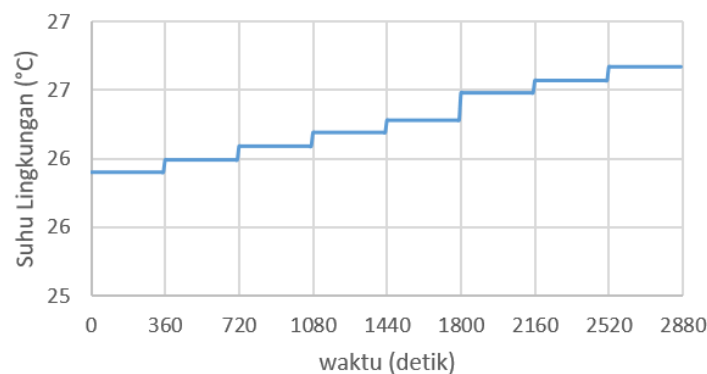


pada penelitian ini dikarenakan model JST *plant* yang dibangun oleh Hartanto[24] hanya berupa model pasangan data dan bukan berupa model yang bergantung terhadap waktu. Sehingga, model JST *plant* hanya dapat langsung mengeluarkan suatu nilai keluaran setiap menerima nilai masukan.

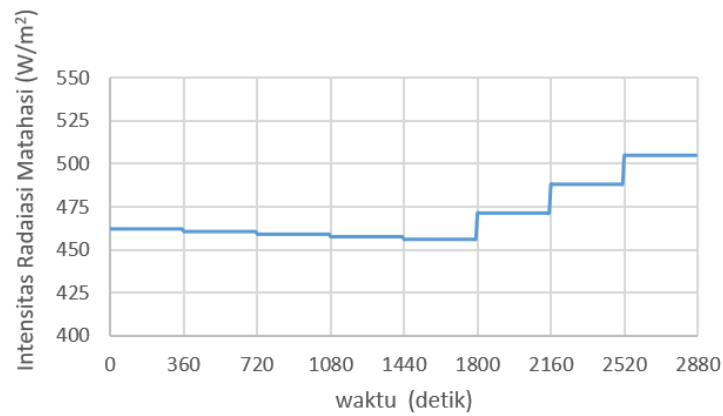
Ditinjau dari *set point* 16°C hingga 26°C, didapatkan nilai *steady-state error* untuk suhu ruang sebesar 0,15°C pada proses pemanasan dan sebesar 0,2°C pada proses pendinginan. Lalu, didapatkan pula nilai *steady-state error* untuk kelembapan relatif sebesar 0,05% pada proses pemanasan dan sebesar 0,02% pada proses pendinginan. Sehingga rerata nilai *steady-state error* sebesar 0,18°C untuk suhu ruang dan sebesar 0,04% untuk kelembapan relatif.

### V.3.2. Skenario Pemanasan Pendinginan dengan Variabel Gangguan Bergerak

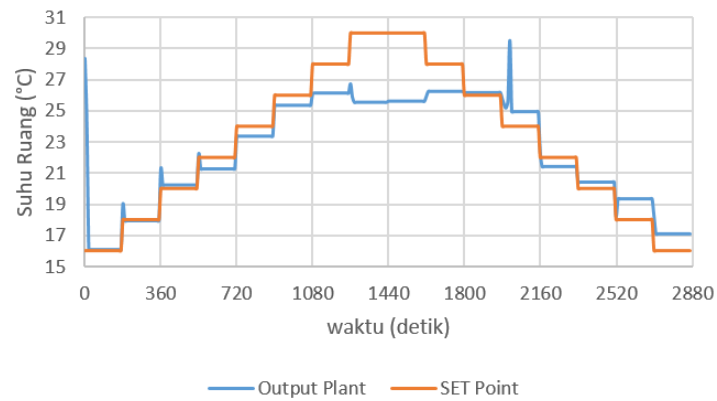
Pada skenario ini digunakan data variabel gangguan pada 21 Juni 2019 yang bergerak dari pukul 08:03 sampai dengan 08:51 WIB. Nilai dari variabel gangguan ditunjukkan pada Gambar 5.14 untuk suhu lingkungan dan 5.15 untuk intensitas radiasi matahari. Pada skenario ini, nilai *set point* yang digunakan senilai dengan nilai *set point* pada simulasi dengan variabel gangguan konstan.



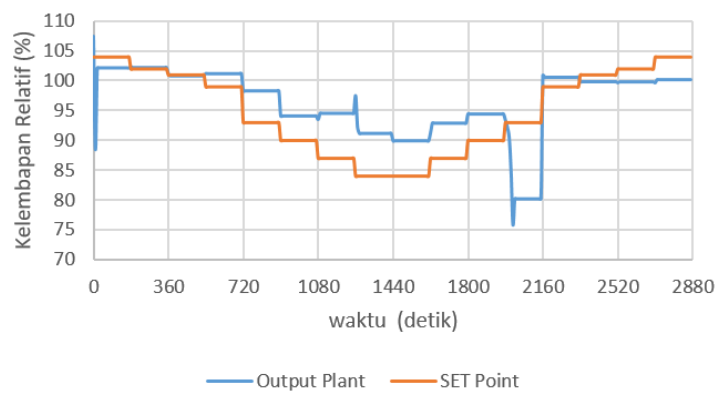
**Gambar 5.14.** Grafik Nilai Variabel Gangguan Suhu Lingkungan



**Gambar 5.15.** Grafik Nilai Variabel Gangguan Intensitas Radiasi Matahari

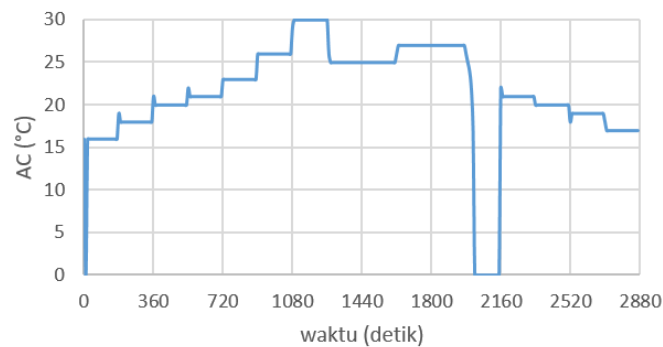


**Gambar 5.16.** Grafik Hasil Simulasi 2 Simulink untuk Suhu Ruang

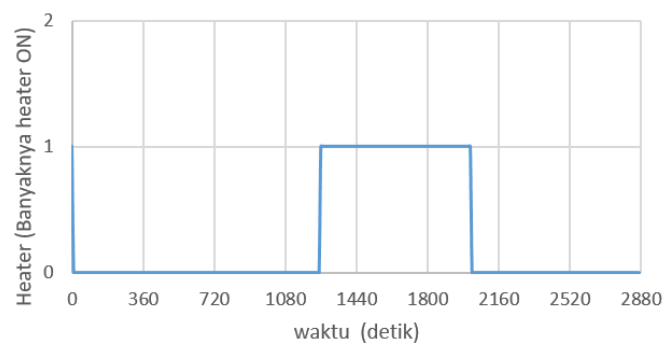


**Gambar 5.17.** Grafik Hasil Simulasi 2 Simulink untuk Kelembapan Relatif

Hasil simulasi dengan variabel gangguan bergerak pun menunjukkan kinerja yang kurang optimal. Berdasarkan Gambar 5.16, dapat dilihat bahwa kontroler tidak mampu menaikkan suhu ruang mencapai nilai lebih dari  $27^{\circ}\text{C}$ . Dapat dilihat pula bahwa terjadi lonjakan nilai suhu udara pada detik ke-1980. Lonjakan tersebut terjadi akibat penonaktifan AC yang dilakukan oleh kontroler yang dapat dilihat pada Gambar 5.18. Pada proses pendinginan, nilai *steady-state error* tampak lebih besar dibandingkan saat proses pemanasan. Hal ini mungkin disebabkan karena kenaikan suhu lingkungan dan intensitas radiasi matahari. Walaupun nilai galat membesar, dapat dilihat bahwa pada proses pendinginan kontroler tetap berupaya untuk mengikuti perubahan *set point*.



