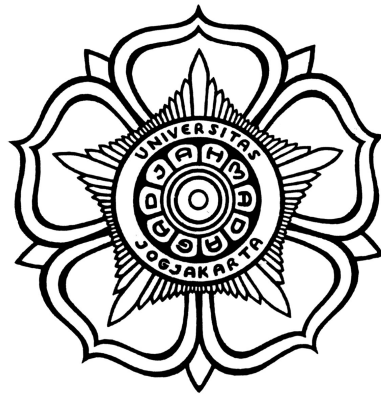


**PERANCANGAN KONTROLER LINGKUNGAN TERMAL
CLIMATE CHAMBER BERBASIS JARINGAN SARAF TIRUAN**

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 mohon maaf apabila terdapat kekurangan ataupun kesalahan yang tertera pada skripsi ini. Kritik dan saran sangat diharapkan agar penulis dapat menulis lebih baik serta berdaya guna dimasa yang akan datang.

Yogyakarta, 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	xix
ABSTRACT	xx
I. PENDAHULUAN	1
I.1. Latar Belakang	1
I.2. Perumusan Masalah	3
I.3. Batasan Masalah	4
I.4. Tujuan	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.	Perpindahan Kalor pada Bangunan	15
III.1.3.	Kenyamanan Termal	19
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	25
III.3.1.	Model Matematis Neuron	26
III.3.2.	Jaringan Layar Jamak (MLP)	30
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.	Pengembangan Model Plant JST	39
IV.2.5.	Perancangan Kontroler JST	40
IV.2.6.	Penarikan Kesimpulan	41
IV.3.	Rencana Analisis Hasil Penelitian	42
V.	HASIL DAN PEMBAHASAN	43
V.1.	Pengambilan Data Simulasi IES-VE	43

V.1.1.	Kondisi <i>Climate Chamber</i>	43
V.1.2.	Rancangan Skenario Pengambilan Data	46
V.1.3.	Hasil Simulasi IES-VE	47
V.2.	Pengembangan Model Plant JST	49
V.2.1.	Variasi Pembagian Data	50
V.2.2.	Hasil Model Plant JST	52
V.3.	Perancangan Kontroler JST	52
V.4.	Kinerja Kontroler JST Terpilih	56
V.4.1.	Kinerja JST Blok Emulator	57
V.4.2.	Kinerja JST Blok Kontroler	58
V.4.3.	Kinerja Simulasi Kontrol	59
VI.	KESIMPULAN DAN SARAN	65
VI.1.	Kesimpulan	65
VI.2.	Saran	65
LAMPIRAN		
A.	Data Penelitian	69
A.1.	Data Simulasi IES-VE	69
A.2.	Bobot-bobot Model Plant JST	70
A.3.	Bobot-bobot Model Emulator JST	71
A.4.	Bobot-bobot Model Kontroler JST	72
B.	Listing Program	73
B.1.	Kode Sumber Model Plant JST	73
B.2.	Kode Sumber Model Emulator JST	75
B.3.	Kode Sumber Model Kontroler JST	77

B.4.	Fungsi Min Max Scaler	80
B.5.	Fungsi Kuantisasi AC	80
B.6.	Fungsi Kuantisasi Heater	81
B.7.	Fungsi Scaler Suhu Ruang	81
B.8.	Fungsi Scaler Kelembapan Relatif	81
B.9.	Fungsi Scaler Suhu Lingkungan	81
B.10.	Fungsi Scaler Radiasi Matahari	82
C.	Diagram Blok	83
C.1.	Diagram Blok Rancangan Sistem Kontrol Simulink	83

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. U-Value Selubung Climate Chamber[2]	45
5.2. Tabel Rancangan Model Plant JST[2]	50
5.3. Daftar variasi pembagian data	50
5.4. Tabel Rancangan Model Plant JST	52
5.5. Tabel Rancangan Emulator JST (<i>NN Forward Model</i>)	57
5.6. Tabel Rancangan Kontroler JST (<i>NN Inverse Model</i>)	59
5.7. Nilai Kombinasi SET POINT SP1	59
5.8. Nilai Kombinasi SET POINT SP2	59
5.9. Nilai Kombinasi SET POINT SP3	60
5.10. Hasil Simulasi Kontrol SP1	60
5.11. Hasil Simulasi Kontrol SP2	62
5.12. Hasil Simulasi Kontrol SP3	63
A.1. Data Simulasi IES-VE	69
A.2. Bobot-bobot Model Plant JST	70
A.3. Bobot-bobot Model Emulator JST	71
A.4. Bobot-bobot Model Kontroler JST	72

