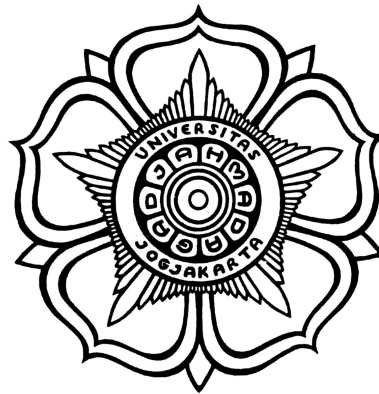


**PERANCANGAN KONTROLER LINGKUNGAN TERMAL
CLIMATE CHAMBER BERBASIS JARINGAN SARAF TIRUAN**

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, 10 Agustus 2020
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 **13 Agustus 2020**

Susunan Tim Penguji

Ketua Sidang

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

Penguji Utama

Anggota Penguji

Nama Lengkap Penguji Utama
NIP. XXXXXXXXX XXXXXX X XXX

Nama Lengkap Anggota Penguji
NIP. XXXXXXXXX XXXXXX X XXX

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 memohon 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, Januari 2020

Ridhan Fadhilah

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
HALAMAN TUGAS	iv
HALAMAN PERSEMBAHAN	v
HALAMAN MOTTO	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN	xvi
INTISARI	xviii
ABSTRACT	xix
I. PENDAHULUAN	1
I.1. Latar Belakang	1
I.2. Perumusan Masalah	3
I.3. Tujuan	4
I.4. Batasan Masalah	4
I.5. Manfaat	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
II.1. Pengkondisian Lingkungan Termal pada <i>Climate Chamber</i>	6

II.2.	Kontrol Jaringan Saraf Tiruan	10
III.	DASAR TEORI	13
III.1.	Lingkungan Termal	13
III.1.1.	Parameter Lingkungan Termal	13
III.1.2.	<i>Climate Chamber</i>	14
III.1.3.	Perpindahan Kalor pada Bangunan	16
III.2.	Kontrol Otomatis	20
III.2.1.	Dasar-dasar Ilmu Kontrol	20
III.2.2.	Kesalahan Keadaan-Ajeg	23
III.3.	Jaringan Saraf Tiruan	24
III.3.1.	Model Matematis Neuron	25
III.3.2.	Jaringan Layar Jamak (MLP)	29
III.4.	Kontrol Jaringan Saraf Tiruan	34
IV.	PELAKSANAAN PENELITIAN	36
IV.1.	Alat dan Bahan Penelitian	36
IV.2.	Tata Laksana Penelitian	37
IV.2.1.	Studi Pustaka	38
IV.2.2.	Penentuan Tuntutan Rancangan	38
IV.2.3.	Pengambilan Data Simulasi IES-VE	38
IV.2.4.	Model <i>Plant</i> JST	44
IV.2.5.	Perancangan Kontrol berbasis JST	45
IV.2.6.	Penarikan Kesimpulan	46
IV.3.	Rencana Analisis Hasil Penelitian	46
V.	HASIL DAN PEMBAHASAN	47
V.1.	Model Plant JST	47

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.	Rancangan Model JST Kontroler	51
V.3.	Hasil Simulasi Kontrol SIMULINK	52
V.3.1.	Skenario Simulasi Proses Pemanasan Pendinginan <i>Climate Chamber</i>	52
VI.	KESIMPULAN DAN SARAN	55
VI.1.	Kesimpulan	55
VI.2.	Saran	55
LAMPIRAN		
A.	Data Penelitian	60
A.1.	Data Simulasi IES-VE	60
A.2.	Bobot-bobot Model JST Kontroler	61
A.3.	Hasil Simulasi Sistem Kontrol	62
A.4.	Hasil Simulasi Sistem Kontrol (lanjutan 2)	63
A.5.	Hasil Simulasi Sistem Kontrol (lanjutan 3)	64
A.6.	Hasil Simulasi Sistem Kontrol (lanjutan 4)	65
B.	Listing Program	66
B.1.	Kode Sumber Program Model JST Kontroler	66
B.2.	Fungsi Min Max Scaler	68
B.3.	Fungsi Kuantisasi AC	69
B.4.	Fungsi Kuantisasi Heater	69
B.5.	Fungsi Penskalaan Suhu Ruang	69

B.6.	Fungsi Penskalaan Kelembapan Relatif	69
C.	Diagram Blok	71
C.1.	Diagram Blok Rancangan Sistem Kontrol Simulink	71

DAFTAR TABEL

2.1. Pengkondisian Lingkungan Termal pada <i>Climate Chamber</i>	9
2.2. Tinjauan Pustaka Kontrol JST	12
3.1. Perbandingan metode kontrol [1]	34
4.1. Daftar alat dan bahan	36
4.2. Spesifikasi laptop ASUS N550JX	36
5.1. Tabel Rancangan Model Plant JST[2]	48
5.2. Tabel Daftar Variasi Pembagian Data	48
5.3. Tabel Rancangan Kontroler JST (<i>NN Inverse Model</i>)	51
A.1. Data Simulasi IES-VE	60
A.2. Bobot-bobot Model JST Kontroler	61
A.3. Hasil Simulasi Sistem Kontrol	62
A.4. Hasil Simulasi Sistem Kontrol	63
A.5. Hasil Simulasi Sistem Kontrol	64
A.6. Hasil Simulasi Sistem Kontrol	65

DAFTAR GAMBAR

1.1. Penggunaan energi final per sektor di Indonesia, 2000 dan 2015 [3]	1
3.1. Pertukaran kalor bangunan dengan lingkungan[4]	18
3.2. Skema keseimbangan proses perpindahan panas dalam bangunan[4]	19
3.3. Sistem dengan a. kesalahan keadaan-ajeg bernilai terbatas untuk input fungsi step; b. kesalahan keadaan-ajeg nol untuk input fungsi step [5]	23
3.4. Anatomi neuron [6]	24
3.5. Model matematis neuron [6]	25
3.6. Fungsi-fungsi aktivasi [6]	26
3.7. Jaringan layar tunggal [6]	28
3.8. Jaringan 2 layar [6]	30
3.9. Taksonomi metode kontrol klasik vs modern [6]	35
4.1. Bagan Tata Laksana Penelitian	37
4.2. Posisi Komponen-Komponen di dalam <i>Climate Chamber</i>	39
4.3. Perangkat AC	40
4.4. Perangkat Heater	40
4.5. Skenario Pengambilan Data	42
4.6. Data Konfigurasi AC dan <i>Heater</i> pada Simulasi ISE-VE	43
4.7. Variabel Gangguan Simulasi ISE-VE	43
4.8. Data Hasil Simulasi ISE-VE	44
4.9. Arsitektur Model Plant JST	44
4.10. Diagram blok sistem kontrol berbasis JST[7]	45
4.11. Pasangan masukan dan keluaran model JST kontroler	45

5.1. Diagram Blok Plant	47
5.2. Diagram blok sistem kontrol berbasis JST	47
5.3. Grafik Variasi Pembagian Data	49
5.4. Grafik Persebaran MSE Variasi Arsitektur JST Kontroler	50
5.5. Grafik Persebaran MSE Variasi Arsitektur JST Kontroler	50
5.6. Grafik Hasil Simulasi Simulink untuk Suhu Ruang	52
5.7. Grafik Hasil Simulasi Simulink untuk Kelembapan Relatif	53
5.8. Grafik Variabel Manipulasi AC pada Simulasi Simulink	53
5.9. Grafik Variabel Manipulasi <i>Heater</i> pada Simulasi Simulink	53
C.1. Diagram Blok Rancangan Sistem Kontrol Simulink	71

DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN

Lambang Romawi

<i>Lambang</i>	<i>Kuantitas</i>	<i>Satuan</i>
T_{db}	Suhu Ruang (Dry-Bulb Temperature)	°C
RH	Kelembapan Relatif	%
T_o	Suhu Lingkungan (Dry-Bulb Temperature)	°C
RD	Intensitas Radiasi Global Matahari	W/m ²
AC	SET AC	°C
HT	SET Heater	ON
t	Waktu	detik
f	Frekuensi	Hertz
R	Koefisien Korelasi	%
\mathbb{R}	Domain Bilangan Riil	
$R(s)$	Input Sistem Kontrol	
$C(s)$	Output Sistem Kontrol	
$E(s)$	Error Sistem Kontrol	
K	Gain Konstan	
$T(s)$	Fungsi Gain Kalang Tertutup	
$G(s)$	Fungsi Gain Kalang Tertutup Umpan Balik Satuan	
x	Lapisan Input Jaringan Saraf Tiruan	
y	Lapisan Output Jaringan Saraf Tiruan	
z	Lapisan Tersembunyi Jaringan Saraf Tiruan	

Lambang Yunani

<i>Lambang</i>	<i>Kuantitas</i>	<i>Satuan</i>
ν	Bobot Jaringan Saraf Tiruan	
σ	Fungsi Aktivasi Neuron	

Subskrip

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

Superskrip

<i>Lambang</i>	<i>Deskripsi</i>
n	Dimensi n
T	Fungsi Tranpos Vektor/Matrix

Singkatan

ANN	Artificial Neural Network
DBT	Dry-Bulb Temperature
IES VE	Integrated Environmental Solutions Virtual Environment
IMC	Internal Model Control
JST	Jaringan Saraf Tiruan
MRT	Mean Radiant Temperature
MAE	Mean Absoulte Error
MSE	Mean Squared Error
NN	Neural Network

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 **13 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 termal) untuk dapat dikondisikan secara otomatis sesuai dengan skema pengujian penelitian. Dengan menggunakan data dari Simulasi IES-VE[4] dan model *plant*[2] pada penelitian sebelumnya, dalam penelitian ini 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 JST dibangun dengan menggunakan MATLAB dan disimulasikan dengan menggunakan Simulink. JST Kontroler dibangun dengan pembagian data 80% data latih, 10% data validasi, dan 10% data uji. JST Kontroler menggunakan fungsi aktivasi *hyperbolic tangent* dengan algoritma pembelajaran Levenberg-Marquardt. 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 CLIMATE CHAMBER THERMAL ENVIRONMENT CONTROLLER BASED ON ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

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 13, 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. By using data from the IES-VE simulation[4] and plant model[2] in the previous research, this research designed a controller based on Artificial Neural Network (ANN) to control air temperature (Tdb) 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.

The ANN 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.

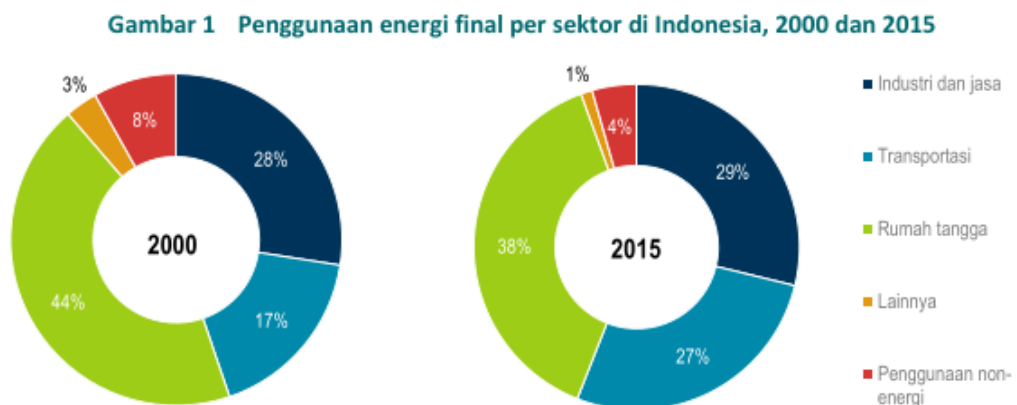
Co-supervisor: Ir. Agus Arif, M.T.