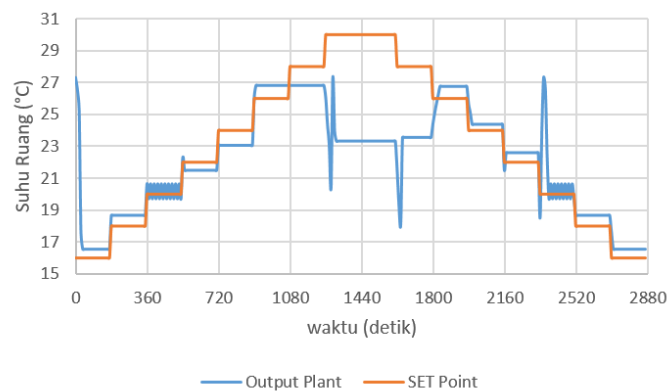
**Gambar 5.18.** Grafik Variabel Manipulasi AC pada Simulasi 2 Simulink



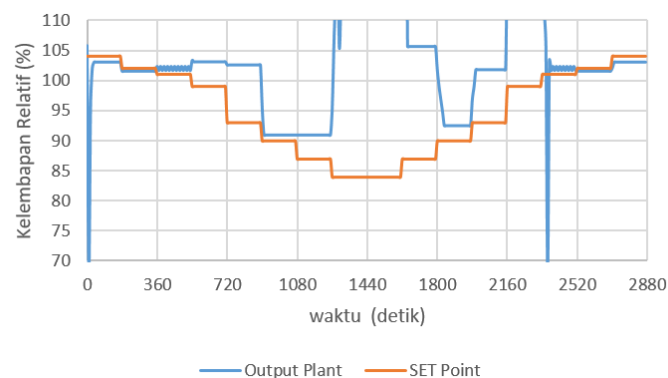
**Gambar 5.19.** Grafik Variabel Manipulasi *Heater* pada Simulasi 2 Simulink

### V.3.3. Analisis Kegagalan Kendali

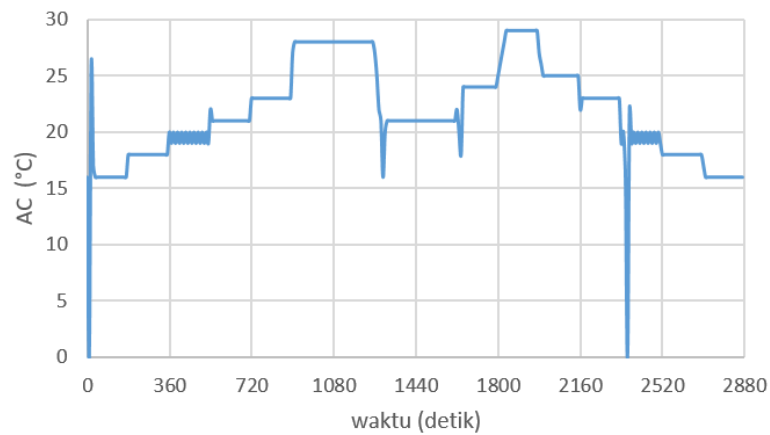
Dari hasil 2 simulasi yang telah dijabarkan, kontroler jarang sekali mengaktifkan 2 *heater* bahkan disaat ingin mencapai suhu yang tinggi. Hal ini menimbulkan kecurigaan terhadap rentang kinerja JST, baik pada model kontroler maupun model *plant*. Untuk mengetahui penyebab kegagalan, dilakukan kembali simulasi dimana kontroler berhasil mengaktifkan 2 perangkat *heater*. Simulasi ini dilakukan dengan nilai variabel gangguan sebesar  $27^{\circ}\text{C}$  untuk suhu lingkungan dan sebesar  $600\text{ W/m}^2$  untuk intensitas radiasi matahari. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 5.20, Gambar 5.21, Gambar 5.22, dan Gambar 5.23.



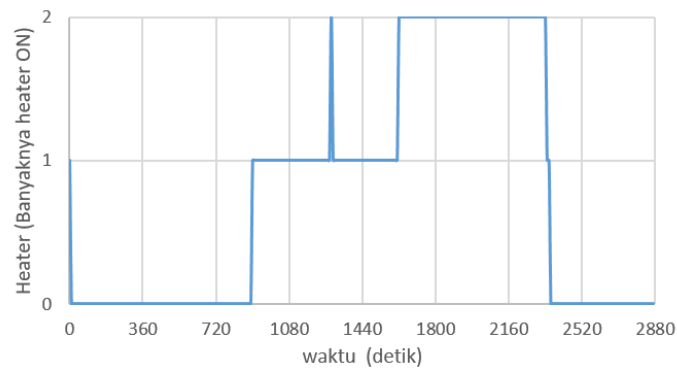
**Gambar 5.20.** Grafik Hasil Simulasi 3 Simulink untuk Suhu Ruang



**Gambar 5.21.** Grafik Hasil Simulasi 3 Simulink untuk Kelembapan Relatif

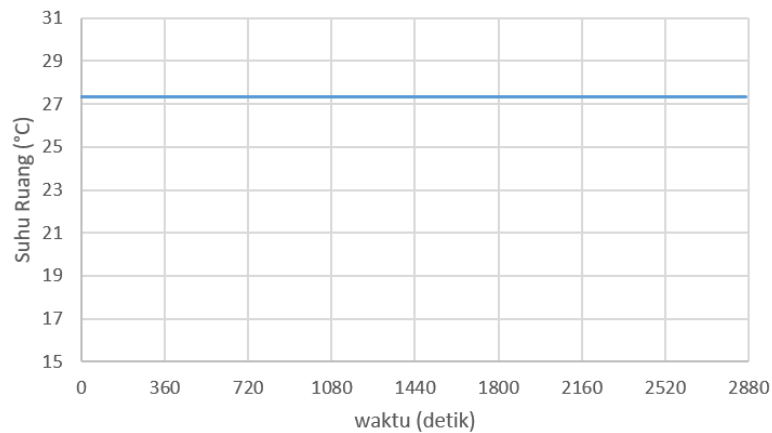


**Gambar 5.22.** Grafik Variabel Manipulasi AC pada Simulasi 3 Simulink



**Gambar 5.23.** Grafik Variabel Manipulasi *Heater* pada Simulasi 3 Simulink

Berdasarkan hasil simulasi ini, dapat disimpulkan bahwa kegagalan pengendalian bukanlah disebabkan oleh tidak aktifnya 2 buah perangkat *heater*. Selanjutnya, dicoba untuk dianalisis model *plant* yang dibangun oleh Hartanto. Pengujian dilakukan dengan nilai variabel gangguan yang sama dan nilai AC 30°C serta 2 *heater* ON. Grafik percobaan ditunjukkan pada Gambar 5.24



**Gambar 5.24.** Grafik Hasil Uji *Plant*

Dari Gambar 5.24 diketahui bahwa *plant* memang tidak mampu untuk menghasilkan keluaran suhu diatas  $28^{\circ}\text{C}$ . Dengan begitu, perlu ditelaah kembali mengenai data yang digunakan. Setelah diteliti, kurangnya keandalan kontroler ternyata disebabkan oleh data simulasi yang dinilai kurang cukup mewakili kondisi lingkungan termal di suhu yang tinggi. Hal ini disebabkan karena tidak dilakukannya validasi di suhu tinggi pada penelitian Kurniawan [1]. Dengan demikian, model yang telah dibangun Hartanto pun pada akhirnya tidak mampu menghasilkan skenario dimana lingkungan termal *climate chamber* mencapai suhu diatas  $28^{\circ}\text{C}$ .

## BAB VI

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### VI.1. Kesimpulan

Rancangan kontroler berbasis jaringan saraf tiruan memiliki nilai *steady-state error* sebesar  $0,18^{\circ}\text{C}$  untuk suhu ruang. Kontroler berbasis jaringan saraf tiruan yang dihasilkan dibangun dengan pembagian data 80% data latih, 10% data validasi, dan 10% data uji. Model Kontroler JST menggunakan fungsi aktivasi *hyperbolic tangent* dengan algoritma pembelajaran Levenberg-Marquardt. Model Kontroler JST terdiri dari 1 lapisan tersembunyi dengan 35 neuron. Akan tetapi, kontroler tidak mampu mengendalikan suhu ruang *climate chamber* di atas nilai *set point*  $26^{\circ}\text{C}$  dikarenakan data lingkungan termal dari Model IES-VE kurang mewakili kondisi sistem pada suhu yang tinggi.

#### VI.2. Saran

1. Disarankan untuk melakukan validasi model di nilai suhu yang tinggi terlebih dahulu apabila menggunakan model IES-VE yang serupa.
2. Memperkaya data pelatihan model JST menggunakan data pengukuran langsung pada *climate chamber* dalam merancang kontroler JST.
3. Menambahkan semacam *manipulator*/aktuator pada *climate chamber* untuk memanipulasi kelembapan relatif ruang secara langsung seperti penelitian yang dilakukan oleh Moon [11]. Contoh: *humidifier* dan *dehumidifier*.
4. Menambahkan variabel kontrol lainnya ke dalam rancangan kontroler, seperti kecepatan angin, suhu radian, RH lingkungan, dsb.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. Kurniawan. *Karakterisasi Lingkungan Termal Chamber Iklim Menggunakan Metode Simulasi CFD Dengan Perangkat Lunak IES VE*. Skripsi, Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2019.
- [2] Norman S. Nise. *Control System Engineering*. John Wiley and Sons, Inc., United State of America, 2011.
- [3] Jagannathan Sarangapani. *Neural Network Control of Nonlinear Discrete-Time Systems*. Taylor and Francis Group, LLC, United State of America, 2006.
- [4] J. Drgoňa. *Model Predictive Control with Applications in Building Thermal Comfort*. Disertasi, Slovak University of Technology in Bratislava, Vazovova 5, 811 07 Bratislava, Slovakia, 2017.
- [5] M.A. Hussain, P. Kittisupakorn dan W. Daosud. “Implementation of Neural-Network-Based Inverse-Model Control Strategies on an Exothermic Reactor”. *ScienceAsia*, 27:41–50, 2001.
- [6] ASHRAE. *ANSI/ASHRAE Standard 55-2010 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA, 2010.
- [7] E. Arens, H. Zhang dan C. Huizenga. “Partial- and Whole-body Thermal Sensation and Comfort— Part I Uniform Environmental Conditions”. *Journal of Thermal Biology, Elsevier Ltd.*, 31:53–59, 2006.
- [8] J.Y. Lee, M. Saat, C. Chou, N. Hashiguchi, T. Wijayanto, H. Wakabayashi dan Y. Tochihara. “Cutaneous Warm and Cool Sensation Thresholds and the Inter-threshold Zone in Malaysian and Japanese Males”. *Journal of Thermal Biology, Elsevier Ltd.*, 35:70–76, 2010.
- [9] V. Soebarto, H. Zhang dan S. Schiavon. “A Thermal Comfort Environmental Chamber Study of Older and Younger People”. *Journal of Building and Environment, Elsevier Ltd.*, 155:1–14, 2019.
- [10] N.M. Nadiya. *Analisis Pengaruh Perubahan Lingkungan Termal terhadap Perubahan Level Sensasi Termal*. Skripsi, Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2020.
- [11] J.W. Moon dan J.J. Kim. “ANN-Based Thermal Control Models for Residential Buildings”. *Journal of Building and Environment, Elsevier Ltd.*, 45:1612–1625, 2010.