DAFTAR GAMBAR

1.1. Penggunaan energi final per sektor di Indonesia, 2000 dan 2015 [3]	1
3.1. Pertukaran kalor bangunan dengan lingkungan[4]	17
3.2. Skema keseimbangan proses perpindahan panas dalam bangunan[4]	18
3.3. Sistem dengan a. kesalahan keadaan-ajeg bernilai terbatas untuk input fungsi step; b. kesalahan keadaan-ajeg nol untuk input fungsi step [5]	24
3.4. Anatomi neuron [6]	25
3.5. Model matematis neuron [6]	26
3.6. Fungsi-fungsi aktivasi [6]	27
3.7. Jaringan layar tunggal [6]	29
3.8. Jaringan 2 layar [6]	31
3.9. Taksonomi metode kontrol klasik vs modern [6]	35
4.1. Bagan Tata Laksana Penelitian	37
4.2. Arsitektur Model Plant JST	39
4.3. Blok Diagram Kontroler I	40
4.4. Blok Diagram Kontroler II	40
4.5. Blok Diagram Kontroler III	41
4.6. Blok Diagram Kontroler IV	41
5.1. Posisi Komponen-Komponen di dalam <i>Climate Chamber</i>	43
5.2. Perangkat AC	44
5.3. Perangkat Heater	44
5.4. Kombinasi SET AC dan Heater	46
5.5. Skenario Pengambilan Data	47

5.6. Data Hasil Simulasi ISE-VE	48
5.7. Variabel Gangguan Simulasi ISE-VE	48
5.8. Blok Diagram Plant	49
5.9. Arsitektur Model Plant JST	49
5.10. Hasil Variasi Pembagian Data	51
5.11. Pembagian Data yang digunakan	51
5.12. Output Suhu Ruang Kontroler Design I	53
5.13. Output Suhu Ruang Kontroler Design II	53
5.14. Output Suhu Ruang Kontroler Design III	54
5.15. Output Suhu Ruang Kontroler Design IV	54
5.16. Output Kelembapan Relatif Kontroler Design I	55
5.17. Output Kelembapan Relatif Kontroler Design II	55
5.18. Output Kelembapan Relatif Kontroler Design III	55
5.19. Output Kelembapan Relatif Kontroler Design IV	56
5.20. Arsitektur NN Forward Model	57
5.21. Arsitektur NN Inverse Model	58
5.22. Hasil Simulasi Kontrol untuk Suhu Ruang SP1	61
5.23. Hasil Simulasi Kontrol untuk Kelembapan Relatif SP1	61
5.24. Hasil Simulasi Kontrol untuk Suhu Ruang SP2	62
5.25. Hasil Simulasi Kontrol untuk Kelembapan Relatif SP2	63
5.26. Hasil Simulasi Kontrol untuk Suhu Ruang SP3	64
5.27. Hasil Simulasi Kontrol untuk Kelembapan Relatif SP3	64
C.1. Blok Diagram Rancangan Sistem Kontrol Simulink	83

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-Ajeng

Superskrip

<i>Lambang</i>	<i>Deskripsi</i>
n	Dimensi n
T	Fungsi Transpos 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 Absolute 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

Untuk memenuhi kebutuhan penelitian kenyamanan termal, kondisi lingkungan termal pada *Climate Chamber* (sebagai ruang uji termal) perlu untuk dikondisikan secara otomatis sesuai dengan skema pengujian penelitian. Dengan menggunakan data dari Simulasi IES-VE pada penelitian sebelumnya[4], penulis mencoba untuk membangun kontroler berbasis jaringan saraf tiruan (JST) untuk mengendalikan suhu ruang (Tdb) dan kelembapan relatif (RH) pada *Climate Chamber*. Kontroler dibangun menggunakan metode *Internal Model Control* dimana model plant, emulator, dan kontroler masing-masing dibangun dengan JST dari data simulasi IES-VE.