BAB I

PENDAHULUAN

I.1. Latar Belakang

Indonesia merupakan pengguna energi terbesar di Asia Tenggara antara tahun 2000 dan 2015, yaitu lebih dari 36% penggunaan energi primer Asia Tenggara. Antara tahun 2000 dan 2015, produk domestik bruto (PDB) Indonesia bertambah dua kali lipat dan kebutuhan listrik meningkat 150%. Pertumbuhan ekonomi mendorong peningkatan kebutuhan energi Indonesia. Pengguna energi terbesar Indonesia tahun 2015 adalah sektor rumah tangga (38%) dan industri dan jasa (29%), diikuti oleh transportasi (27%) (Gambar 1.1). Efisiensi sangat penting dilakukan untuk menghe-



Gambar 1.1. Penggunaan energi final per sektor di Indonesia, 2000 dan 2015 [3]

mat energi. Penggunaan teknologi penyejuk ruangan yang lebih efisien diperkirakan mampu menghemat tagihan pelanggan listrik USD 690 juta per tahun di tahun 2030. Kebutuhan penyejuk ruangan tumbuh cepat dan diperkirakan bertambah dua kali lipat antara tahun 2016 dan 2020 [3].

Ruangan pada setiap bangunan umumnya menggunakan penyejuk ruangan

atau *Air Conditioner* (AC) untuk mencapai kondisi yang nyaman bagi penghuni di dalamnya. Padahal hal tersebut belum tentu tepat. Sesungguhnya, penghuni tidak menginginkan kondisi ruang yang lebih dingin ataupun lebih panas dari keadaan awalnya. Penghuni ruang menginginkan kondisi ruangan yang nyaman bagi tubuh mereka. Kondisi ini yang disebut sebagai kenyamanan termal. Kenyamanan termal yang dimaksud tidaklah sesederhana upaya untuk menurunkan suhu di suatu ruangan. Kenyamanan termal bergantung juga kepada sensasi termal tubuh manusia. Dengan demikian, kebutuhan energi dalam pemenuhan kenyamanan termal tersebut dapat dikatakan cukup tinggi.

Kenyamanan termal didefinisikan sebagai kondisi pikiran yang mengekspresikan kepuasan terhadap lingkungan termal [8]. 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 dimana respon fisiologis tubuh berupaya untuk mempertahankan suhu inti tubuh agar tetap bernilai konstan. Untuk mempelajari respon fisiologis tersebut, dibutuhkan sebuah *climate chamber* dimana kondisi iklim di dalamnya dapat dikendalikan sesuai dengan kebutuhan penelitian.

I.2. Perumusan Masalah

Pada penelitian ini studi kasus diambil pada *climate chamber* di Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika (DTNTF) Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada (FT-UGM) yang digunakan sebagai ruang uji penelitian kenyamanan termal. *Climate chamber* DTNTF dilengkapi dengan 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 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 membutuhkan 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 [8].

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*).

Berdasarkan hal tersebut, permasalahan yang penulis angkat yaitu bagaimana rancangan model kontroler berbasis jaringan saraf tiruan yang optimal dengan meninjau nilai *steady-state error* untuk mengendalikan lingkungan termal pada *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. Model *plant* menggunakan model berbasis jaringan saraf tiruan yang dibuat oleh Tri Hartanto[2].
2. Kinerja kontroler hanya ditinjau melalui nilai *steady-state error* karena secara fisis respon transien termal pada bangunan berlangsung cukup lama.
3. Perancangan kontroler dilakukan pada aplikasi MATLAB karena memiliki fitur JST dan dianggap mudah untuk menjalankan simulasi sistem kendali pada SIMULINK.

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 [9] [10] dan bidang lingkungan [11]. Variabel lingkungan termal dalam *climate chamber* berfungsi sebagai stimulan pada objek penelitian untuk meneliti sensasi dan/atau sensitivitas termal.

Pada penelitian Arens[9], 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 J. Y. Lee[10] 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 le-

bih 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°C *operative temperature*.

Penelitian Veronica[11] 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 Nur Muna Nadiya[12], 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 kelembaban 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 [9]	E. Arens, H. Zhang, dan C. 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 [10]	J. Y. Lee, Mohamed 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 [11]	V. Soebarto, H. Zhang, dan S. 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 [12]	Nur Muna Nadiya	<i>Climate Chamber</i> DTNTF FT UGM	Suhu ruang	<i>Climate chamber</i> digunakan sebagai prasarana penelitian sensasi dan kenyamanan termal bangunan	Suhu bervariasi naik turun (16°C-30°C) dengan lompatan 1°C
2020	Penelitian ini	<i>Climate Chamber</i> DTNTF FT UGM	Suhu ruang (Tdb) dan kelembapan relatif (RH)	<i>Climate chamber</i> merupakan objek penelitian yang akan dikendalikan	Suhu bervariasi naik turun (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 [13][14] dan bangunan residensial [15]. 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) [15]. Dengan kata lain, penggunaan metode jaringan saraf tiruan untuk kontroler memang sudah terbukti cukup baik.

Jin Woo Moon dan Jong-Jin Kim melakukan penelitian mengenai model kontrol termal berbasis jaringan saraf tiruan untuk bangunan residensial. Tipe bangunan yang digunakan merupakan sebuah rumah di Amerika. Jin Woo Moon dan Jong-Kin 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 [13].

Studi perbandingan metode kontrol termal bangunan berbasis jaringan saraf tiruan dilakukan oleh Jin Woo Moon, Sung Kwon Jung, Youngchul Kim, dan Seung-Hoon 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*). Pa-

da penelitian tersebut ANN dan ANFIS lebih mendekati set point yang ditentukan ($21,5^{\circ}\text{C}$ untuk musim dingin dan $24,5^{\circ}\text{C}$ 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) [14].

Penelitian sistem kontrol bangunan diteliti oleh Ján Drgona 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 [15].

Pada penelitian ini perancangan controller 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 [13]	Jin Woo Moon dan Jong-Jin 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 [14]	Jin Woo Moon, Sung Kwon 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 [15]	Ján Drgona, 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 (Tdb) dan kelembapan relatif (RH)	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 [8] atau aspek-aspek lingkungan fisik individu atau populasi yang secara langsung mempengaruhi potensi pertukaran panas antara subjek atau populasi dan lingkungannya [16]. Lingkungan yang dimaksud di sini yaitu segala sesuatu yang mengelilingi objek, organisme, ataupun populasi yang diteliti kenyamanannya (kenyamanan termal).

III.1.1. Parameter Lingkungan Termal

Kualitas lingkungan termal dapat ditentukan berdasarkan beberapa parameter. Beberapa penelitian kualitas lingkungan termal secara umum menggunakan empat parameter meteorologis, yakni suhu, kelembapan relatif, kecepatan angin, dan radiasi matahari [16].

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 dimana 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, kimia, *engineering*, ilmu lingkungan, dsb. Variabel lingkungan termal yang dikontrol di dalam *climate chamber* pun berbeda-beda menyesuaikan tujuan dan metode penelitian. Variabel-variabel yang biasa diteliti yaitu seperti variabel suhu, kelembaban udara, tekanan udara, dsb.

Variabel lingkungan termal di dalam *climate chamber* harus dapat dikendalikan nilainya sesuai dengan bagaimana penelitian akan dijalankan. Terdapat penelitian yang menginginkan variabel lingkungan termal terkontrol pada *set point* tertentu dengan akurasi yang tinggi dan distribusi yang merata di titik-titik dalam *climate chamber*[17]. Terdapat pula penelitian yang tidak perlu memiliki pengendalian variabel lingkungan termal dengan akurasi yang tinggi, namun dengan rentang nilai variabel lingkungan termal yang lebar dan nilai tersebut dapat dijaga dalam rentang waktu yang lama[18][19][20][21], serta terdapat penelitian yang menginginkan waktu perubahan variabel lingkungan termal dalam *climate chamber* yang cepat[22].

Pada penelitian-penelitian yang menggunakan *climate chamber*, ingin diketahui pengaruh dari variabel lingkungan termal yang dipapar ke objek penelitian (manusia) pada rentang waktu tertentu sesuai dengan *set-up* penelitian. Bagaimana pengaruh ini akan memberikan efek ke objek penelitian (manusia) yang dipapar oleh variabel lingkungan termal inilah yang akan diteliti lebih lanjut pada penelitian tersebut. Pengaruh dari paparan variabel lingkungan termal pada objek penelitian bisa berupa perubahan secara fisis ataupun secara kimiawi, sehingga untuk mengetahui bagaimana pengaruhnya harus dilakukan penelitian lebih lanjut.

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°C sampai 50°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:[4]

1. *Dry-Bulb Temperature* (Tdb)

Tdb (disebut juga sebagai suhu udara) merupakan ukuran suhu yang menggambarkan sifat dari udara yang umum digunakan. Tdb dapat diukur dengan menggunakan termometer biasa.

2. *Wet-Bulb Temperature* (Twb)

Twb merupakan ukuran suhu yang menggambarkan sifat yang berhubungan dengan kandungan uap air di udara. Twb selalu lebih rendah dengan Tdb. Twb dapat diukur dengan termometer yang dilapisi kain basah.

3. *Dew Point Temperature* (Tdp)

Tdp 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

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

dimana m_w = massa uap air; m_a = massa udara kering.

5. Kelembaban 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. Kelembaban relatif menggunakan satuan persen dan dihitung menggunakan Persamaan 3.2.

$$x = \frac{P_{sw}}{P_s(T)} \quad (3.2)$$

dimana P_{sw} = tekanan parsial uap air; $P_s(T)$ = 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[23]. 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:[24]

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. Konveksi pada dasarnya adalah konsekuensi dari gerakan (tran-

sfer 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:[24]

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.