- [12] J.W. Moon, S.K. Jung, Y. Kim dan S.H. Han. “Comparative Study of Artificial Intelligence-Based Building Thermal Control Methods - Application of Fuzzy, Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, and Artificial Neural Network”. *Journal of Applied Thermal Engineering, Elsevier Ltd.*, 31:2422–2429, 2011.
- [13] J. Drgoňa, D. Picard, M. Kvasnica dan L. Helsen. “Approximate Model Predictive Building Control via Machine Learning”. *Journal of Applied Energy, Elsevier Ltd.*, 218:199–216, 2018.
- [14] William R. Santee dan William T. Matthew. *Military Quantitative Physiology: Problems and Concepts in Military Operational Medicine*. Office of The Surgeon General Borden Institute, Fort Detrick, Maryland, 2012.
- [15] W. He, G. Xu dan R. Shen. “Control of Temperature Uniformity in the Temperature Chamber With Centrifugal Acceleration”. *Journal of Process Control, Elsevier Ltd.*, 24:1–6, 2014.
- [16] A.P. Leskinen, J.K. Jokiniemi dan K.E.J. Lehtinen. “Characterization of Aging Wood Chip Combustion Aerosol in an Environmental Chamber”. *Journal of Atmospheric Environment, Elsevier Ltd.*, 41:3713–3721, 2007.
- [17] A. Huguet, A. Francez, M. Dung, C. Fosse dan S. Derenne. “A Climatic Chamber Experiment to Test the Short Term Effect of Increasing Temperature on Branched GDGT Distribution in Sphagnum Peat”. *Journal of Organic Geochemistry, Elsevier Ltd.*, 73:109–112, 2014.
- [18] J.A. Jofre-reche, J.C. Su dan C. Alia. “Characterization of the Chemical Structure of Vinyl Ester Resin in a Climate Chamber Under Different Conditions of Degradation”. *Journal of Polymer Degradation and Stability, Elsevier Ltd.*, 153:88–99, 2018.
- [19] A. Srinivasa, S. Das, H. Kottiyen, V. Ashok dan P. Shankarrao. “The Effect of Cold Chamber Temperature on the Cadaver’s Electrolyte Changes in Vitreous Humor and Plasma”. *Journal of Forensic and Legal Medicine, Elsevier Ltd.*, 62:87–91, 2019.
- [20] E. Martinez dan S.J. Agosta. “Budget-Limited Thermal Biology: Design, Construction and Performance of a Large, Walk-in Style Temperature-Controlled Chamber”. *Journal of Thermal Biology, Elsevier Ltd.*, 58:29–34, 2016.
- [21] Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, Frank P. Incropera dan David P. Dewitt. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley and Sons, United State of America, 2011.
- [22] Hugo Hens. *Building Physics - Heat, Air and Moisture: Fundamentals and Engineering Methods with Examples and Exercises*. Ernst and Sohn, Berlin, Germany, 2007.

- [23] Aurélien Géron. *Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn and Tensor-Flow*. O'Reilly Media, Inc., United State of America, 2017.
- [24] T. Hartanto. *Pemodelan Lingkungan Termal Sistem Climate Chamber Dengan Metode Jaringan Saraf Tiruan*. Skripsi, Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2020.
- [25] Z. Reitermanova. “Data Splitting”. *Proceedings of the 19th Annual Conference of Doctoral Students - WDS 2010*, volume 10, hal. 31 – 36, Prague, Czech Republic, 1 – 4 Juni 2010.

# **LAMPIRAN**

## LAMPIRAN A

### DATA PENELITIAN

#### A.1. Data Simulasi IES-VE

Data penelitian ini dapat diakses di <http://bit.ly/DataSkripsiSIRidhan>

**Tabel A.1.** Data Simulasi IES-VE

No	Variation	Month	Time	AC	HT	To	RD	Td	RH
1	DT001	Mar	0:03	0	0	24.26	0.000	24.03	70.64
2	DT001	Mar	0:09	0	0	24.25	0.000	24.03	70.72
3	DT001	Mar	0:15	0	0	24.23	0.000	24.04	70.81
4	DT001	Mar	0:21	0	0	24.21	0.000	24.04	70.9
5	DT001	Mar	0:27	0	0	24.20	0.000	24.04	70.99
6	DT001	Mar	0:33	0	0	24.16	0.000	24.04	71.09
7	DT001	Mar	0:39	0	0	24.15	0.000	24.04	71.18
8	DT001	Mar	0:45	0	0	24.13	0.000	24.04	71.28
9	DT001	Mar	0:51	0	0	24.11	0.000	24.04	71.38
10	DT001	Mar	0:57	0	0	24.10	0.000	24.04	71.47
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
23991	DT100	Des	23:03	0	2	24.22	0.000	24.96	99.68
23992	DT100	Des	23:09	0	2	24.21	0.000	24.94	99.68
23993	DT100	Des	23:15	0	2	24.21	0.000	24.93	99.68
23994	DT100	Des	23:21	0	2	24.20	0.000	24.91	99.69
23995	DT100	Des	23:27	0	2	24.20	0.000	24.9	99.69
23996	DT100	Des	23:33	0	2	24.19	0.000	24.89	99.69
23997	DT100	Des	23:39	0	2	24.19	0.000	24.87	99.69
23998	DT100	Des	23:45	0	2	24.18	0.000	24.86	99.69
23999	DT100	Des	23:51	0	2	24.18	0.000	24.85	99.69
24000	DT100	Des	23:57	0	2	24.17	0.000	24.83	99.69

## A.2. Bobot-bobot Model JST Kontroler

**Tabel A.2.** Bobot-bobot Model JST Kontroler

lw						b1	Lw'		b2
-11.95597681	12.23854716	15.07327049	-13.40515908	3.138196914	0.775136142	4.440584933	0.712442891	-0.001657343	0.952642467
8.590237436	1.479421365	-8.93069422	-1.657211345	-0.868923467	0.674785859	2.009489325	-6.813155767	0.226066021	-0.271200865
4.27082187	2.694329496	-4.3452592	-3.108352562	-0.531459125	-1.047756047	0.972763347	10.80103706	-0.761323837	
-6.140454365	-2.494246837	6.181258662	3.259412512	0.544122149	-2.342221528	2.588630548	5.979847189	-0.347886669	
-7.409288893	0.602008707	5.110336292	-0.892717826	0.125599224	0.341601284	1.658740991	-1.923065003	0.232543477	
-0.745984483	-2.742340286	1.139868525	3.052144087	0.523956459	2.035537366	1.339397313	-7.623722203	0.483654325	
14.50662678	3.143991911	-11.2222585	-3.160448648	-1.32895914	0.339702339	-2.057030424	-1.354595177	0.17343623	
-8.980537718	-3.766488879	5.355324266	4.734803499	5.32656861	-0.947381473	4.741337159	-1.511190758	0.088200897	
15.48845103	14.21804801	60.05629147	-14.00491348	-156.8047095	-0.125359455	83.29620781	-0.90616837	0.070615221	
-0.550931123	3.399119999	1.584749014	-3.626609267	-0.487962676	-0.732326865	-0.969935395	-6.818408713	0.265979207	
-2.325010474	-4.185318677	-0.07941627	3.507813687	1.834098615	0.241852448	0.467952668	-1.149261772	-0.017486731	
3.029407095	-7.781105718	-3.825101632	4.491037526	-1.011791042	-0.970042911	1.13607748	0.313954201	0.017481002	
4.912708426	0.376519796	-4.226131303	-0.116042163	-0.599018711	-1.579501567	0.317341837	-5.37935014	-0.051912746	
-1.762952799	6.124643883	1.830391841	-4.936606038	0.527734542	-4.759709598	6.187013528	-3.051187279	0.465112296	
7.389054075	-0.589324405	-5.113590533	0.241213547	-0.796645575	1.68608892	-0.393135934	-1.28543727	0.082718547	
1.179452894	-9.607696418	-4.403974043	11.21413923	-1.190474412	0.519898609	0.277977549	-0.256192742	-0.038082796	
1.441329407	6.56413294	-1.153649977	-5.563199112	2.71303227	1.58759332	2.220131352	6.376829425	0.050099532	
1.953293015	0.706097336	-2.394114841	-2.782718159	-2.88422452	2.497488711	0.662689033	0.94121472	-0.064542729	
3.660179238	-4.305530892	-6.692611638	2.59009459	-0.600651432	0.180704629	0.307069047	-0.850998351	0.076079778	
9.430017186	6.865146402	-6.31098999	-3.833996054	0.571533525	0.044770626	-2.269027383	0.412847009	-0.033942507	
9.556062516	-5.41213223	-9.46906834	7.675488893	-2.367014206	1.277471556	0.353757313	-0.497513742	0.081273896	
0.437901328	-2.874836737	1.316734951	3.609986619	-0.92301756	3.275743918	-0.167929642	2.989013858	0.044982666	
-4.401772182	0.721072911	2.63596562	-0.016720205	0.200310476	-1.564167783	-1.793986809	4.951252919	0.017125457	
0.305783696	1.114439189	0.348853125	2.180137383	0.40382545	3.081786491	3.722104153	-0.264888101	0.017145846	
5.39966094	-2.769919864	-1.871172498	2.291809759	0.991965615	0.405771403	0.223220364	1.263995636	-0.072460632	
4.9047372	-2.882671213	-4.359581839	3.068752974	-0.939914357	0.795936382	1.597880149	7.018795874	0.0224771	
-3.680675817	-6.370111511	2.785855386	7.225966171	1.019879499	0.709747676	-1.54017949	3.356387819	-0.179591928	
-1.131490054	5.742669568	0.740190824	-6.265649382	1.027906896	-0.91343	-1.613228123	4.333909147	-0.022253765	
-3.864965334	0.651360676	2.024148787	-0.07779799	0.091207033	-3.775522652	-3.996489849	-6.679162181	-0.009717503	
-18.47171039	8.490694473	-1.59551834	-19.61675265	-2.116458722	0.944758688	23.29749156	-6.673748022	-0.847687699	
-4.841605492	0.040458928	1.817952426	0.870980868	-0.590046835	6.235725925	5.944759254	2.4893485	-0.035992385	
-41.19714892	-5.922696323	18.88395692	-7.702553515	-2.064576633	0.647981038	25.52108028	7.31697087	0.843026829	
-5.787217637	-5.712952423	5.706515557	4.669969125	-2.548586569	-2.066683707	-2.382019754	6.555354032	-0.114260537	
1.528694154	-8.021593579	-5.45384139	5.854733175	-2.428510253	-1.716743486	-4.907869766	-0.431495611	0.042589481	
-1.342527567	-1.635696804	0.916370771	1.759958296	0.103851726	-0.868637362	1.318527067	-5.523657566	-0.153856723	