Kontroler JST dibangun dengan menggunakan MATLAB dan disimulasikan dengan menggunakan Simulink. JST Kontroler dibangun dengan pembagian data 80% data latih, 15% data validasi, dan 5% 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 52 neuron. Hasil perancangan penulis mampu mengendalikan lingkungan termal *Climate Chamber* dengan nilai *steady-state error* sebesar 0,09°C untuk suhu ruang dan sebesar 1,24% 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

To meet the needs of Thermal Comfort research, The Thermal Environment conditions in the Climate Chamber (as a thermal test room) need to conditioned automatically according to the research test scheme. By using data from the IES-VE simulation in the previous research[4], the author tries to design a controller based on Artificial Neural Network (ANN) to control air temperature (Tdb) and relative humidity (RH) in the Climate Chamber. The controller designed using the Internal Model Control method in which the Plant model, Emulator, and Controller are each generated with ANN by data from the IES-VE simulation.

The controller uses MATLAB to build ANN and uses Simulink for controller simulation. ANN Controller was created by split the data into 80% training data, 15% validation data, and 5% 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 52 neurons. The results of the author's design able to control the thermal environment of the Climate Chamber with a steady-state error value 0.09°C for room temperature and 1.24% for relative humidity.

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

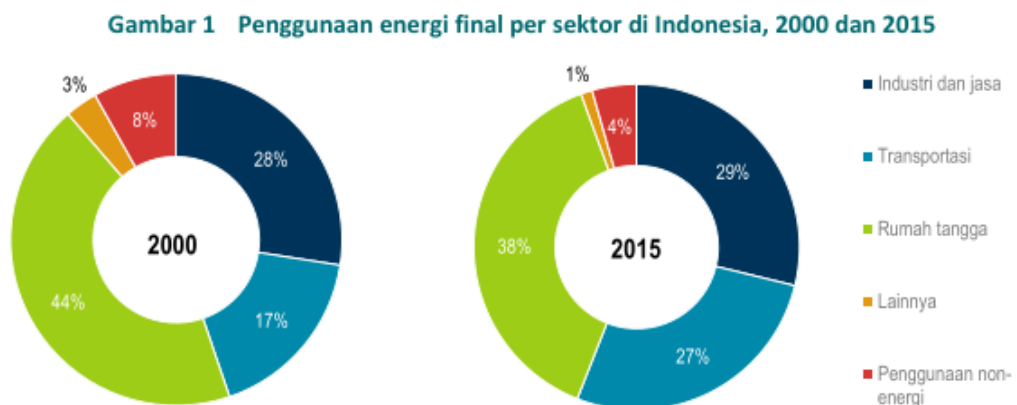
Supervisor: Faridah, S.T., M.Sc.
Co-supervisor: Ir. Agus Arif, M.T.

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 [7]. 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 [7].

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. Batasan Masalah

Berikut batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini:

1. Penelitian hanya berfokus pada bagian *controller* dari keseluruhan sistem pengendalian. Penelitian ini tidak membahas sensor, aktuator atau sistem komunikasi data.
2. Parameter kinerja kontroler yang ditinjau hanya *steady-state error*.
3. Pemodelan *plant* dilakukan berdasarkan data IES-VE dari skripsi yang dibuat oleh Ichfan Kurniawan [4].
4. Pembahasan pada penelitian ini tidak mencakup karakterisasi sistem lingkungan termal.

I.4. 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.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 [8] [9] dan bidang lingkungan [10]. Variabel lingkungan termal dalam *climate chamber* berfungsi sebagai stimulan pada objek penelitian untuk meneliti sensasi dan/atau sensitivitas termal.