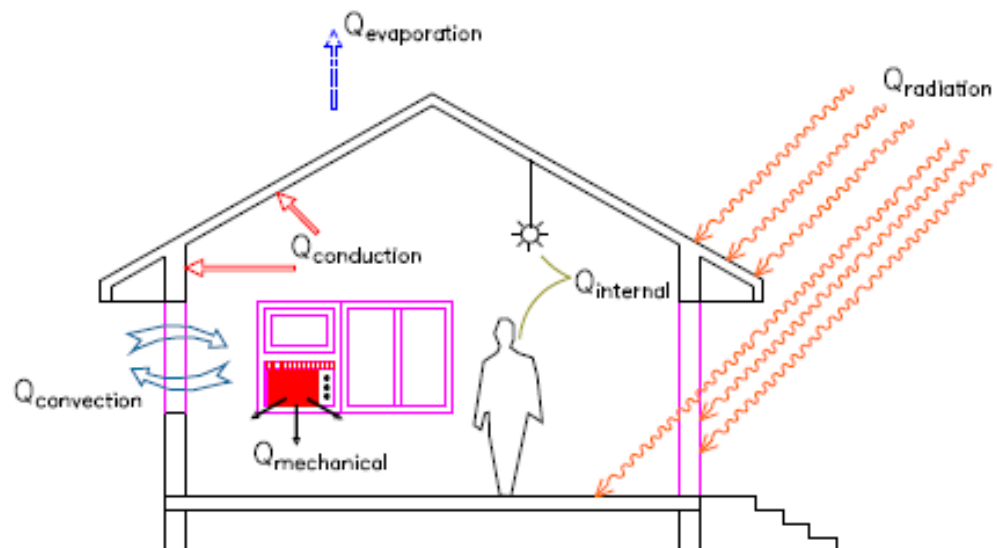
Simbol: Φ ; satuan: [J/s] = [W] (Joule per second = Watt)

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_Φ, q_{θ} 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.[4]



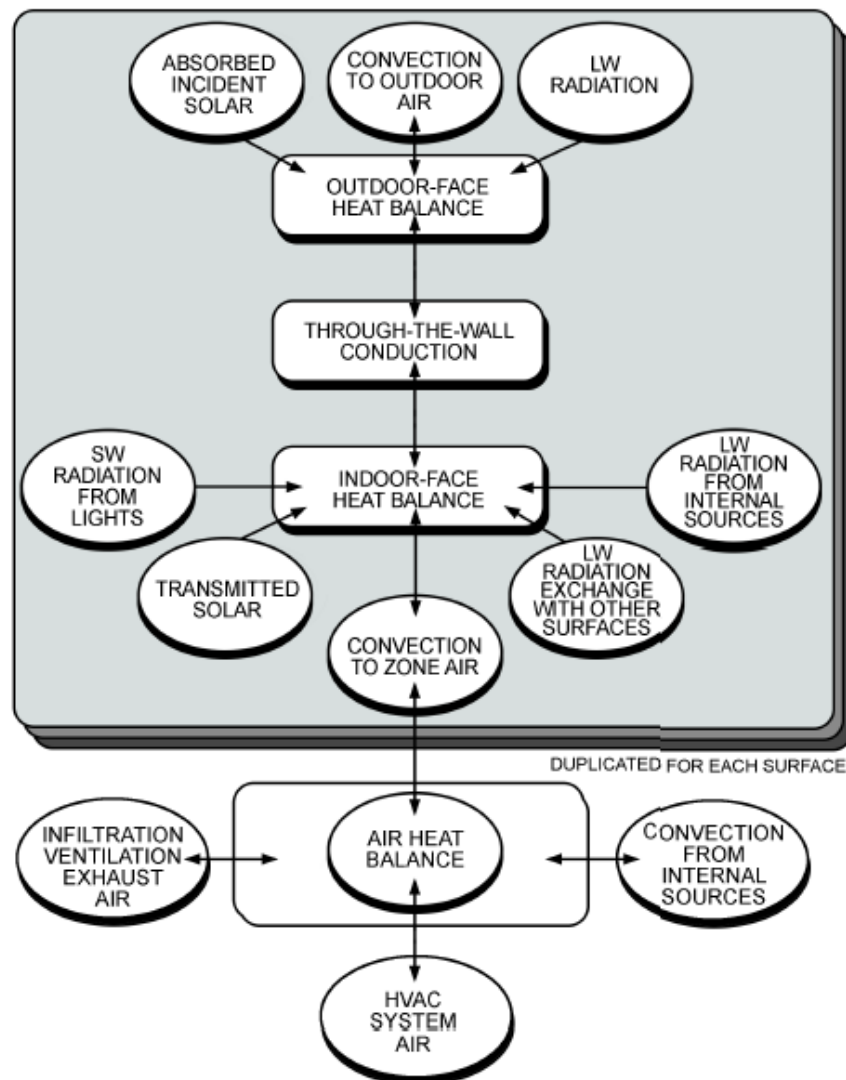
Gambar 3.1. Pertukaran kalor bangunan dengan lingkungan[4]

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

Keempat proses perpindahan kalor ini diringkas pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2. Skema keseimbangan proses perpindahan panas dalam bangunan[4]

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.

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.

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. [5]

Sistem kontrol merupakan hal yang dinamis. Sistem akan memberikan respon terhadap input yang diberikan, dimana 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: [5]

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.[5]

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: [5]

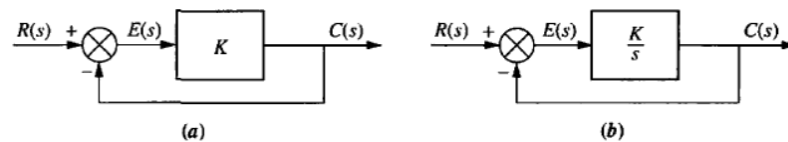
1. Pemodelan sistem
2. Analisis sistem

3. Perancangan kontroler
4. Penerapan kontroler dan pengujian

III.2.2. Kesalahan Keadaan-Ajeg

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.[5]

kesalahan keadaan-ajeg 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.

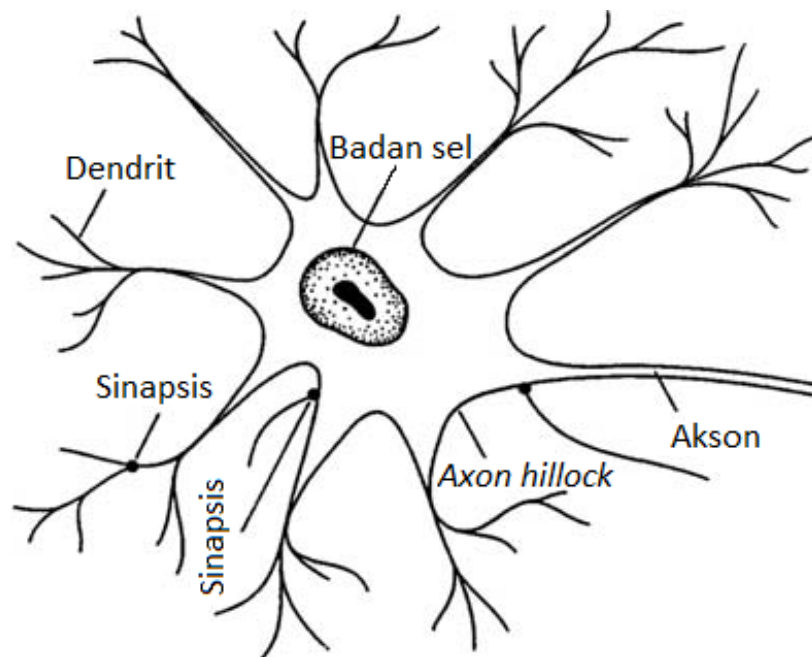


Gambar 3.3. Sistem dengan **a.** kesalahan keadaan-ajeg bernilai terbatas untuk input fungsi step; **b.** kesalahan keadaan-ajeg nol untuk input fungsi step [5]

Contohnya, amati Gambar 3.3(a) dimana $R(s)$ 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

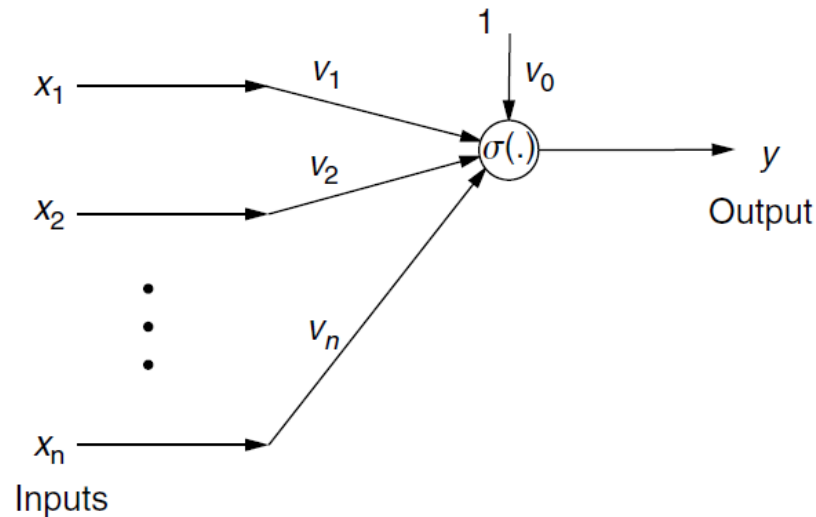
Jaringan Saraf Tiruan (JST) dimodelkan dengan mengadaptasi proses biologis untuk pemrosesan informasi, termasuk secara khusus sistem saraf dan unit dasarnya, neuron (sel saraf). Sinyal didistribusikan dalam bentuk beda potensial antara bagian dalam dan luar sel. Komponen sel saraf (neuron) ditunjukkan pada Gambar 3.4. Dendrit membawa sinyal dari neuron lain ke dalam badan sel (soma), kemungkinan dengan memperkalikan setiap sinyal yang masuk dengan koefisien pembobotan pengiriman.[6]



Gambar 3.4. Anatomi neuron [6]

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 pele-

pasan kimiawi *neurotransmitter* melintasi celah antar sel, dan dapat berupa *excitatory* (kecenderungan dalam pengaktifan neuron berikutnya) atau *inhibitory* (kecenderungan dalam mencegah pengaktifan neuron berikutnya) [6].



Gambar 3.5. Model matematis neuron [6]

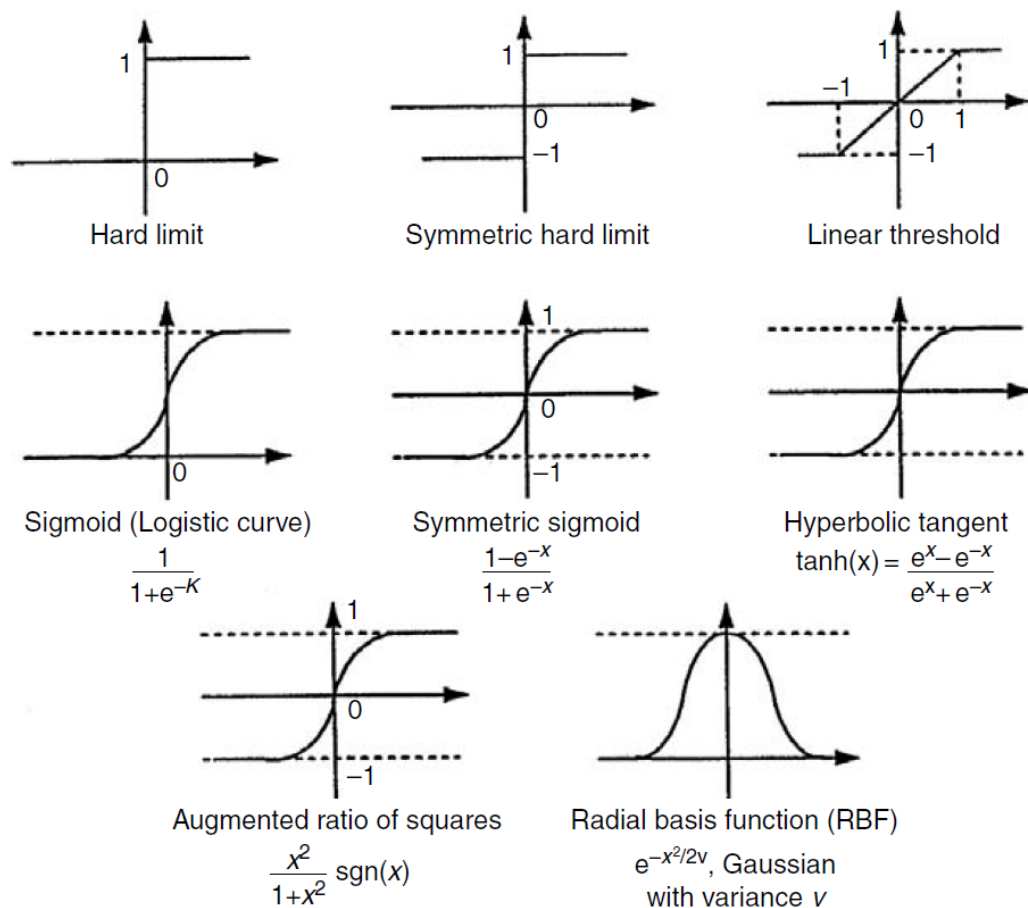
III.3.1. Model Matematis Neuron

Model matematis dari suatu neuron dilukiskan oleh Gambar 3.5, 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 $kx_1(k), kx_2(k), kx_3(k), \dots, x_n(k)$ dan outputnya adalah nilai skalar $y(k)$, yang dapat dinyatakan sebagai