### A.3. Hasil Simulasi 1 Sistem Kontrol

**Tabel A.3.** Hasil Simulasi 1 Sistem Kontrol

Time	Td	Td_SP	RH	RH_SP	AC	HT	To	RD
0	27.34178933	16	109.2876671	104	16	1	26.8	423.343
9	25.56386008	16	74.22403896	104	0	0	26.8	423.343
18	21.23178424	16	100.1507688	104	21	0	26.8	423.343
27	17.5364806	16	102.5082129	104	18	0	26.8	423.343
36	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	26.8	423.343
45	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	26.8	423.343
54	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	26.8	423.343
63	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	26.8	423.343
72	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	26.8	423.343
81	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	26.8	423.343
90	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	26.8	423.343
99	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	26.8	423.343
108	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	26.8	423.343
117	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	26.8	423.343
126	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	26.8	423.343
135	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	26.8	423.343
144	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	26.8	423.343
153	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	26.8	423.343
162	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	26.8	423.343
171	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	26.8	423.343
180	18.83139376	18	101.7136355	102	19	0	26.8	423.343
189	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343
198	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343
207	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343
216	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343
225	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343
234	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343
243	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343
252	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343
261	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343
270	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343
279	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343
288	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343
297	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343
306	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343
315	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343
324	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343
333	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343
342	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343
351	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343
360	21.23178424	20	100.1507688	101	21	0	26.8	423.343
369	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343
378	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343
387	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343
396	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343
405	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343
414	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343
423	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343
432	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343
441	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343
450	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343
459	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343
468	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343
477	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343
486	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343
495	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343
504	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343
513	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343
522	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343
531	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343
540	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	26.8	423.343
549	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	26.8	423.343
558	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	26.8	423.343
567	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	26.8	423.343
576	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	26.8	423.343
585	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	26.8	423.343
594	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	26.8	423.343
603	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	26.8	423.343
612	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	26.8	423.343
621	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	26.8	423.343
630	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	26.8	423.343
639	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	26.8	423.343
648	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	26.8	423.343
657	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	26.8	423.343
666	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	26.8	423.343
675	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	26.8	423.343
684	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	26.8	423.343
693	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	26.8	423.343
702	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	26.8	423.343
711	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	26.8	423.343
720	23.22740214	24	96.74128844	93	23	0	26.8	423.343

#### A.4. Hasil Simulasi 1 Sistem Kontrol (lanjutan 2)

**Tabel A.4.** Hasil Simulasi 1 Sistem Kontrol

Time	Td	Td_SP	RH	RH_SP	AC	HT	To	RD
729	23.22740214	24	96.74128844	93	23	0	26.8	423.343
738	23.22740214	24	96.74128844	93	23	0	26.8	423.343
747	23.22740214	24	96.74128844	93	23	0	26.8	423.343
756	23.22740214	24	96.74128844	93	23	0	26.8	423.343
765	23.22740214	24	96.74128844	93	23	0	26.8	423.343
774	23.22740214	24	96.74128844	93	23	0	26.8	423.343
783	23.22740214	24	96.74128844	93	23	0	26.8	423.343
792	23.22740214	24	96.74128844	93	23	0	26.8	423.343
801	23.22740214	24	96.74128844	93	23	0	26.8	423.343
810	23.22740214	24	96.74128844	93	23	0	26.8	423.343
819	23.22740214	24	96.74128844	93	23	0	26.8	423.343
828	23.22740214	24	96.74128844	93	23	0	26.8	423.343
837	23.22740214	24	96.74128844	93	23	0	26.8	423.343
846	23.22740214	24	96.74128844	93	23	0	26.8	423.343
855	23.22740214	24	96.74128844	93	23	0	26.8	423.343
864	23.22740214	24	96.74128844	93	23	0	26.8	423.343
873	23.22740214	24	96.74128844	93	23	0	26.8	423.343
882	23.22740214	24	96.74128844	93	23	0	26.8	423.343
891	23.22740214	24	96.74128844	93	23	0	26.8	423.343
900	25.45080806	26	89.30630586	90	26	0	26.8	423.343
909	25.88697525	26	88.23689258	90	27	0	26.8	423.343
918	26.17073881	26	88.26658888	90	28	0	26.8	423.343
927	26.17073881	26	88.26658888	90	28	0	26.8	423.343
936	26.17073881	26	88.26658888	90	28	0	26.8	423.343
945	26.17073881	26	88.26658888	90	28	0	26.8	423.343
954	26.17073881	26	88.26658888	90	28	0	26.8	423.343
963	26.17073881	26	88.26658888	90	28	0	26.8	423.343
972	26.17073881	26	88.26658888	90	28	0	26.8	423.343
981	26.17073881	26	88.26658888	90	28	0	26.8	423.343
990	26.17073881	26	88.26658888	90	28	0	26.8	423.343
999	26.17073881	26	88.26658888	90	28	0	26.8	423.343
1008	26.17073881	26	88.26658888	90	28	0	26.8	423.343
1017	26.17073881	26	88.26658888	90	28	0	26.8	423.343
1026	26.17073881	26	88.26658888	90	28	0	26.8	423.343
1035	26.17073881	26	88.26658888	90	28	0	26.8	423.343
1044	26.17073881	26	88.26658888	90	28	0	26.8	423.343
1053	26.17073881	26	88.26658888	90	28	0	26.8	423.343
1062	26.17073881	26	88.26658888	90	28	0	26.8	423.343
1071	26.17073881	26	88.26658888	90	28	0	26.8	423.343
1080	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1089	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1098	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1107	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1116	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1125	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1134	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1143	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1152	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1161	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1170	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1179	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1188	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1197	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1206	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1215	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1224	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1233	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1242	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1251	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1260	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1269	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1278	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1287	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1296	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1305	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1314	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1323	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1332	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1341	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1350	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1359	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1368	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1377	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1386	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1395	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1404	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1413	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1422	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1431	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1440	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343

### A.5. Hasil Simulasi 1 Sistem Kontrol (lanjutan 3)

**Tabel A.5.** Hasil Simulasi 1 Sistem Kontrol

Time	Td	Td_SP	RH	RH_SP	AC	HT	To	RD
1449	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1458	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1467	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1476	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1485	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1494	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1503	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1512	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1521	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1530	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1539	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1548	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1557	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1566	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1575	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1584	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1593	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1602	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1611	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	26.8	423.343
1620	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1629	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1638	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1647	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1656	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1665	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1674	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1683	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1692	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1701	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1710	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1719	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1728	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1737	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1746	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1755	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1764	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1773	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1782	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1791	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	26.8	423.343
1800	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	26.8	423.343
1809	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	26.8	423.343
1818	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	26.8	423.343
1827	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	26.8	423.343
1836	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	26.8	423.343
1845	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	26.8	423.343
1854	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	26.8	423.343
1863	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	26.8	423.343
1872	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	26.8	423.343
1881	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	26.8	423.343
1890	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	26.8	423.343
1899	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	26.8	423.343
1908	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	26.8	423.343
1917	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	26.8	423.343
1926	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	26.8	423.343
1935	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	26.8	423.343
1944	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	26.8	423.343
1953	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	26.8	423.343
1962	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	26.8	423.343
1971	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	26.8	423.343
1980	26.34256665	24	89.19521707	93	29	0	26.8	423.343
1989	26.17073881	24	88.26658888	93	28	0	26.8	423.343
1998	25.88697525	24	88.23689258	93	27	0	26.8	423.343
2007	25.45080806	24	89.30630586	93	26	0	26.8	423.343
2016	24.8472463	24	91.39960639	93	25	0	26.8	423.343
2025	24.0939216	24	94.09152781	93	24	0	26.8	423.343
2034	24.0939216	24	94.09152781	93	24	0	26.8	423.343
2043	24.0939216	24	94.09152781	93	24	0	26.8	423.343
2052	24.0939216	24	94.09152781	93	24	0	26.8	423.343
2061	24.0939216	24	94.09152781	93	24	0	26.8	423.343
2070	24.0939216	24	94.09152781	93	24	0	26.8	423.343
2079	24.0939216	24	94.09152781	93	24	0	26.8	423.343
2088	24.0939216	24	94.09152781	93	24	0	26.8	423.343
2097	24.0939216	24	94.09152781	93	24	0	26.8	423.343
2106	24.0939216	24	94.09152781	93	24	0	26.8	423.343
2115	24.0939216	24	94.09152781	93	24	0	26.8	423.343
2124	24.0939216	24	94.09152781	93	24	0	26.8	423.343
2133	24.0939216	24	94.09152781	93	24	0	26.8	423.343
2142	24.0939216	24	94.09152781	93	24	0	26.8	423.343
2151	24.0939216	24	94.09152781	93	24	0	26.8	423.343
2160	23.22740214	22	96.74128844	99	23	0	26.8	423.343