Pada penelitian Arens[8], 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[9] adalah untuk menyelidiki perbedaan etnis di ambang sensasi termal kulit dan zona sensorik antar-ambang antara tropis (Malaysia) dan penduduk asli beriklim sedang (Jepang). Hasil penelitian menunjukkan bahwa (1) laki-laki Malaysia merasakan kehangatan di dahi pada suhu kulit yang lebih tinggi

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

Penelitian Veronica[10] 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[11], penghuni ruang yang terbiasa terpapar kondisi lingkungan termal yang panas dan lembap mampu merasakan perubahan 1 level sensasi akibat perubahan suhu naik, minimal sebesar 2,78°C dan perubahan suhu turun, minimal sebesar 2,70°C. Dengan kata lain, tuntutan dari penelitian yaitu memastikan nilai variabel lingkungan suhu untuk dapat dijaga pada nilai tertentu dengan galat $\pm 2,7^\circ\text{C}$.

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

Pada penelitian ini, kondisi *climate chamber* dituntut untuk mampu menjaga kondisi lingkungan termal pada nilai tertentu dengan galat suhu kurang dari $\pm 1^\circ\text{C}$ dan galat kelembapan relatif kurang dari $\pm 10\%$. Penelitian-penelitian yang telah dijabarkan diatas 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 [8]	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 [9]	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 <i>climate chamber</i> dijaga tetap pada 28°C (<i>Operative Temperature</i>)
2019 [10]	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 [11]	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 mampu dijaga pada nilai tertentu (16-30°C) dengan galat $\pm 2,7^{\circ}\text{C}$
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	Mampu menjaga lingkungan termal dengan galat suhu kurang dari $\pm 1^{\circ}\text{C}$ dan galat kelembapan relatif kurang dari $\pm 10\%$

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 [12][13] dan bangunan residensial [14]. 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*, PID, RBC, MPC, dan TDNN [14]. 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 $(20-23)^{\circ}\text{C}$ di semua kasus, sedangkan kelembapan $(35-60)\%$ hanya memenuhi 98% dari total kasus yang ada [12].

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*). Pada penelitian tersebut ANN dan ANFIS lebih mendekati set point yang ditentukan

(21,5°C untuk musim dingin dan 24,5 °C untuk musim panas). ANN dan ANFIS memiliki nilai galat 0,13°C (musim dingin) dengan nilai penyimpangan sebesar 0,19°C untuk ANN (musim panas) dan 0,17°C untuk ANFIS (musim panas) [13].

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 [14].

Pada penelitian ini perancangan kontroller JST menggunakan suhu ruang dan kelembapan relatif sebagai variabel kontrol dengan menggunakan AC dan Heater sebagai pengkondisi ruang. Perancangan kontroler JST memperhitungkan variabel gangguan sistem sebagai bagian dari proses perancangan. Variabel gangguan tersebut berupa suhu lingkungan dan intensitas radiasi matahari. Penelitian-penelitian yang telah dijabarkan diatas 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 [12]	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 [13]	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 [14]	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 [7] atau aspek-aspek lingkungan fisik individu atau populasi yang secara langsung mempengaruhi potensi pertukaran panas antara subjek atau populasi dan lingkungannya [15]. 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 mengenai kualitas lingkungan termal, secara umum menggunakan empat parameter meteorologis, yakni suhu, kelembapan relatif, kecepatan angin, dan radiasi matahari [15].

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.1.1.1. 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.1.2. Perpindahan Kalor pada Bangunan

Perpindahan kalor adalah salah satu bentuk energi termal yang dapat dipindahkan karena perbedaan suhu dari suatu tempat ke tempat lain[16]. 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:[17]

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:[17]

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.