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

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. [6]

Fungsi sel nonlinear dikenal sebagai fungsi aktivasi. Fungsi aktivasi dipilih secara khusus untuk aplikasi-aplikasi meskipun beberapa pilihan yg umum diilustrasikan pada Gambar 3.6. Intensi pada fungsi aktivasi adalah untuk memodelkan perilaku nonlinier suatu sel dimana 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 3.6. Fungsi-fungsi aktivasi [6]

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.[6]

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

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

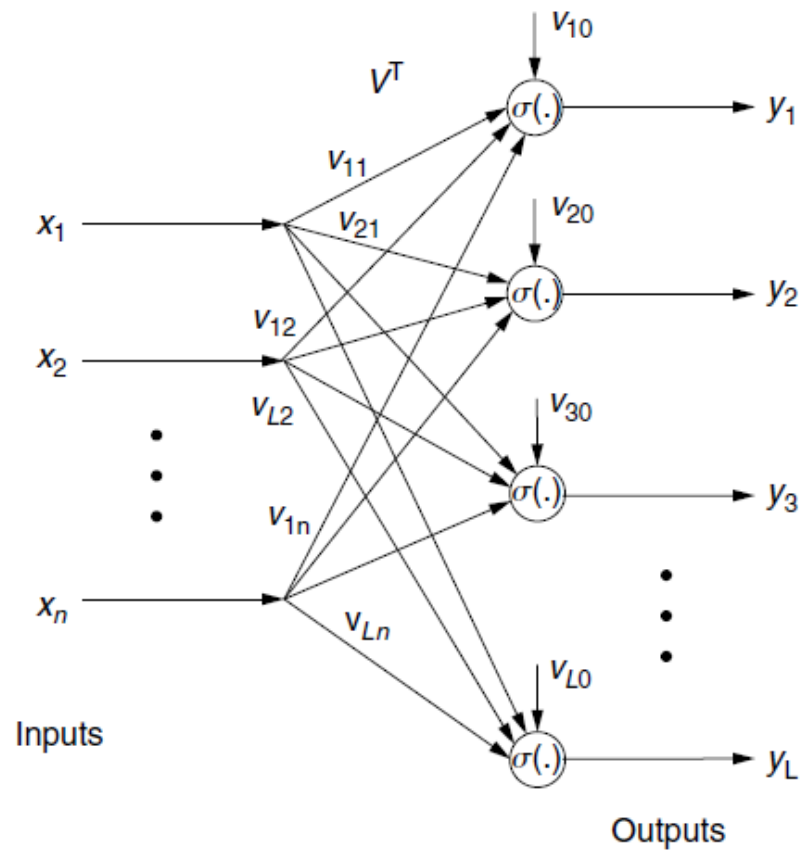
yang dapat juga ditulis sebagai

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

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 3.7 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



Gambar 3.7. Jaringan layar tunggal [6]

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

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

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

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

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

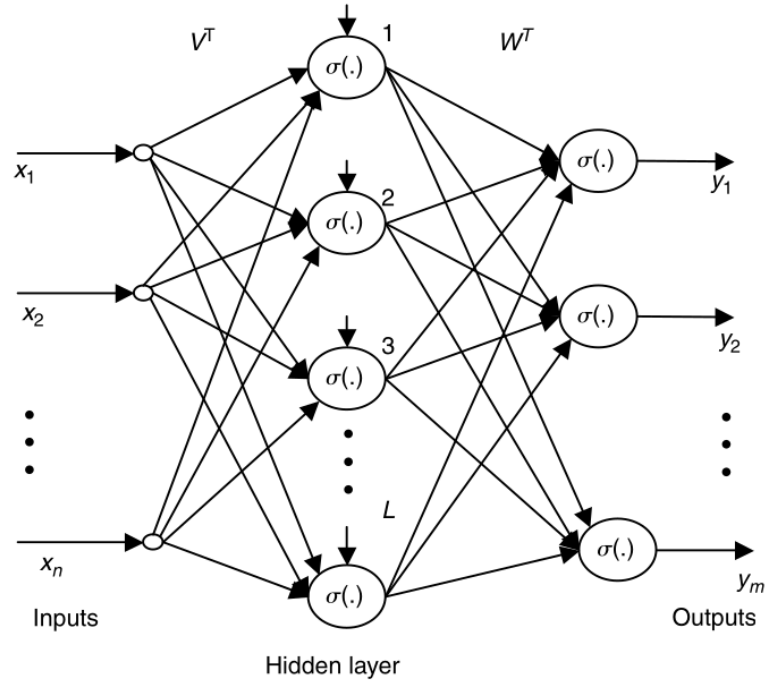
Kemudian output JST dapat digambarkan dalam bentuk vektor *augmented* input $x(k)$ sebagai

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

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 lapisan kedua yang memiliki m buah neuron, digambarkan pada Gambar 3.8. 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 mene-

rapkan operasi digital seperti AND, OR, dan COMPLEMENT. Namun, penelitian



Gambar 3.8. Jaringan 2 layer [6]

mengenai JST telah dihentikan bertahun-tahun yang lalu ketika ditunjukkan bahwa jaringan layer 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. [6]

Output jaringan 2 layer 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_l dapat ditulis sebagai berikut

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

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 Persa-

maan (3.11). Dalam Persamaan (3.19) perlu digunakan vektor *augmented*

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

dimana 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

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

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

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

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*[25]. 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 dikemu-

dian 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:

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

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

dimana:

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.[25]

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*.

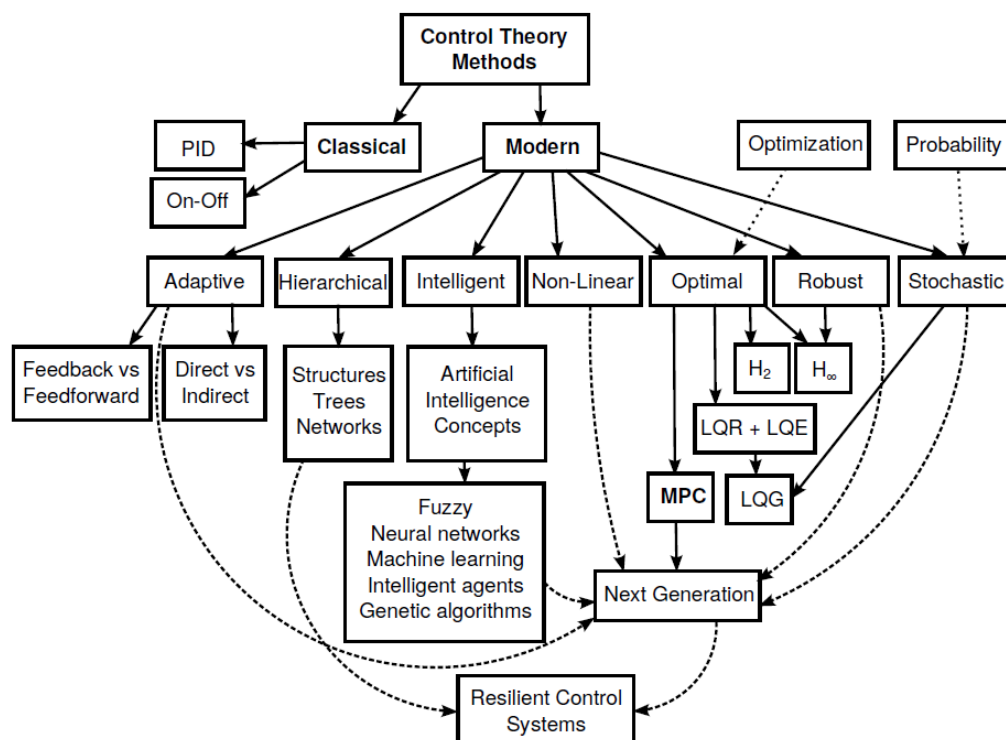
Tabel 3.1. Perbandingan metode kontrol [1]

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 menggunakan 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.[1]

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.[1]

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 3.9. Berdasarkan taksonomi yang digambarkan pada Gambar 3.9, dapat dilihat bahwa Jaringan Saraf Tiruan (*Neural networks*) merupakan salah satu metode kontrol modern.



Gambar 3.9. Taksonomi metode kontrol klasik vs modern [6]

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

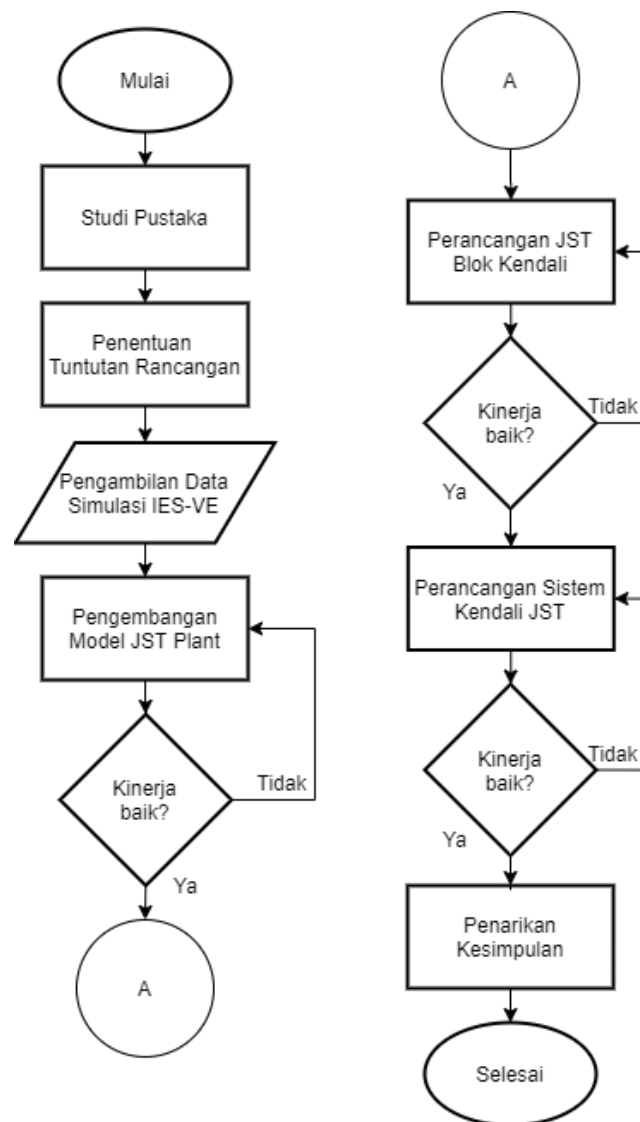
No.	Nama alat/bahan	Fungsi
1	ASUS N550JX	Perangkat komputer
2	<i>Climate Chamber</i>	Objek penelitian
3	IES-VE 2019	Perangkat lunak untuk pengambilan data lingkungan termal <i>climate chamber</i> dan variasi gangguan
4	MS Excel 365	Perangkat lunak pengolahan data tabular
5	MATLAB R2018a	Perangkat lunak 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

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* dengan kinerja seoptimal mungkin. Kinerja kontroler ditinjau dari nilai *steady-state error* suhu ruang dan kelembapan relatif. Semakin kecil nilai *error steady-state* kontroler maka semakin baik kinerjanya.