#### A.6. Hasil Simulasi 1 Sistem Kontrol (lanjutan 4)

**Tabel A.6.** Hasil Simulasi 1 Sistem Kontrol

Time (ns)	Td	SP	RH	RH	SP	AC	HT	Td	RD
2169	22.73994412	22	98.81377723	99	22	0	26.8	423.343	
2178	22.73994412	22	98.81377723	99	22	0	26.8	423.343	
2187	22.73994412	22	98.81377723	99	22	0	26.8	423.343	
2196	22.73994412	22	98.81377723	99	22	0	26.8	423.343	
2205	22.73994412	22	98.81377723	99	22	0	26.8	423.343	
2214	22.73994412	22	98.81377723	99	22	0	26.8	423.343	
2223	22.73994412	22	98.81377723	99	22	0	26.8	423.343	
2232	22.73994412	22	98.81377723	99	22	0	26.8	423.343	
2241	22.73994412	22	98.81377723	99	22	0	26.8	423.343	
2250	22.73994412	22	98.81377723	99	22	0	26.8	423.343	
2259	22.73994412	22	98.81377723	99	22	0	26.8	423.343	
2268	22.73994412	22	98.81377723	99	22	0	26.8	423.343	
2277	22.73994412	22	98.81377723	99	22	0	26.8	423.343	
2286	22.73994412	22	98.81377723	99	22	0	26.8	423.343	
2295	22.73994412	22	98.81377723	99	22	0	26.8	423.343	
2304	22.73994412	22	98.81377723	99	22	0	26.8	423.343	
2313	22.73994412	22	98.81377723	99	22	0	26.8	423.343	
2322	22.73994412	22	98.81377723	99	22	0	26.8	423.343	
2331	22.73994412	22	98.81377723	99	22	0	26.8	423.343	
2340	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343	
2349	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343	
2358	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343	
2367	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343	
2376	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343	
2385	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343	
2394	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343	
2403	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343	
2412	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343	
2421	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343	
2430	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343	
2439	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343	
2448	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343	
2457	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343	
2466	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343	
2475	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343	
2484	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343	
2493	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343	
2502	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343	
2511	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	26.8	423.343	
2520	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343	
2529	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343	
2538	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343	
2547	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343	
2556	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343	
2565	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343	
2574	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343	
2583	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343	
2592	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343	
2601	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343	
2610	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343	
2619	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343	
2628	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343	
2637	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343	
2646	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343	
2655	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343	
2664	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343	
2673	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343	
2682	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343	
2691	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	26.8	423.343	
2700	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	26.8	423.343	
2709	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	26.8	423.343	
2718	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	26.8	423.343	
2727	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	26.8	423.343	
2736	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	26.8	423.343	
2745	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	26.8	423.343	
2754	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	26.8	423.343	
2763	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	26.8	423.343	
2772	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	26.8	423.343	
2781	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	26.8	423.343	
2790	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	26.8	423.343	
2799	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	26.8	423.343	
2808	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	26.8	423.343	
2817	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	26.8	423.343	
2826	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	26.8	423.343	
2835	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	26.8	423.343	
2844	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	26.8	423.343	
2853	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	26.8	423.343	
2862	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	26.8	423.343	
2871	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	26.8	423.343	
2880	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	26.8	423.343	

## A.7. Hasil Simulasi 2 Sistem Kontrol

**Tabel A.7.** Hasil Simulasi 2 Sistem Kontrol

Time	Td	Td_SP	RH	RH_SP	AC	HT	To	RD
0	28.34902746	16	107.331073	104	16	1	25.9	462.082
9	24.12004678	16	88.44903693	104	0	0	25.9	462.082
18	16.11413372	16	102.0489031	104	16	0	25.9	462.082
27	16.11413372	16	102.0489031	104	16	0	25.9	462.082
36	16.11413372	16	102.0489031	104	16	0	25.9	462.082
45	16.11413372	16	102.0489031	104	16	0	25.9	462.082
54	16.11413372	16	102.0489031	104	16	0	25.9	462.082
63	16.11413372	16	102.0489031	104	16	0	25.9	462.082
72	16.11413372	16	102.0489031	104	16	0	25.9	462.082
81	16.11413372	16	102.0489031	104	16	0	25.9	462.082
90	16.11413372	16	102.0489031	104	16	0	25.9	462.082
99	16.11413372	16	102.0489031	104	16	0	25.9	462.082
108	16.11413372	16	102.0489031	104	16	0	25.9	462.082
117	16.11413372	16	102.0489031	104	16	0	25.9	462.082
126	16.11413372	16	102.0489031	104	16	0	25.9	462.082
135	16.11413372	16	102.0489031	104	16	0	25.9	462.082
144	16.11413372	16	102.0489031	104	16	0	25.9	462.082
153	16.11413372	16	102.0489031	104	16	0	25.9	462.082
162	16.11413372	16	102.0489031	104	16	0	25.9	462.082
171	16.11413372	16	102.0489031	104	16	0	25.9	462.082
180	19.01529065	18	102.2488418	102	19	0	25.9	462.082
189	17.95808664	18	102.1122414	102	18	0	25.9	462.082
198	17.95808664	18	102.1122414	102	18	0	25.9	462.082
207	17.95808664	18	102.1122414	102	18	0	25.9	462.082
216	17.95808664	18	102.1122414	102	18	0	25.9	462.082
225	17.95808664	18	102.1122414	102	18	0	25.9	462.082
234	17.95808664	18	102.1122414	102	18	0	25.9	462.082
243	17.95808664	18	102.1122414	102	18	0	25.9	462.082
252	17.95808664	18	102.1122414	102	18	0	25.9	462.082
261	17.95808664	18	102.1122414	102	18	0	25.9	462.082
270	17.95808664	18	102.1122414	102	18	0	25.9	462.082
279	17.95808664	18	102.1122414	102	18	0	25.9	462.082
288	17.95808664	18	102.1122414	102	18	0	25.9	462.082
297	17.95808664	18	102.1122414	102	18	0	25.9	462.082
306	17.95808664	18	102.1122414	102	18	0	25.9	462.082
315	17.95808664	18	102.1122414	102	18	0	25.9	462.082
324	17.95808664	18	102.1122414	102	18	0	25.9	462.082
333	17.95808664	18	102.1122414	102	18	0	25.9	462.082
342	17.95808664	18	102.1122414	102	18	0	25.9	462.082
351	17.95808664	18	102.1122414	102	18	0	25.9	462.082
360	21.28235497	20	101.0968415	101	21	0	26	460.576
369	20.25034867	20	100.7268318	101	20	0	26	460.576
378	20.25034867	20	100.7268318	101	20	0	26	460.576
387	20.25034867	20	100.7268318	101	20	0	26	460.576
396	20.25034867	20	100.7268318	101	20	0	26	460.576
405	20.25034867	20	100.7268318	101	20	0	26	460.576
414	20.25034867	20	100.7268318	101	20	0	26	460.576
423	20.25034867	20	100.7268318	101	20	0	26	460.576
432	20.25034867	20	100.7268318	101	20	0	26	460.576
441	20.25034867	20	100.7268318	101	20	0	26	460.576
450	20.25034867	20	100.7268318	101	20	0	26	460.576
459	20.25034867	20	100.7268318	101	20	0	26	460.576
468	20.25034867	20	100.7268318	101	20	0	26	460.576
477	20.25034867	20	100.7268318	101	20	0	26	460.576
486	20.25034867	20	100.7268318	101	20	0	26	460.576
495	20.25034867	20	100.7268318	101	20	0	26	460.576
504	20.25034867	20	100.7268318	101	20	0	26	460.576
513	20.25034867	20	100.7268318	101	20	0	26	460.576
522	20.25034867	20	100.7268318	101	20	0	26	460.576
531	20.25034867	20	100.7268318	101	20	0	26	460.576
540	22.2575123	22	101.1188959	99	22	0	26	460.576
549	21.28235497	22	101.0968415	99	21	0	26	460.576
558	21.28235497	22	101.0968415	99	21	0	26	460.576
567	21.28235497	22	101.0968415	99	21	0	26	460.576
576	21.28235497	22	101.0968415	99	21	0	26	460.576
585	21.28235497	22	101.0968415	99	21	0	26	460.576
594	21.28235497	22	101.0968415	99	21	0	26	460.576
603	21.28235497	22	101.0968415	99	21	0	26	460.576
612	21.28235497	22	101.0968415	99	21	0	26	460.576
621	21.28235497	22	101.0968415	99	21	0	26	460.576
630	21.28235497	22	101.0968415	99	21	0	26	460.576
639	21.28235497	22	101.0968415	99	21	0	26	460.576
648	21.28235497	22	101.0968415	99	21	0	26	460.576
657	21.28235497	22	101.0968415	99	21	0	26	460.576
666	21.28235497	22	101.0968415	99	21	0	26	460.576
675	21.28235497	22	101.0968415	99	21	0	26	460.576
684	21.28235497	22	101.0968415	99	21	0	26	460.576
693	21.28235497	22	101.0968415	99	21	0	26	460.576
702	21.28235497	22	101.0968415	99	21	0	26	460.576
711	21.28235497	22	101.0968415	99	21	0	26	460.576
720	23.37158672	24	98.22138789	93	23	0	26.1	459.071