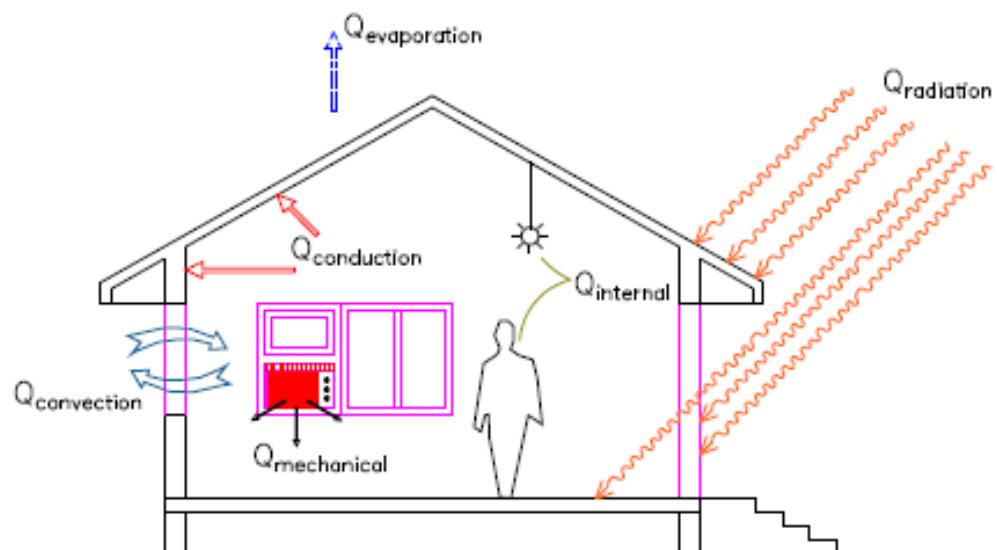
Simbol: Φ ; satuan: [J/s] = [W] (Joule per second = Watt)

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]



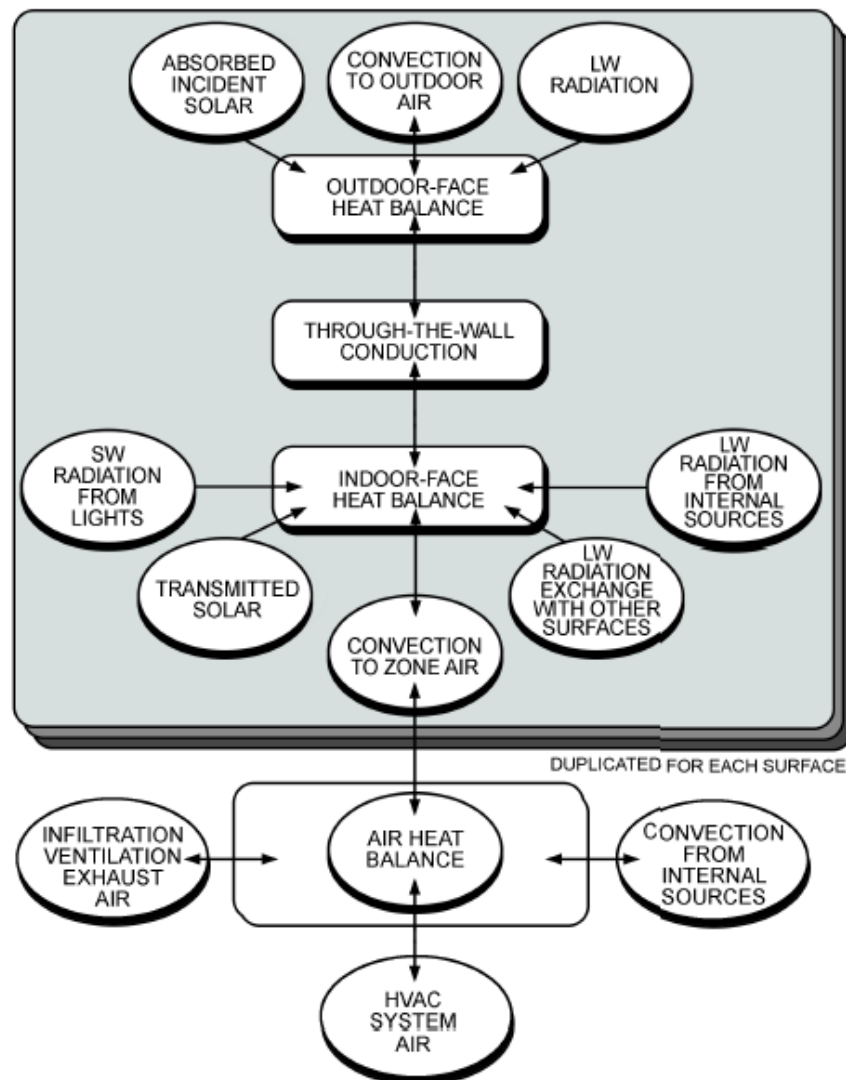
Gambar 3.1. Pertukaran kalor bangunan dengan lingkungan[4]