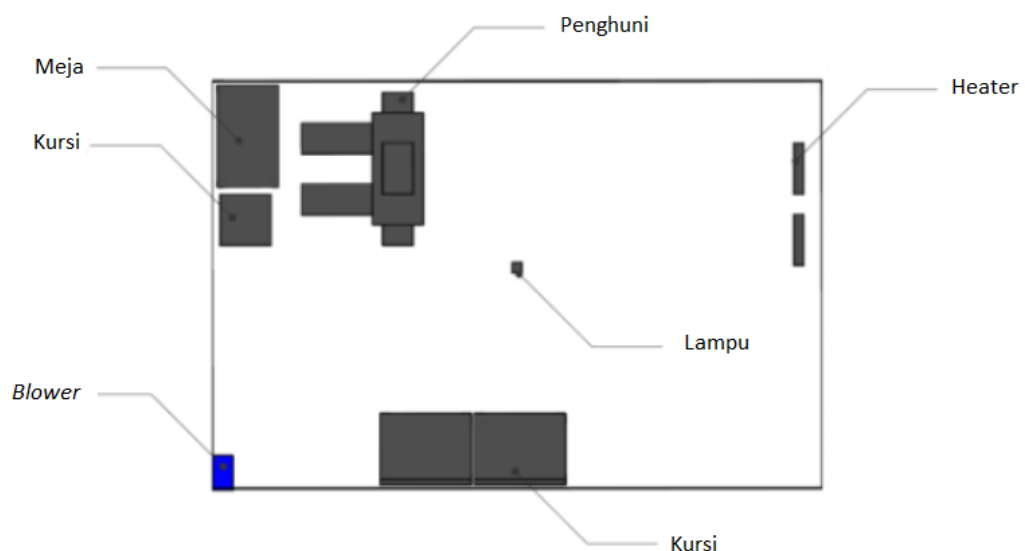
IV.2.3. Pengambilan Data Simulasi IES-VE

Penelitian ini menggunakan data yang sama dengan data yang digunakan oleh penelitian Tri Hartanto[2] yang 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 Ichfan Kurniawan [4]. 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*. Vari-

asi kondisi batas lingkungan tersebut diwujudkan 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 [4]. Data yang sudah terkumpul disajikan dalam bentuk tabular yang kemudian diolah dalam program komputer yang dibuat.

IV.2.3.3. 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*



Gambar 4.3. Perangkat AC

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 4.4. Perangkat Heater

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

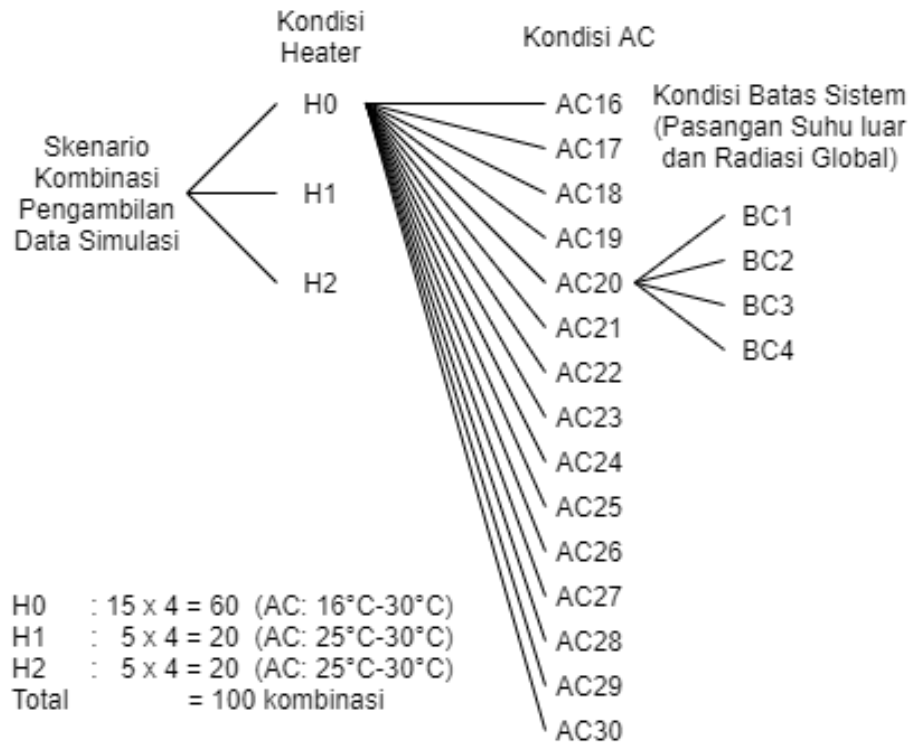
perangkat pemanas. Penampakan wujud *heater* dapat dilihat pada Gambar 4.4.

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*.

IV.2.3.3. 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.

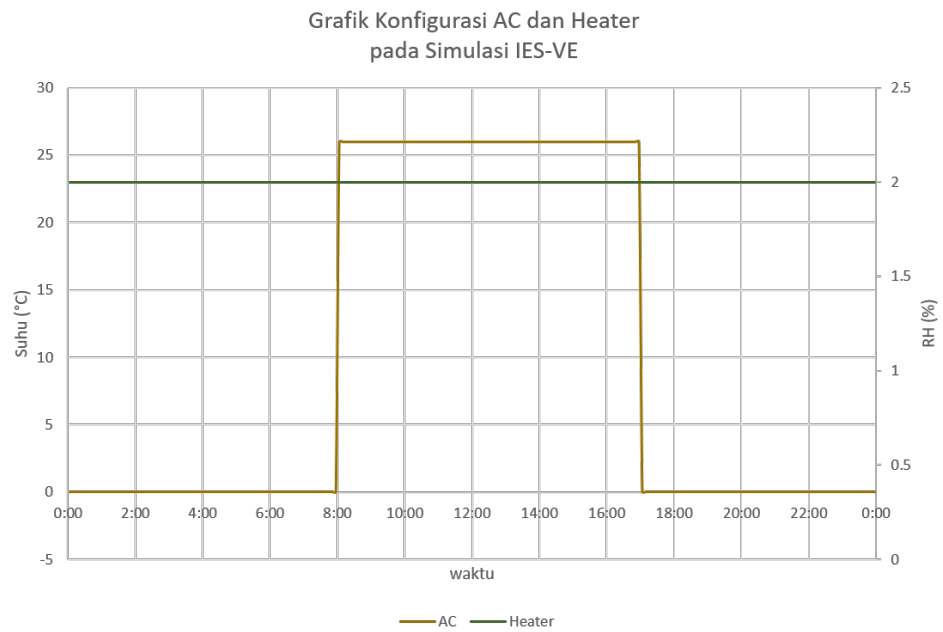
Untuk variasi suhu lingkungan dan intensitas radiasi matahari digunakan 4 titik ekstrim bumi terhadap matahari yaitu pada tanggal 21 Maret, 21 Juni, 23 September dan 22 Desember. Kemudian dilakukan simulasi pada setiap titik tersebut dengan kombinasi pada Gambar 4.5. Dengan demikian, total skenario yang dihasilkan dari kombinasi tersebut berjumlah 100 skenario.



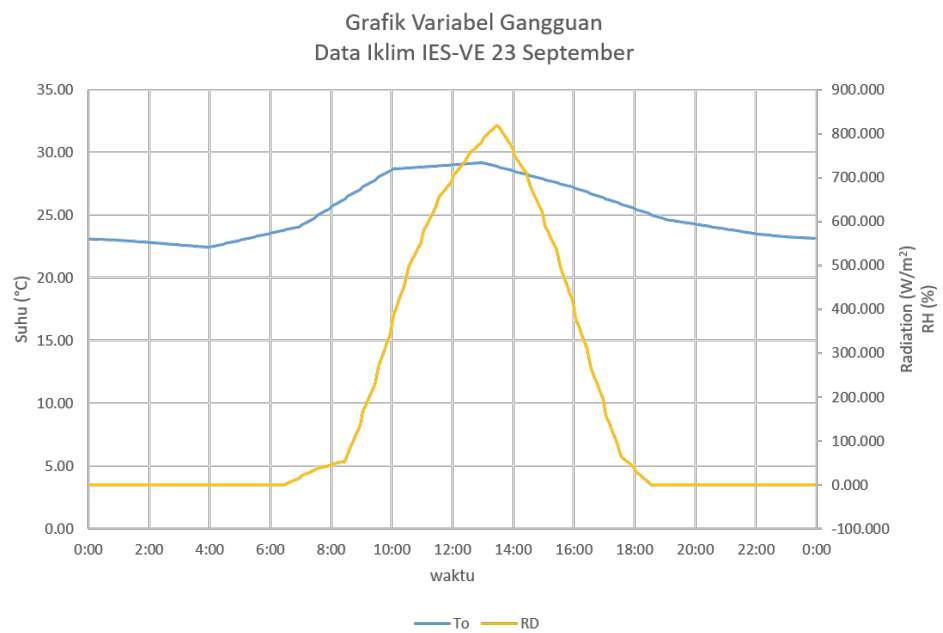
Gambar 4.5. Skenario Pengambilan Data

IV.2.3.3. Simulasi IES-VE

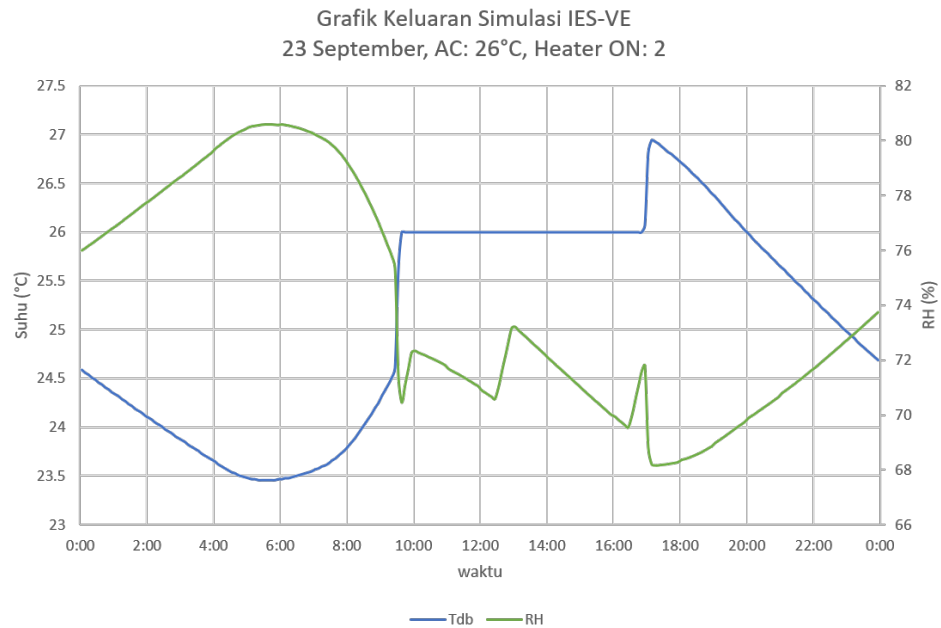
Pada Gambar 4.8 ditunjukkan salah satu hasil simulasi untuk skenario AC 26°C dan *heater* ON 2 buah dengan variabel gangguan yang digambarkan pada Gambar 4.7. Grafik yang ditampilkan terdiri dari 4 parameter yaitu suhu lingkungan (T_o), intensitas radiasi matahari (RD), suhu ruang (T_{db}), dan kelembapan 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 kesalahan keadaan-ajeg (*steady-state error*).