## A.8. Hasil Simulasi 2 Sistem Kontrol (lanjutan 2)

**Tabel A.8.** Hasil Simulasi 2 Sistem Kontrol

Time	Td	Td_SP	RH	RH_SP	AC	HT	To	RD
729	23.37158672	24	98.22138789	93	23	0	26.1	459.071
738	23.37158672	24	98.22138789	93	23	0	26.1	459.071
747	23.37158672	24	98.22138789	93	23	0	26.1	459.071
756	23.37158672	24	98.22138789	93	23	0	26.1	459.071
765	23.37158672	24	98.22138789	93	23	0	26.1	459.071
774	23.37158672	24	98.22138789	93	23	0	26.1	459.071
783	23.37158672	24	98.22138789	93	23	0	26.1	459.071
792	23.37158672	24	98.22138789	93	23	0	26.1	459.071
801	23.37158672	24	98.22138789	93	23	0	26.1	459.071
810	23.37158672	24	98.22138789	93	23	0	26.1	459.071
819	23.37158672	24	98.22138789	93	23	0	26.1	459.071
828	23.37158672	24	98.22138789	93	23	0	26.1	459.071
837	23.37158672	24	98.22138789	93	23	0	26.1	459.071
846	23.37158672	24	98.22138789	93	23	0	26.1	459.071
855	23.37158672	24	98.22138789	93	23	0	26.1	459.071
864	23.37158672	24	98.22138789	93	23	0	26.1	459.071
873	23.37158672	24	98.22138789	93	23	0	26.1	459.071
882	23.37158672	24	98.22138789	93	23	0	26.1	459.071
891	23.37158672	24	98.22138789	93	23	0	26.1	459.071
900	25.35480034	26	94.01908688	90	26	0	26.1	459.071
909	25.35480034	26	94.01908688	90	26	0	26.1	459.071
918	25.35480034	26	94.01908688	90	26	0	26.1	459.071
927	25.35480034	26	94.01908688	90	26	0	26.1	459.071
936	25.35480034	26	94.01908688	90	26	0	26.1	459.071
945	25.35480034	26	94.01908688	90	26	0	26.1	459.071
954	25.35480034	26	94.01908688	90	26	0	26.1	459.071
963	25.35480034	26	94.01908688	90	26	0	26.1	459.071
972	25.35480034	26	94.01908688	90	26	0	26.1	459.071
981	25.35480034	26	94.01908688	90	26	0	26.1	459.071
990	25.35480034	26	94.01908688	90	26	0	26.1	459.071
999	25.35480034	26	94.01908688	90	26	0	26.1	459.071
1008	25.35480034	26	94.01908688	90	26	0	26.1	459.071
1017	25.35480034	26	94.01908688	90	26	0	26.1	459.071
1026	25.35480034	26	94.01908688	90	26	0	26.1	459.071
1035	25.35480034	26	94.01908688	90	26	0	26.1	459.071
1044	25.35480034	26	94.01908688	90	26	0	26.1	459.071
1053	25.35480034	26	94.01908688	90	26	0	26.1	459.071
1062	25.35480034	26	94.01908688	90	26	0	26.1	459.071
1071	25.35480034	26	94.01908688	90	26	0	26.1	459.071
1080	26.08604183	28	93.43223826	87	29	0	26.2	457.565
1089	26.13767481	28	94.47630437	87	30	0	26.2	457.565
1098	26.13767481	28	94.47630437	87	30	0	26.2	457.565
1107	26.13767481	28	94.47630437	87	30	0	26.2	457.565
1116	26.13767481	28	94.47630437	87	30	0	26.2	457.565
1125	26.13767481	28	94.47630437	87	30	0	26.2	457.565
1134	26.13767481	28	94.47630437	87	30	0	26.2	457.565
1143	26.13767481	28	94.47630437	87	30	0	26.2	457.565
1152	26.13767481	28	94.47630437	87	30	0	26.2	457.565
1161	26.13767481	28	94.47630437	87	30	0	26.2	457.565
1170	26.13767481	28	94.47630437	87	30	0	26.2	457.565
1179	26.13767481	28	94.47630437	87	30	0	26.2	457.565
1188	26.13767481	28	94.47630437	87	30	0	26.2	457.565
1197	26.13767481	28	94.47630437	87	30	0	26.2	457.565
1206	26.13767481	28	94.47630437	87	30	0	26.2	457.565
1215	26.13767481	28	94.47630437	87	30	0	26.2	457.565
1224	26.13767481	28	94.47630437	87	30	0	26.2	457.565
1233	26.13767481	28	94.47630437	87	30	0	26.2	457.565
1242	26.13767481	28	94.47630437	87	30	0	26.2	457.565
1251	26.13767481	28	94.47630437	87	30	0	26.2	457.565
1260	26.72285958	30	97.39259455	84	30	1	26.2	457.565
1269	25.85931626	30	92.17630969	84	26	1	26.2	457.565
1278	25.54474387	30	91.12424654	84	25	1	26.2	457.565
1287	25.54474387	30	91.12424654	84	25	1	26.2	457.565
1296	25.54474387	30	91.12424654	84	25	1	26.2	457.565
1305	25.54474387	30	91.12424654	84	25	1	26.2	457.565
1314	25.54474387	30	91.12424654	84	25	1	26.2	457.565
1323	25.54474387	30	91.12424654	84	25	1	26.2	457.565
1332	25.54474387	30	91.12424654	84	25	1	26.2	457.565
1341	25.54474387	30	91.12424654	84	25	1	26.2	457.565
1350	25.54474387	30	91.12424654	84	25	1	26.2	457.565
1359	25.54474387	30	91.12424654	84	25	1	26.2	457.565
1368	25.54474387	30	91.12424654	84	25	1	26.2	457.565
1377	25.54474387	30	91.12424654	84	25	1	26.2	457.565
1386	25.54474387	30	91.12424654	84	25	1	26.2	457.565
1395	25.54474387	30	91.12424654	84	25	1	26.2	457.565
1404	25.54474387	30	91.12424654	84	25	1	26.2	457.565
1413	25.54474387	30	91.12424654	84	25	1	26.2	457.565
1422	25.54474387	30	91.12424654	84	25	1	26.2	457.565
1431	25.54474387	30	91.12424654	84	25	1	26.2	457.565
1440	25.61267608	30	89.88654786	84	25	1	26.3	456.06