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.1.3. Kenyamanan Termal

Kenyamanan termal adalah suatu kondisi pikiran yang mengekspresikan kepuasan dengan lingkungan termal, baik secara fisiologis maupun psikologis, dan dinilai dengan evaluasi subyektif oleh penghuni itu sendiri [7]. 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. Dalam hal sensasi, kenyamanan termal digambarkan sebagai sensasi termal dalam bentuk *too warm* atau *too cold*, yang ditentukan oleh skala tujuh poin sensasi termal berdasarkan ASHRAE sebagai berikut:

- 3 = cold
- 2 = cool
- 1 = slightly cool
- 0 = neutral
- 1 = slightly warm
- 2 = warm
- 3 = hot

Standar SNI terkait kenyamanan termal ruangan, yaitu menjaga suhu dan kelembapan ruangan pada nilai tertentu. Nilai standar suhu ruang (*drybulb*) dijaga pada nilai $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$, dan nilai kelembapan dalam bentuk *relative humidity* (RH), dijaga pada nilai $60\% \pm 10\%$ untuk kenyamanan penghuni [18].

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 hanya 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 *setpoint*. 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 bisa 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 *setpoint* diumpankan ke kontroler untuk memperkecil kesalahan dan membuat agar nilai keluaran sistem mendekati harga yang diinginkan (*setpoint*). Penggunaan umpan balik membuat respon sistem menjadi kurang peka terhadap gangguan internal maupun eksternal. Sehingga, 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 secara umum 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 ji-

ka respon transien terlalu cepat maka akan membuat penumpang merasa tidak nyaman. Respon transien juga penting untuk alasan struktur. Respon transien yang terlalu cepat dapat juga menyebabkan kerusakan fisik pada peralatan yang dikendalikan.[5]

Respon 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]

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 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]

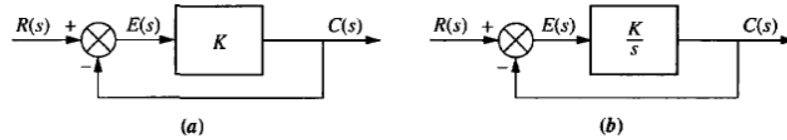
1. Pemodelan sistem
2. Analisis sistem
3. Perancangan kontroler
4. Penerapan kontroler dan pengujian

III.2.2. Kesalahan Keadaan-Ajeg

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. Dengan demikian, hal ini dibatasi untuk sistem yang stabil, dimana respons alami mendekati nol selayaknya $t \rightarrow \infty$. Sistem yang tidak stabil merepresentasikan hilangnya kendali dalam keadaan-ajeg dan sama sekali tidak dapat diterima untuk digunakan. Persamaan yang diperoleh untuk menghitung kesalahan keadaan-ajeg dapat diterapkan secara keliru ke sistem yang tidak stabil. Dengan demikian, insinyur harus memeriksa stabilitas sistem saat melakukan analisis dan perancangan kesalahan keadaan-ajeg.

Banyak kesalahan keadaan-ajeg pada sistem kontrol muncul dari sumber non-linear, seperti serangan balik dari roda gigi atau motor yang tidak bergerak terkecuali

ketika tegangan input melebihi nilai ambang batas. Kesalahan keadaan-ajeg yang dipelajari adalah kesalahan yang muncul dari konfigurasi sistem itu sendiri dan jenis input yang diterapkan.



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]