Gambar 4.6. Data Konfigurasi AC dan *Heater* pada Simulasi ISE-VE



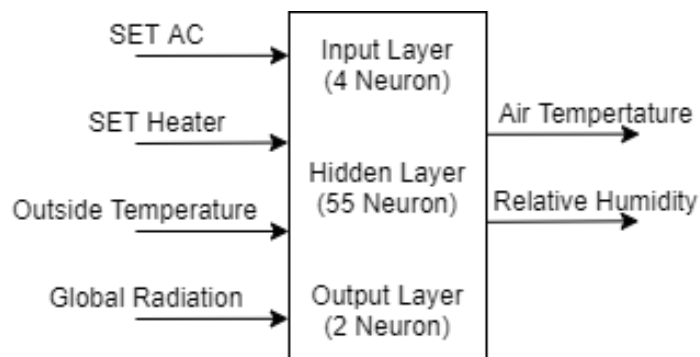
Gambar 4.7. Variabel Gangguan Simulasi ISE-VE



Gambar 4.8. Data Hasil Simulasi ISE-VE

IV.2.4. Model *Plant* JST

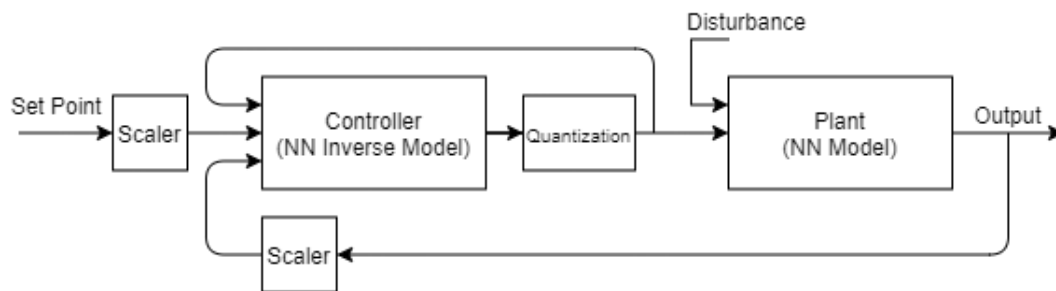
Model *plant* pada penelitian ini menggunakan model plant JST yang telah dirancang pada penelitian sebelumnya[2]. Model plant tersebut memiliki nilai MAE perhitungan antara target dan prediksi sebesar 0,59°C untuk suhu ruang dan 5,44% untuk kelembapan relatif. Akurasi JST sebesar 96,23% untuk suhu ruang dan 68,90% untuk kelembapan relatif. Arsitektur Model Plant JST digambarkan pada Gambar 4.9.



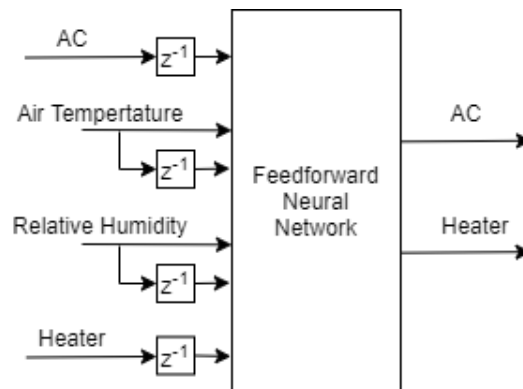
Gambar 4.9. Arsitektur Model Plant JST

IV.2.5. Perancangan Kontrol berbasis JST

Dalam melakukan pemodelan kontrol, pertama-tama didefinisikan terlebih dahulu pasangan data masukan dan keluaran dari sistem kendali. Nilai pasangan masukan dan keluaran kontrol ditunjukkan dengan Gambar 4.11. Pasangan masukan dan keluaran tersebut didapatkan dengan memperhatikan diagram blok sistem pengendalian. Diagram blok sistem pengendalian ditunjukkan pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10. Diagram blok sistem kontrol berbasis JST[7]



Gambar 4.11. 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 Tri Hartanto[2]. 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.

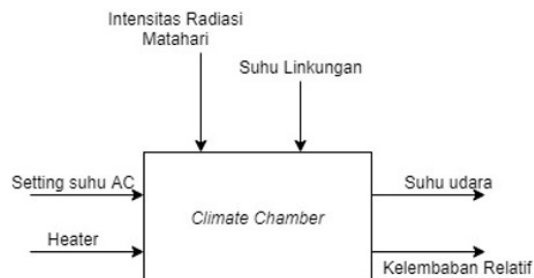
BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

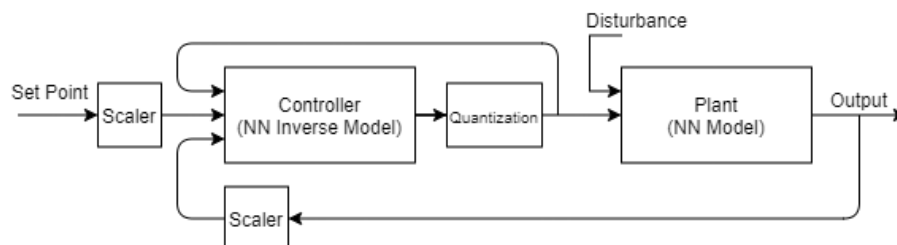
Bangunan yang dijadikan objek penelitian adalah *climate chamber* DTNTF FT-UGM. Dalam bab ini, akan dibahas mengenai hasil perancangan kontroler sesuai dengan langkah-langkah yang dijelaskan pada Bab IV.

V.1. Model Plant JST

Model *plant* pada penelitian ini menggunakan model JST yang telah dibangun oleh Tri Hartanto[2]. Arsitektur model dirancang dengan memperhatikan sistem *plant* pada Gambar 5.1. Arsitektur memiliki nilai-nilai *hyperparameter* yang dirangkum pada Tabel 5.1.



Gambar 5.1. Diagram Blok Plant



Gambar 5.2. Diagram blok sistem kontrol berbasis JST

Tabel 5.1. Tabel Rancangan Model Plant JST[2]

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)	Tdb: 0,59°C ; RH: 5,44%
Mean Squared Error (MSE)	Tdb: 0,75°C ; RH: 52,33%
Koefisien Korelasi (R)	Tdb: 96,23% ; RH: 68,90%

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

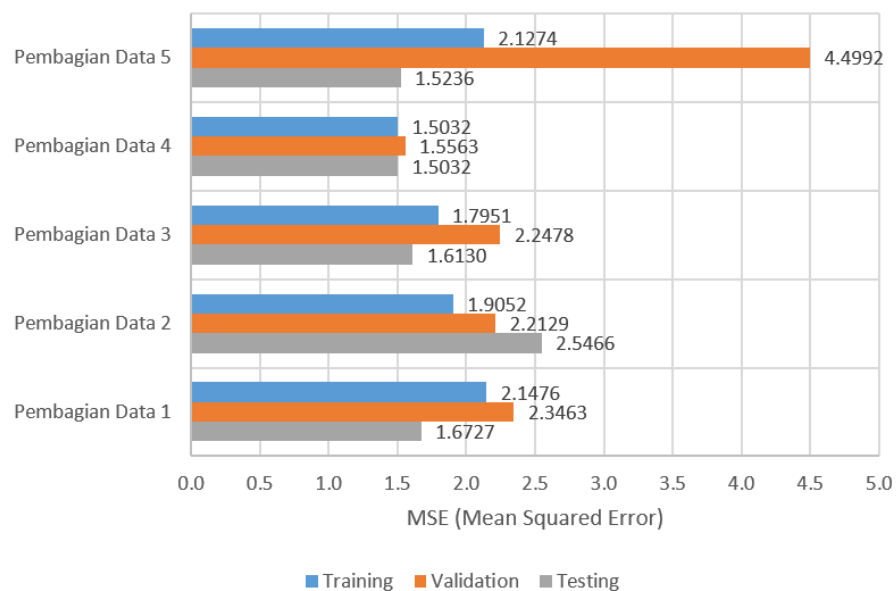
Variasi pembagian data dilakukan dengan membandingkan beberapa variasi pembagian data ke dalam 5 variasi. Kemudian kinerja dari setiap pembagian data dibandingkan dengan konfigurasi hyperparameter pada Tabel 5.2.

Tabel 5.2. 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 ar-

sitektur *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%)' dimana n = nomor variasi, x = pembagian data pelatihan, y = pembagian data validasi, dan z = pembagian data pengujian. Berdasarkan hasil variasi yang ditunjukkan pada Gambar 5.3, 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.

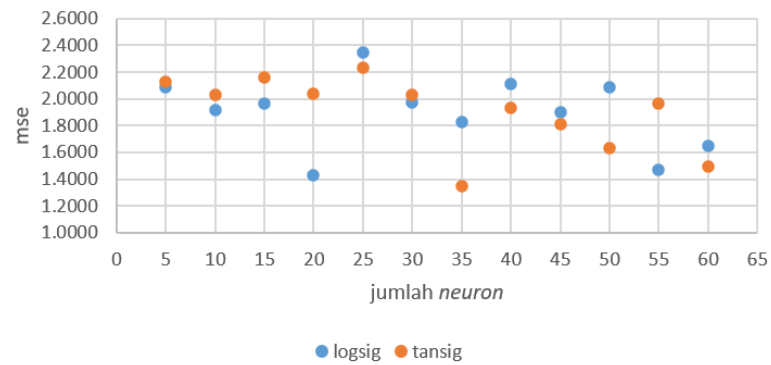


Gambar 5.3. Grafik Variasi Pembagian Data

V.2.2. Variasi Arsitektur Perancangan JST Kontroler

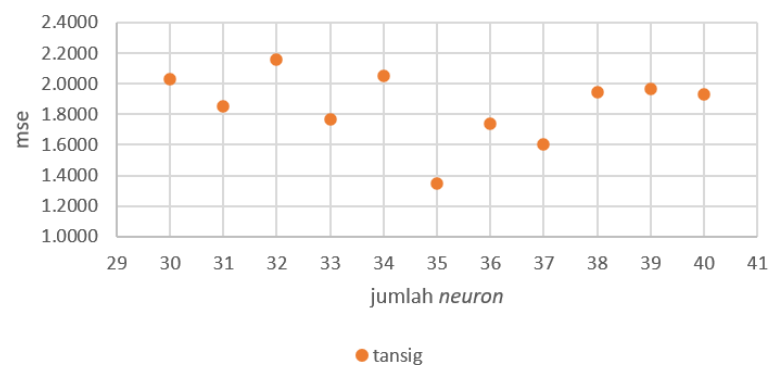
Pada perancangan model JST kontroler digunakan 2 variasi fungsi aktivasi, yaitu fungsi tansig (fungsi *hyperbolic tangent*) dan fungsi logsig (fungsi sigmoid). Kemudian masing-masing dilatih dengan jumlah neuron yang bervariasi dari 5 neuron hingga 60 neuron dengan lompatan sebesar 5 neuron. Dari proses 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 5.4.



Gambar 5.4. Grafik Persebaran MSE Variasi Arsitektur JST Kontroler

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 model arsitektur terbaik dengan nilai MSE terkecil. Hasil variasi ini dapat dilihat pada Gambar 5.5.



Gambar 5.5. Grafik Persebaran MSE Variasi Arsitektur JST Kontroler

V.2.3. 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 tangent*) dan algoritma pembelajaran Levenberg-Marquardt. Model JST Kontroler terbaik memiliki nilai *hyperparameter* yang diringkas pada Tabel 5.3.