## A.9. Hasil Simulasi 2 Sistem Kontrol (lanjutan 3)

**Tabel A.9.** Hasil Simulasi 2 Sistem Kontrol

Time	Td	Td_SP	RH	RH_SP	AC	HT	To	RD
1449	25.61267608	30	89.88654786	84	25	1	26.3	456.06
1458	25.61267608	30	89.88654786	84	25	1	26.3	456.06
1467	25.61267608	30	89.88654786	84	25	1	26.3	456.06
1476	25.61267608	30	89.88654786	84	25	1	26.3	456.06
1485	25.61267608	30	89.88654786	84	25	1	26.3	456.06
1494	25.61267608	30	89.88654786	84	25	1	26.3	456.06
1503	25.61267608	30	89.88654786	84	25	1	26.3	456.06
1512	25.61267608	30	89.88654786	84	25	1	26.3	456.06
1521	25.61267608	30	89.88654786	84	25	1	26.3	456.06
1530	25.61267608	30	89.88654786	84	25	1	26.3	456.06
1539	25.61267608	30	89.88654786	84	25	1	26.3	456.06
1548	25.61267608	30	89.88654786	84	25	1	26.3	456.06
1557	25.61267608	30	89.88654786	84	25	1	26.3	456.06
1566	25.61267608	30	89.88654786	84	25	1	26.3	456.06
1575	25.61267608	30	89.88654786	84	25	1	26.3	456.06
1584	25.61267608	30	89.88654786	84	25	1	26.3	456.06
1593	25.61267608	30	89.88654786	84	25	1	26.3	456.06
1602	25.61267608	30	89.88654786	84	25	1	26.3	456.06
1611	25.61267608	30	89.88654786	84	25	1	26.3	456.06
1620	25.93032011	28	91.219041	87	26	1	26.3	456.06
1629	26.23917711	28	92.83659334	87	27	1	26.3	456.06
1638	26.23917711	28	92.83659334	87	27	1	26.3	456.06
1647	26.23917711	28	92.83659334	87	27	1	26.3	456.06
1656	26.23917711	28	92.83659334	87	27	1	26.3	456.06
1665	26.23917711	28	92.83659334	87	27	1	26.3	456.06
1674	26.23917711	28	92.83659334	87	27	1	26.3	456.06
1683	26.23917711	28	92.83659334	87	27	1	26.3	456.06
1692	26.23917711	28	92.83659334	87	27	1	26.3	456.06
1701	26.23917711	28	92.83659334	87	27	1	26.3	456.06
1710	26.23917711	28	92.83659334	87	27	1	26.3	456.06
1719	26.23917711	28	92.83659334	87	27	1	26.3	456.06
1728	26.23917711	28	92.83659334	87	27	1	26.3	456.06
1737	26.23917711	28	92.83659334	87	27	1	26.3	456.06
1746	26.23917711	28	92.83659334	87	27	1	26.3	456.06
1755	26.23917711	28	92.83659334	87	27	1	26.3	456.06
1764	26.23917711	28	92.83659334	87	27	1	26.3	456.06
1773	26.23917711	28	92.83659334	87	27	1	26.3	456.06
1782	26.23917711	28	92.83659334	87	27	1	26.3	456.06
1791	26.23917711	28	92.83659334	87	27	1	26.3	456.06
1800	26.16591939	26	94.35360666	90	27	1	26.5	471.348
1809	26.16591939	26	94.35360666	90	27	1	26.5	471.348
1818	26.16591939	26	94.35360666	90	27	1	26.5	471.348
1827	26.16591939	26	94.35360666	90	27	1	26.5	471.348
1836	26.16591939	26	94.35360666	90	27	1	26.5	471.348
1845	26.16591939	26	94.35360666	90	27	1	26.5	471.348
1854	26.16591939	26	94.35360666	90	27	1	26.5	471.348
1863	26.16591939	26	94.35360666	90	27	1	26.5	471.348
1872	26.16591939	26	94.35360666	90	27	1	26.5	471.348
1881	26.16591939	26	94.35360666	90	27	1	26.5	471.348
1890	26.16591939	26	94.35360666	90	27	1	26.5	471.348
1899	26.16591939	26	94.35360666	90	27	1	26.5	471.348
1908	26.16591939	26	94.35360666	90	27	1	26.5	471.348
1917	26.16591939	26	94.35360666	90	27	1	26.5	471.348
1926	26.16591939	26	94.35360666	90	27	1	26.5	471.348
1935	26.16591939	26	94.35360666	90	27	1	26.5	471.348
1944	26.16591939	26	94.35360666	90	27	1	26.5	471.348
1953	26.16591939	26	94.35360666	90	27	1	26.5	471.348
1962	26.16591939	26	94.35360666	90	27	1	26.5	471.348
1971	26.16591939	26	94.35360666	90	27	1	26.5	471.348
1980	25.77066682	24	93.31018386	93	26	1	26.5	471.348
1989	25.38866918	24	92.20101327	93	25	1	26.5	471.348
1998	25.17941999	24	90.48616572	93	24	1	26.5	471.348
2007	25.65372925	24	84.85850671	93	22	1	26.5	471.348
2016	29.49769286	24	75.90722255	93	17	1	26.5	471.348
2025	24.94137146	24	80.20851262	93	0	0	26.5	471.348
2034	24.94137146	24	80.20851262	93	0	0	26.5	471.348
2043	24.94137146	24	80.20851262	93	0	0	26.5	471.348
2052	24.94137146	24	80.20851262	93	0	0	26.5	471.348
2061	24.94137146	24	80.20851262	93	0	0	26.5	471.348
2070	24.94137146	24	80.20851262	93	0	0	26.5	471.348
2079	24.94137146	24	80.20851262	93	0	0	26.5	471.348
2088	24.94137146	24	80.20851262	93	0	0	26.5	471.348
2097	24.94137146	24	80.20851262	93	0	0	26.5	471.348
2106	24.94137146	24	80.20851262	93	0	0	26.5	471.348
2115	24.94137146	24	80.20851262	93	0	0	26.5	471.348
2124	24.94137146	24	80.20851262	93	0	0	26.5	471.348
2133	24.94137146	24	80.20851262	93	0	0	26.5	471.348
2142	24.94137146	24	80.20851262	93	0	0	26.5	471.348
2151	24.94137146	24	80.20851262	93	0	0	26.5	471.348
2160	22.35539032	22	100.8069129	99	22	0	26.6	488.142

## A.10. Hasil Simulasi 2 Sistem Kontrol (lanjutan 4)

**Tabel A.10.** Hasil Simulasi 2 Sistem Kontrol

Time	Td	Td_SP	RH	RH_SP	AC	HT	To	RD
2169	21.42932911	22	100.4894041	99	21	0	26.6	488.142
2178	21.42932911	22	100.4894041	99	21	0	26.6	488.142
2187	21.42932911	22	100.4894041	99	21	0	26.6	488.142
2196	21.42932911	22	100.4894041	99	21	0	26.6	488.142
2205	21.42932911	22	100.4894041	99	21	0	26.6	488.142
2214	21.42932911	22	100.4894041	99	21	0	26.6	488.142
2223	21.42932911	22	100.4894041	99	21	0	26.6	488.142
2232	21.42932911	22	100.4894041	99	21	0	26.6	488.142
2241	21.42932911	22	100.4894041	99	21	0	26.6	488.142
2250	21.42932911	22	100.4894041	99	21	0	26.6	488.142
2259	21.42932911	22	100.4894041	99	21	0	26.6	488.142
2268	21.42932911	22	100.4894041	99	21	0	26.6	488.142
2277	21.42932911	22	100.4894041	99	21	0	26.6	488.142
2286	21.42932911	22	100.4894041	99	21	0	26.6	488.142
2295	21.42932911	22	100.4894041	99	21	0	26.6	488.142
2304	21.42932911	22	100.4894041	99	21	0	26.6	488.142
2313	21.42932911	22	100.4894041	99	21	0	26.6	488.142
2322	21.42932911	22	100.4894041	99	21	0	26.6	488.142
2331	21.42932911	22	100.4894041	99	21	0	26.6	488.142
2340	20.43073126	20	99.74565416	101	20	0	26.6	488.142
2349	20.43073126	20	99.74565416	101	20	0	26.6	488.142
2358	20.43073126	20	99.74565416	101	20	0	26.6	488.142
2367	20.43073126	20	99.74565416	101	20	0	26.6	488.142
2376	20.43073126	20	99.74565416	101	20	0	26.6	488.142
2385	20.43073126	20	99.74565416	101	20	0	26.6	488.142
2394	20.43073126	20	99.74565416	101	20	0	26.6	488.142
2403	20.43073126	20	99.74565416	101	20	0	26.6	488.142
2412	20.43073126	20	99.74565416	101	20	0	26.6	488.142
2421	20.43073126	20	99.74565416	101	20	0	26.6	488.142
2430	20.43073126	20	99.74565416	101	20	0	26.6	488.142
2439	20.43073126	20	99.74565416	101	20	0	26.6	488.142
2448	20.43073126	20	99.74565416	101	20	0	26.6	488.142
2457	20.43073126	20	99.74565416	101	20	0	26.6	488.142
2466	20.43073126	20	99.74565416	101	20	0	26.6	488.142
2475	20.43073126	20	99.74565416	101	20	0	26.6	488.142
2484	20.43073126	20	99.74565416	101	20	0	26.6	488.142
2493	20.43073126	20	99.74565416	101	20	0	26.6	488.142
2502	20.43073126	20	99.74565416	101	20	0	26.6	488.142
2511	20.43073126	20	99.74565416	101	20	0	26.6	488.142
2520	18.24166167	18	99.58086518	102	18	0	26.7	504.935
2529	19.36111676	18	99.72736809	102	19	0	26.7	504.935
2538	19.36111676	18	99.72736809	102	19	0	26.7	504.935
2547	19.36111676	18	99.72736809	102	19	0	26.7	504.935
2556	19.36111676	18	99.72736809	102	19	0	26.7	504.935
2565	19.36111676	18	99.72736809	102	19	0	26.7	504.935
2574	19.36111676	18	99.72736809	102	19	0	26.7	504.935
2583	19.36111676	18	99.72736809	102	19	0	26.7	504.935
2592	19.36111676	18	99.72736809	102	19	0	26.7	504.935
2601	19.36111676	18	99.72736809	102	19	0	26.7	504.935
2610	19.36111676	18	99.72736809	102	19	0	26.7	504.935
2619	19.36111676	18	99.72736809	102	19	0	26.7	504.935
2628	19.36111676	18	99.72736809	102	19	0	26.7	504.935
2637	19.36111676	18	99.72736809	102	19	0	26.7	504.935
2646	19.36111676	18	99.72736809	102	19	0	26.7	504.935
2655	19.36111676	18	99.72736809	102	19	0	26.7	504.935
2664	19.36111676	18	99.72736809	102	19	0	26.7	504.935
2673	19.36111676	18	99.72736809	102	19	0	26.7	504.935
2682	19.36111676	18	99.72736809	102	19	0	26.7	504.935
2691	19.36111676	18	99.72736809	102	19	0	26.7	504.935
2700	18.24166167	16	99.58086518	104	18	0	26.7	504.935
2709	17.12106077	16	100.0932814	104	17	0	26.7	504.935
2718	17.12106077	16	100.0932814	104	17	0	26.7	504.935
2727	17.12106077	16	100.0932814	104	17	0	26.7	504.935
2736	17.12106077	16	100.0932814	104	17	0	26.7	504.935
2745	17.12106077	16	100.0932814	104	17	0	26.7	504.935
2754	17.12106077	16	100.0932814	104	17	0	26.7	504.935
2763	17.12106077	16	100.0932814	104	17	0	26.7	504.935
2772	17.12106077	16	100.0932814	104	17	0	26.7	504.935
2781	17.12106077	16	100.0932814	104	17	0	26.7	504.935
2790	17.12106077	16	100.0932814	104	17	0	26.7	504.935
2799	17.12106077	16	100.0932814	104	17	0	26.7	504.935
2808	17.12106077	16	100.0932814	104	17	0	26.7	504.935
2817	17.12106077	16	100.0932814	104	17	0	26.7	504.935
2826	17.12106077	16	100.0932814	104	17	0	26.7	504.935
2835	17.12106077	16	100.0932814	104	17	0	26.7	504.935
2844	17.12106077	16	100.0932814	104	17	0	26.7	504.935
2853	17.12106077	16	100.0932814	104	17	0	26.7	504.935
2862	17.12106077	16	100.0932814	104	17	0	26.7	504.935
2871	17.12106077	16	100.0932814	104	17	0	26.7	504.935
2880	17.12106077	16	100.0932814	104	17	0	26.7	504.935