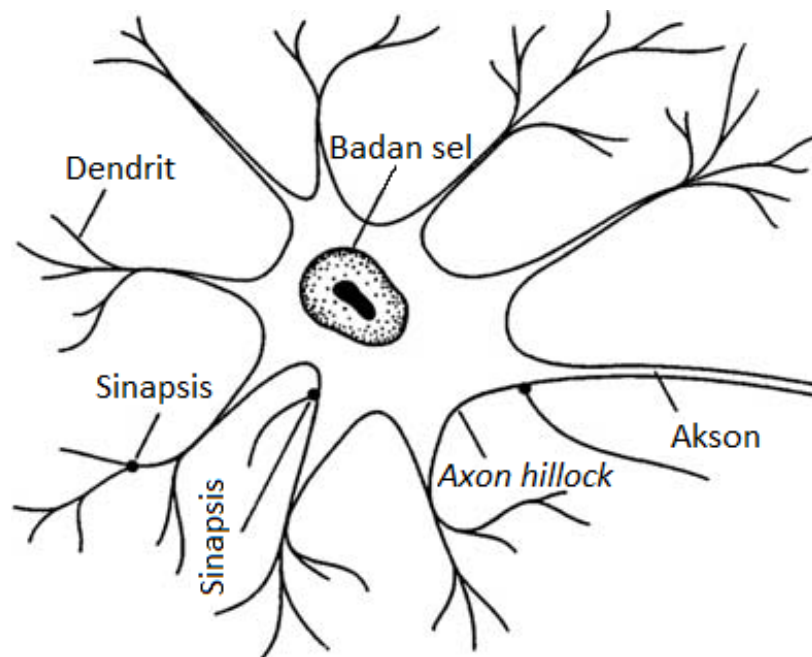
Contohnya, amati Gambar 3.3(a), dimana $R(s)$ adalah input, $C(s)$ adalah output, dan $E(s) = R(s) - C(s)$ adalah galat (kesalahan keadaan-ajeg). Pada keadaan-ajeg, jika $c(t) = r(t)$, maka $e(t)$ bernilai nol. Tetapi dengan adanya *gain* (penguat) K , galat tersebut, $e(t)$, tidak dapat bernilai nol jika $c(t)$ bernilai terbatas dan tak nol. Sehingga, keutamaan dari konfigurasi sistem (*gain* murni K pada umpan maju), haruslah memiliki nilai galat. Jika kita sebut $c_{steady-state}$ adalah nilai keadaan-ajeg suatu output dan $e_{steady-state}$ adalah nilai keadaan-ajeg suatu galat, maka $c_{steady-state} = K e_{steady-state}$, atau

$$e_{steady-state} = \frac{1}{K} c_{steady-state} \quad (3.3)$$

Dengan demikian, semakin besar nilai K dan semakin kecil nilai $e_{steady-state}$ haruslah menghasilkan nilai $c_{steady-state}$ yang sama. Kesimpulan yang dapat kita tarik yaitu *gain* murni pada umpan maju akan selalu menjadi suatu kesalahan keadaan-ajeg untuk input fungsi step. Kesalahan ini berkurang ketika nilai K meningkat.

III.3. Jaringan Saraf Tiruan

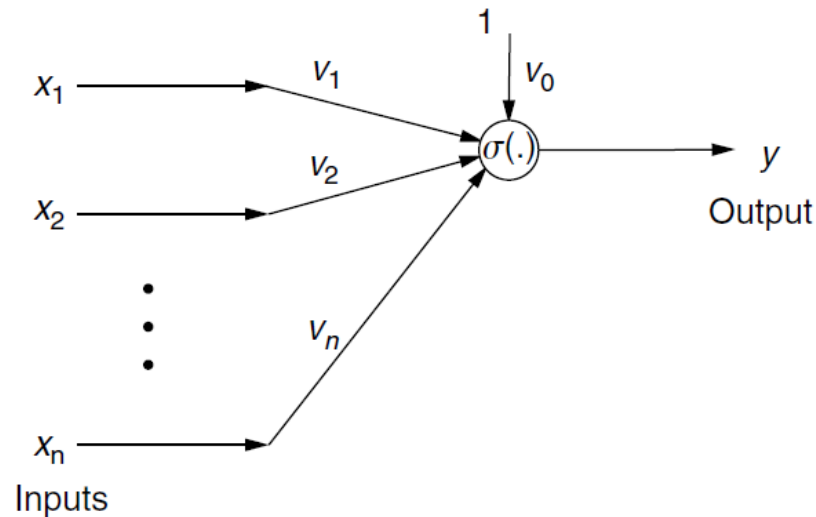
Jaringan Saraf Tiruan (JST) dimodelkan dengan mengadaptasi proses biologis untuk pemrosesan informasi, termasuk secara khusus sistem saraf dan unit dasarnya, neuron (sel saraf). Sinyal didistribusikan dalam bentuk beda potensial antara bagian dalam dan luar sel. Komponen sel saraf (neuron) ditunjukkan 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]