Tabel 5.3. 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
Mean Squared Error (MSE)	AC: 2,68°C ; HT: 0,01
Koefisien Korelasi (R)	AC: 99,12% ; HT: 99,65%

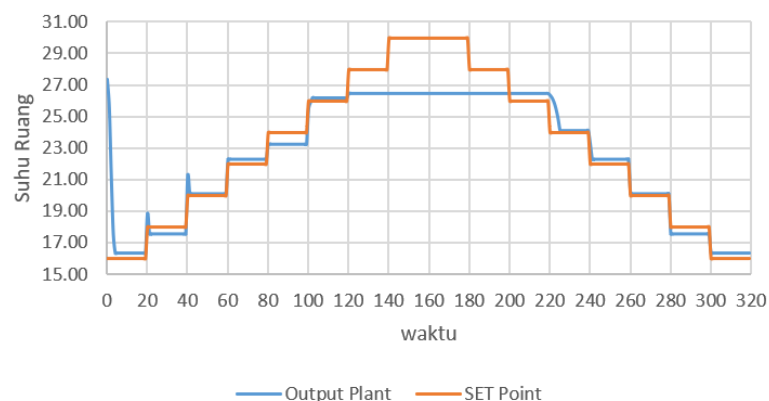
Model JST Kontroler memiliki nilai MAE sebesar 0,37°C dimana nilai ini di bawah 1°C. Dengan demikian, model JST dapat digunakan sebagai model kontroler. Model hasil rancangan ini kemudian diubah ke dalam bentuk blok SIMULINK dengan menggunakan perintah *gensim* yang kemudian akan dijadikan blok kontroler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

V.3. Hasil Simulasi Kontrol SIMULINK

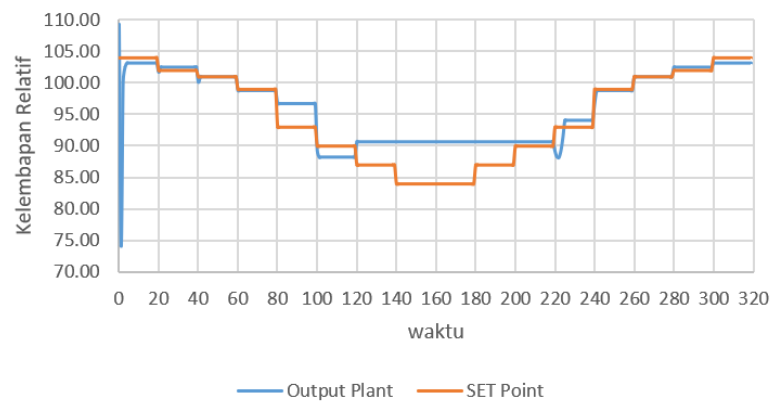
Pada simulasi kontrol, digunakan nilai *set point* sesuai dengan uji eksperimental level sensasi termal yang dilakukan oleh Nur Muna pada *climate chamber*[12]. Perbedaanannya, pada penelitian ini variasi naik turun suhu dari 16°C hingga 30°C menggunakan lompatan sebesar 2°C. Pada simulasi ini digunakan nilai variabel gangguan konstan sebesar 26,8°C untuk suhu lingkungan dan 423,343 W/m² 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.

V.3.1. Skenario Simulasi Proses Pemanasan Pendinginan *Climate Chamber*

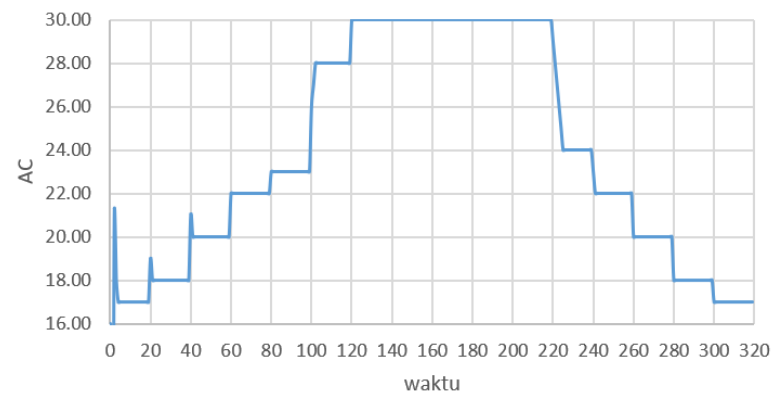
Berdasarkan hasil simulasi, kontroler mampu mengendalikan suhu ruang dan kelembapan relatif mengikuti nilai *set point*. Akan tetapi, kontroler tidak mampu menaikkan suhu ruang mencapai nilai lebih dari 27°C. Hal ini dapat terjadi diakibatkan nilai manipulator AC tidak mampu melebihi nilai maksimum (SET 30°C). Kombinasi *set point* dan hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 5.6 untuk suhu ruang dan Gambar 5.7 untuk kelembapan relatif.



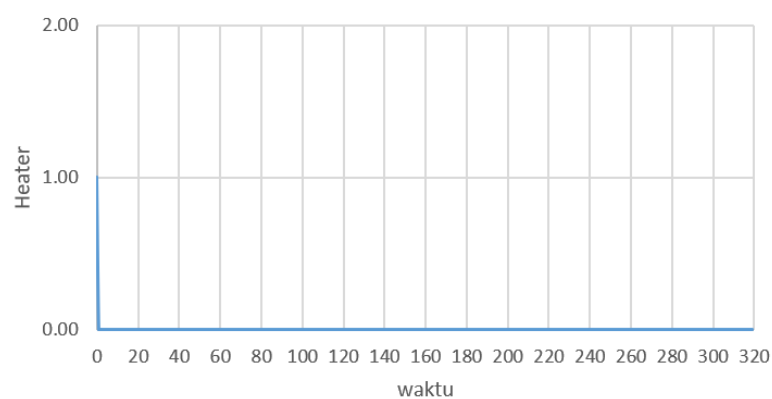
Gambar 5.6. Grafik Hasil Simulasi Simulink untuk Suhu Ruang



Gambar 5.7. Grafik Hasil Simulasi Simulink untuk Kelembapan Relatif



Gambar 5.8. Grafik Variabel Manipulasi AC pada Simulasi Simulink



Gambar 5.9. Grafik Variabel Manipulasi *Heater* pada Simulasi Simulink

Dengan meninjau nilai variabel manipulasi AC yang ditunjukkan pada Gambar 5.8, dapat dilihat bahwa untuk mengendalikan suhu mencapai *set point* 26°C , perangkat AC perlu mengeluarkan sinyal sebesar 28°C (waktu ke-100 hingga ke-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 kehandalan 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 Tri Hartanto[2] 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 $0,15^{\circ}\text{C}$ pada proses pemanasan dan sebesar $0,2^{\circ}\text{C}$ 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 $0,18^{\circ}\text{C}$ untuk suhu ruang dan sebesar $0,04\%$ untuk kelembapan relatif.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

VI.1. Kesimpulan

1. Rancangan kontroler berbasis jaringan saraf tiruan memiliki nilai *steady-state error* sebesar $0,18^{\circ}\text{C}$ untuk suhu ruang dan sebesar $0,04\%$ untuk kelembapan relatif. Akan tetapi, kontroler tidak mampu mengendalikan suhu ruang *climate chamber* di atas nilai *set point* 26°C dikarenakan model plant[2] bukan merupakan model yang bergantung terhadap waktu.
2. 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.

VI.2. Saran

1. Memperkaya data pelatihan model JST menggunakan data pengukuran langsung pada *climate chamber* dalam merancang kontroler JST.
2. Menambahkan semacam manipulator/aktuator pada *climate chamber* untuk memanipulasi kelembapan relatif ruang secara langsung seperti penelitian yang dilakukan oleh Jan Drgona[15]. Contoh: *humidifier* dan *dehumidifier*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ing. Ján Drgoňa. *Model Predictive Control with Applications in Building Thermal Comfort*. Disertasi, Slovak University of Technology in Bratislava, Vazovova 5, 811 07 Bratislava, Slovakia, 2017.
- [2] Tri 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.
- [3] IEA. *ENERGY EFFICIENCY 2017 Laporan Khusus: Efisiensi Energi di Indonesia*. International Energy Agency, Indonesia, 2017.
- [4] Ichfan 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.
- [5] Norman S. Nise. *Control System Engineering*. John Wiley and Sons, Inc., United State of America, 2011.
- [6] Jagannathan Sarangapani. *Neural Network Control of Nonlinear Discrete-Time Systems*. Taylor and Francis Group, LLC, United State of America, 2006.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Edward Arens, Hui Zhang dan Charlie Huizenga. “Partial- and Whole-body Thermal Sensation and Comfort— Part I Uniform Environmental Conditions”. *Journal of Thermal Biology, Elsevier Ltd.*, 31:53–59, 2006.
- [10] Joo-Young Lee, Mohamed Saat, Chinmei Chou, Nobuko Hashiguchi, Titis Wijayanto, Hitoshi Wakabayashi dan Yutaka 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.
- [11] Veronica Soebarto, Hui Zhang dan Stefano Schiavon. “A Thermal Comfort Environmental Chamber Study of Older and Younger People”. *Journal of Building and Environment, Elsevier Ltd.*, 155:1–14, 2019.

- [12] Nur Muna 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.
- [13] Jin Woo Moon dan Jong-Jin Kim. “ANN-Based Thermal Control Models for Residential Buildings”. *Elsevier Ltd.*, 2010.
- [14] Jin Woo Moon, Sung Kwon Jung, Youngchul Kim dan Seung-Hoon Han. “Comparative Study of Artificial Intelligence-Based Building Thermal Control Methods - Application of Fuzzy, Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, and Artificial Neural Network”. *Elsevier Ltd.*, 2011.
- [15] Ján Drgoňa, Damien Picard, Michal Kvasnica dan Lieve Helsen. “Approximate Model Predictive Building Control via Machine Learning”. *Elsevier Ltd.*, 2018.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] A. P. Leskinen, J. K. Jokiniemi dan K. E. J. Lehtinen. “Characterization of Aging Wood Chip Combustion Aerosol in an Environmental Chamber”. *Elsevier Ltd.*, 41:3713–3721, 2007.
- [19] 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.
- [20] Jose 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”. *Polymer Degradation and Stability, Elsevier Ltd.*, 153:88–99, 2018.
- [21] 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.
- [22] 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.

- [23] 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.
- [24] Hugo Hens. *Building Physics - Heat, Air and Moisture: Fundamentals and Engineering Methods with Examples and Exercises*. Ernst and Sohn, Berlin, Germany, 2007.
- [25] Aurélien Géron. *Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn and Tensor-Flow*. O'Reilly Media, Inc., United State of America, 2017.