## LAMPIRAN B

### LISTING PROGRAM

#### B.1. Kode Sumber Program Model JST Kontroler

```
1 % Import Data
2 data = xlsread('DataSkripsiS1Ridhan.xlsx');
3 Control_Input = data(:,5:6)';
4 Plant_Output = data(:,9:10)';
5
6 % Set up Data
7 Yp = Plant_Output; % Plant Output
8 u = Control_Input; % Manipulated Variable
9 [~,datasize] = size(Yp);
10 clear data Control_Input Load_var Plant_Output;
11
12 % Feature Scaling
13 parY = [30.31, 100; 16, 55.84];
14 [Yp, ~] = MinMaxScaler(Yp',parY);
15 Yp = Yp';
16 clear parY;
17
18 % ANN Input Output
19 normal = 2:datasize;
20 delay = 1:datasize-1;
21 X = [Yp(:,delay);Yp(:,normal);u(:,delay)]; % Feature
22 T = u(:,normal); % Target
23 clear Yp u normal delay;
24
25 % Create a Fitting Network
26 hiddenLayerSize = 35;
27 netC = feedforwardnet(hiddenLayerSize);
28
29 % Choose a Training Function
30 netC.trainFcn = 'trainlm'; % Levenberg-Marquardt
    backpropagation.
31
32 % Choose Input and Output Pre/Post-Processing Functions
33 % For a list of all processing functions type: help
    nnprocess
```

```

34 netC.input.processFcns = {'removeconstantrows','
    mapminmax'};
35 netC.output.processFcns = {'removeconstantrows','
    mapminmax'};
36
37 % Setup Division of Data for Training, Validation,
    Testing
38 % For a list of all data division functions type: help
    nndivision
39 netC.divideFcn = 'dividerand'; % Divide data randomly
40 netC.divideMode = 'sample'; % Divide up every sample
41 netC.divideParam.trainRatio = 80/100;
42 netC.divideParam.valRatio = 10/100;
43 netC.divideParam.testRatio = 10/100;
44
45 % Choose activation functions
46 netC.layers{1}.transferFcn = 'tansig';
47 netC.layers{2}.transferFcn = 'purelin';
48
49 % Choose a Performance Function
50 % For a list of all performance functions type: help
    nnperformance
51 netC.performFcn = 'mse'; % Mean Squared Error
52
53 % Choose Plot Functions
54 % For a list of all plot functions type: help nnplot
55 netC.plotFcns = {'plotperform','plottrainstate','
    ploterrhist', ...
56 'plotregression', 'plotfit'};
57
58 % Train the Network
59 [netC, tr] = train(netC,X,T);
60
61 % Test the Network
62 u = netC(X);
63
64 % Network Performance
65 e = gsubtract(T,u);
66 MAE = mean(abs(e),2);
67 MAE_All = mean(MAE);
68 MSE = mean(e.^2,2);
69 MSE_All = perform(netC,T,u);
70 MSE_Relatif = mean(e/T,2);

```

```

71 MSE_Std = std(e,0,2);
72
73 % Correlation Coefficient
74 [~,~,R_AC] = postreg(T(1,:),u(1,:));
75 [~,~,R_HT] = postreg(T(2,:),u(2,:));
76 [~,~,R_All] = postreg(T,u);
77 R = [R_AC,R_HT];
78 clear R_AC R_HT;
79
80 % Recalculate Training, Validation and Test Performance
81 trainTargets = T .* tr.trainMask{1};
82 valTargets = T .* tr.valMask{1};
83 testTargets = T .* tr.testMask{1};
84 All_MSETrain = perform(netC,trainTargets,u);
85 All_MSEVal = perform(netC,valTargets,u);
86 All_MSETest = perform(netC,testTargets,u);

```

## B.2. Fungsi Min Max Scaler

```

1 function [newx, par] = MinMaxScaler(x, parx)
2     if (parx == 0)
3         newx = ( x - min(x) ) ./ ( max(x) - min(x) );
4         par = [[max(x)]; [min(x)]];
5     else
6         maxx = parx(1,:);
7         minx = parx(2,:);
8         newx = ( x - minx ) ./ ( maxx - minx );
9         par = parx;
10    end
11 end

```

## B.3. Fungsi Kuantisasi AC

```

1 function y = QuantizationAC(u)
2     AC = round(u);
3     if (AC < 12)
4         y = 0;
5     elseif (AC <= 16)
6         y = 16;
7     elseif (AC >= 30)

```



```

8      y = 30;
9      else
10     y = AC;
11 end

```

#### B.4. Fungsi Kuantisasi Heater

```

1 function y = QuantizationHT(u)
2     HT = round(u);
3     if (HT < 1)
4         y = 0;
5     elseif (HT > 2)
6         y = 2;
7     else
8         y = HT;
9 end

```

#### B.5. Fungsi Penskalaan Suhu Ruang

```

1 function y = ScalerTd(u)
2     maxTd = 30.31;
3     minTd = 16;
4     y = ( u - minTd ) ./ ( maxTd - minTd );

```

#### B.6. Fungsi Penskalaan Kelembapan Relatif

```

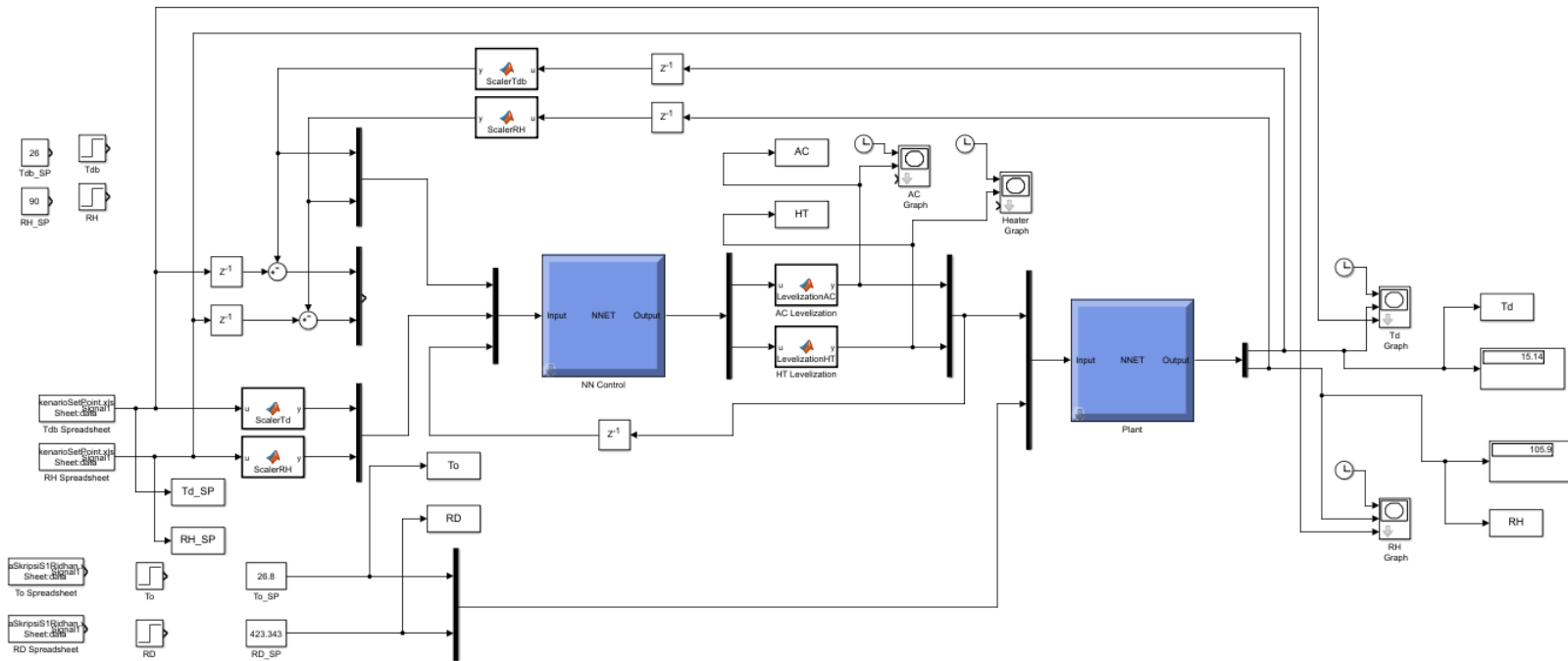
1 function y = ScalerRH(u)
2     maxRH = 100;
3     minRH = 55.84;
4     y = ( u - minRH ) ./ ( maxRH - minRH );

```

## LAMPIRAN C

### DIAGRAM BLOK

#### C.1. Diagram Blok Rancangan Sistem Kontrol Simulink



**Gambar C.1.** Diagram Blok Rancangan Sistem Kontrol Simulink