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 Sistem Kontrol

Tabel A.3. Hasil Simulasi Sistem Kontrol

Time	Td	Td_SP	RH	RH_SP	AC	HT	To	RD
0	27.34178933	16	109.2876671	104	16	1	27	400
1	25.56386008	16	74.22403896	104	0	0	27	400
2	21.23178424	16	100.1507688	104	21	0	27	400
3	17.5364806	16	102.5082129	104	18	0	27	400
4	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	27	400
5	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	27	400
6	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	27	400
7	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	27	400
8	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	27	400
9	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	27	400
10	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	27	400
11	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	27	400
12	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	27	400
13	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	27	400
14	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	27	400
15	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	27	400
16	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	27	400
17	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	27	400
18	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	27	400
19	16.3189323	16	103.1700938	104	17	0	27	400
20	18.8139376	18	101.7136355	102	19	0	27	400
21	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	27	400
22	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	27	400
23	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	27	400
24	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	27	400
25	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	27	400
26	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	27	400
27	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	27	400
28	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	27	400
29	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	27	400
30	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	27	400
31	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	27	400
32	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	27	400
33	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	27	400
34	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	27	400
35	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	27	400
36	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	27	400
37	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	27	400
38	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	27	400
39	17.5364806	18	102.5082129	102	18	0	27	400
40	21.23178424	20	100.1507688	101	21	0	27	400
41	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	27	400
42	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	27	400
43	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	27	400
44	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	27	400
45	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	27	400
46	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	27	400
47	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	27	400
48	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	27	400
49	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	27	400
50	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	27	400
51	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	27	400
52	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	27	400
53	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	27	400
54	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	27	400
55	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	27	400
56	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	27	400
57	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	27	400
58	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	27	400
59	20.08335653	20	100.9886247	101	20	0	27	400
60	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	27	400
61	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	27	400
62	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	27	400
63	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	27	400
64	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	27	400
65	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	27	400
66	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	27	400
67	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	27	400
68	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	27	400
69	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	27	400
70	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	27	400
71	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	27	400
72	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	27	400
73	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	27	400
74	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	27	400
75	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	27	400
76	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	27	400
77	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	27	400
78	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	27	400
79	22.27394412	22	98.81377223	99	22	0	27	400
80	23.22740214	24	96.74128844	93	23	0	27	400

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

Tabel A.4. Hasil Simulasi Sistem Kontrol

	Time	Td, Sp, RH	RH, Sp, AC	HT	To RD
81	23.22740214	24	96.74128844	93	23
82	23.22740214	24	96.74128844	93	23
83	23.22740214	24	96.74128844	93	23
84	23.22740214	24	96.74128844	93	23
85	23.22740214	24	96.74128844	93	23
86	23.22740214	24	96.74128844	93	23
87	23.22740214	24	96.74128844	93	23
88	23.22740214	24	96.74128844	93	23
89	23.22740214	24	96.74128844	93	23
90	23.22740214	24	96.74128844	93	23
91	23.22740214	24	96.74128844	93	23
92	23.22740214	24	96.74128844	93	23
93	23.22740214	24	96.74128844	93	23
94	23.22740214	24	96.74128844	93	23
95	23.22740214	24	96.74128844	93	23
96	23.22740214	24	96.74128844	93	23
97	23.22740214	24	96.74128844	93	23
98	23.22740214	24	96.74128844	93	23
99	23.22740214	24	96.74128844	93	23
100	25.50800806	26	89.30630586	90	26
101	25.88697525	26	88.23689528	90	27
102	26.17073881	26	88.26658888	90	28
103	26.17073881	26	88.26658888	90	28
104	26.17073881	26	88.26658888	90	28
105	26.17073881	26	88.26658888	90	28
106	26.17073881	26	88.26658888	90	28
107	26.17073881	26	88.26658888	90	28
108	26.17073881	26	88.26658888	90	28
109	26.17073881	26	88.26658888	90	28
110	26.17073881	26	88.26658888	90	28
111	26.17073881	26	88.26658888	90	28
112	26.17073881	26	88.26658888	90	28
113	26.17073881	26	88.26658888	90	28
114	26.17073881	26	88.26658888	90	28
115	26.17073881	26	88.26658888	90	28
116	26.17073881	26	88.26658888	90	28
117	26.17073881	26	88.26658888	90	28
118	26.17073881	26	88.26658888	90	28
119	26.17073881	26	88.26658888	90	28
120	26.45369415	28	90.69117478	87	30
121	26.45369415	28	90.69117478	87	30
122	26.45369415	28	90.69117478	87	30
123	26.45369415	28	90.69117478	87	30
124	26.45369415	28	90.69117478	87	30
125	26.45369415	28	90.69117478	87	30
126	26.45369415	28	90.69117478	87	30
127	26.45369415	28	90.69117478	87	30
128	26.45369415	28	90.69117478	87	30
129	26.45369415	28	90.69117478	87	30
130	26.45369415	28	90.69117478	87	30
131	26.45369415	28	90.69117478	87	30
132	26.45369415	28	90.69117478	87	30
133	26.45369415	28	90.69117478	87	30
134	26.45369415	28	90.69117478	87	30
135	26.45369415	28	90.69117478	87	30
136	26.45369415	28	90.69117478	87	30
137	26.45369415	28	90.69117478	87	30
138	26.45369415	28	90.69117478	87	30
139	26.45369415	28	90.69117478	87	30
140	26.45369415	30	90.69117478	84	30
141	26.45369415	30	90.69117478	84	30
142	26.45369415	30	90.69117478	84	30
143	26.45369415	30	90.69117478	84	30
144	26.45369415	30	90.69117478	84	30
145	26.45369415	30	90.69117478	84	30
146	26.45369415	30	90.69117478	84	30
147	26.45369415	30	90.69117478	84	30
148	26.45369415	30	90.69117478	84	30
149	26.45369415	30	90.69117478	84	30
150	26.45369415	30	90.69117478	84	30
151	26.45369415	30	90.69117478	84	30
152	26.45369415	30	90.69117478	84	30
153	26.45369415	30	90.69117478	84	30
154	26.45369415	30	90.69117478	84	30
155	26.45369415	30	90.69117478	84	30
156	26.45369415	30	90.69117478	84	30
157	26.45369415	30	90.69117478	84	30
158	26.45369415	30	90.69117478	84	30
159	26.45369415	30	90.69117478	84	30
160	26.45369415	30	90.69117478	84	30

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

Tabel A.5. Hasil Simulasi Sistem Kontrol

Time	Td	Td_SP	RH	RH_SP	AC	HT	To	RD
161	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	27	400
162	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	27	400
163	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	27	400
164	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	27	400
165	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	27	400
166	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	27	400
167	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	27	400
168	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	27	400
169	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	27	400
170	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	27	400
171	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	27	400
172	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	27	400
173	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	27	400
174	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	27	400
175	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	27	400
176	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	27	400
177	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	27	400
178	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	27	400
179	26.45369415	30	90.69117478	84	30	0	27	400
180	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	27	400
181	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	27	400
182	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	27	400
183	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	27	400
184	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	27	400
185	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	27	400
186	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	27	400
187	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	27	400
188	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	27	400
189	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	27	400
190	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	27	400
191	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	27	400
192	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	27	400
193	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	27	400
194	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	27	400
195	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	27	400
196	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	27	400
197	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	27	400
198	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	27	400
199	26.45369415	28	90.69117478	87	30	0	27	400
200	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	27	400
201	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	27	400
202	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	27	400
203	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	27	400
204	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	27	400
205	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	27	400
206	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	27	400
207	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	27	400
208	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	27	400
209	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	27	400
210	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	27	400
211	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	27	400
212	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	27	400
213	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	27	400
214	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	27	400
215	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	27	400
216	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	27	400
217	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	27	400
218	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	27	400
219	26.45369415	26	90.69117478	90	30	0	27	400
220	26.34256665	24	89.19521707	93	29	0	27	400
221	26.17073881	24	88.26658888	93	28	0	27	400
222	25.88697525	24	88.23689258	93	27	0	27	400
223	25.45080806	24	89.30630586	93	26	0	27	400
224	24.8472463	24	91.39960639	93	25	0	27	400
225	24.0939216	24	94.09152781	93	24	0	27	400
226	24.0939216	24	94.09152781	93	24	0	27	400
227	24.0939216	24	94.09152781	93	24	0	27	400
228	24.0939216	24	94.09152781	93	24	0	27	400
229	24.0939216	24	94.09152781	93	24	0	27	400
230	24.0939216	24	94.09152781	93	24	0	27	400
231	24.0939216	24	94.09152781	93	24	0	27	400
232	24.0939216	24	94.09152781	93	24	0	27	400
233	24.0939216	24	94.09152781	93	24	0	27	400
234	24.0939216	24	94.09152781	93	24	0	27	400
235	24.0939216	24	94.09152781	93	24	0	27	400
236	24.0939216	24	94.09152781	93	24	0	27	400
237	24.0939216	24	94.09152781	93	24	0	27	400
238	24.0939216	24	94.09152781	93	24	0	27	400
239	24.0939216	24	94.09152781	93	24	0	27	400
240	23.22740214	22	96.74128844	99	23	0	27	400

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

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;

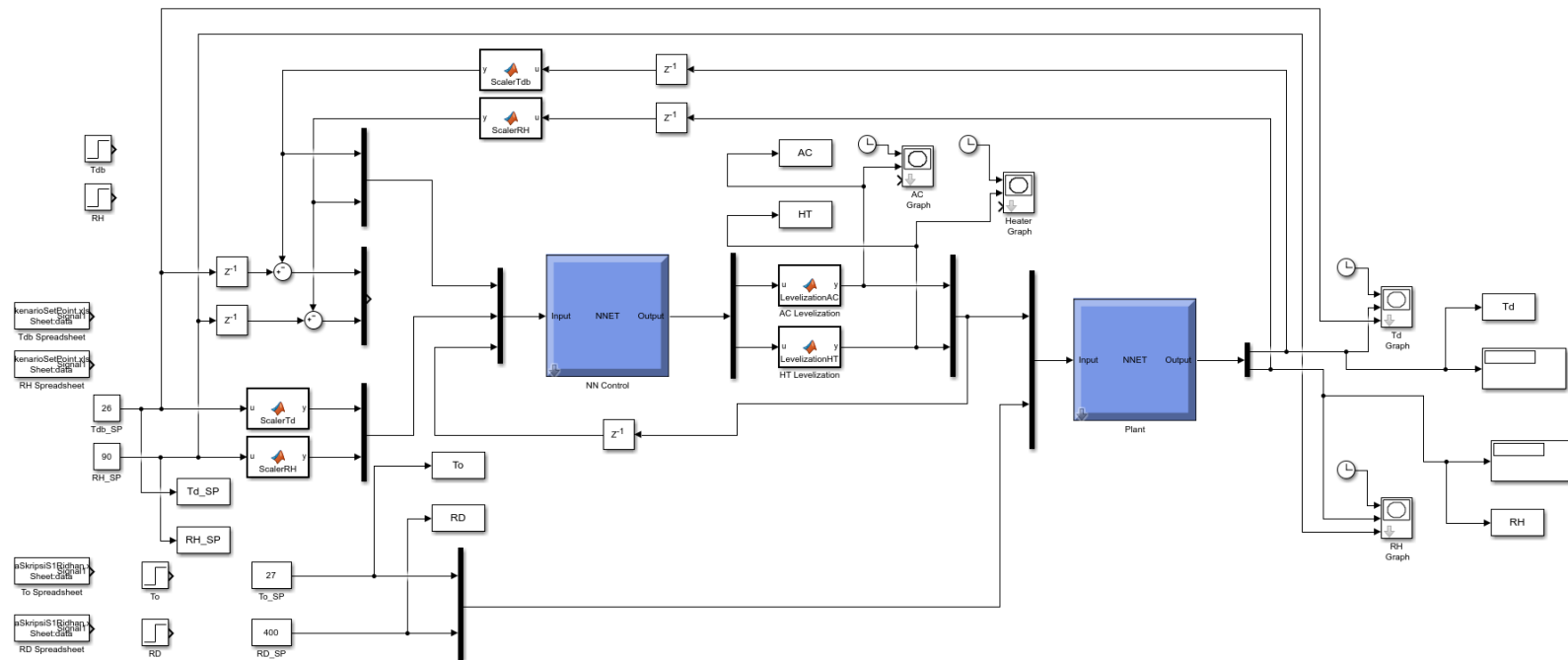
```


$$_4 \ y = (u - \text{minRH}) ./ (\text{maxRH} - \text{minRH});$$

LAMPIRAN C

DIAGRAM BLOK

C.1. Diagram Blok Rancangan Sistem Kontrol Simulink



Gambar C.1. Diagram Blok Rancangan Sistem Kontrol Simulink