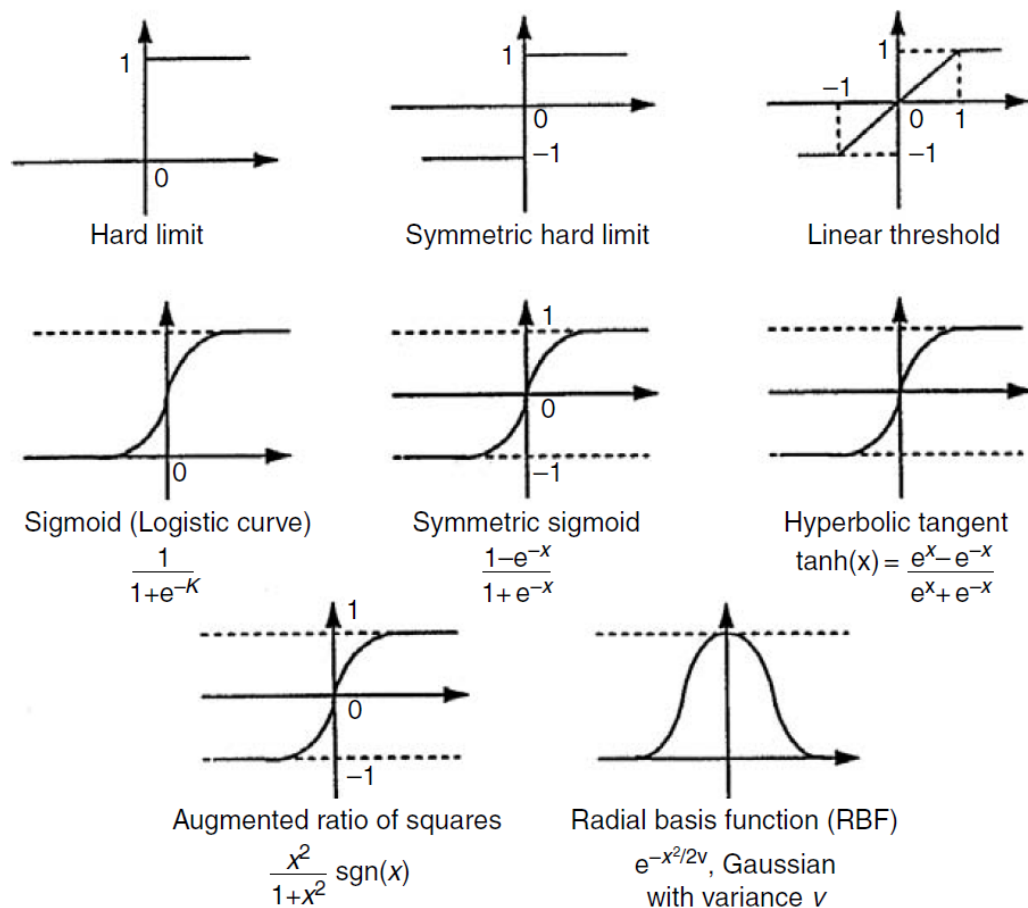
III.3.1. Model Matematis Neuron

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

$$y(k) = \sigma \left(\sum_{j=1}^n v_j x_j(k) + v_0 \right) \quad (3.4)$$

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.

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

$$\bar{x}(k) = [x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_n]^T, \quad \bar{v}(k) = [v_1 \ v_2 \ \cdots \ v_n]^T \quad (3.5)$$

Kemudian, ini memungkinkan untuk ditulis dalam notasi matriks

$$y = \sigma(\bar{v}^T \bar{x}) + v_0 \quad (3.6)$$

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

$$\begin{aligned} x(k) &= [1 \ \bar{x}^T]^T = [1 \ x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_n]^T \\ v(k) &= [v_0 \ \bar{v}^T]^T = [v_0 \ v_1 \ v_2 \ \cdots \ v_n]^T \end{aligned} \quad (3.7)$$

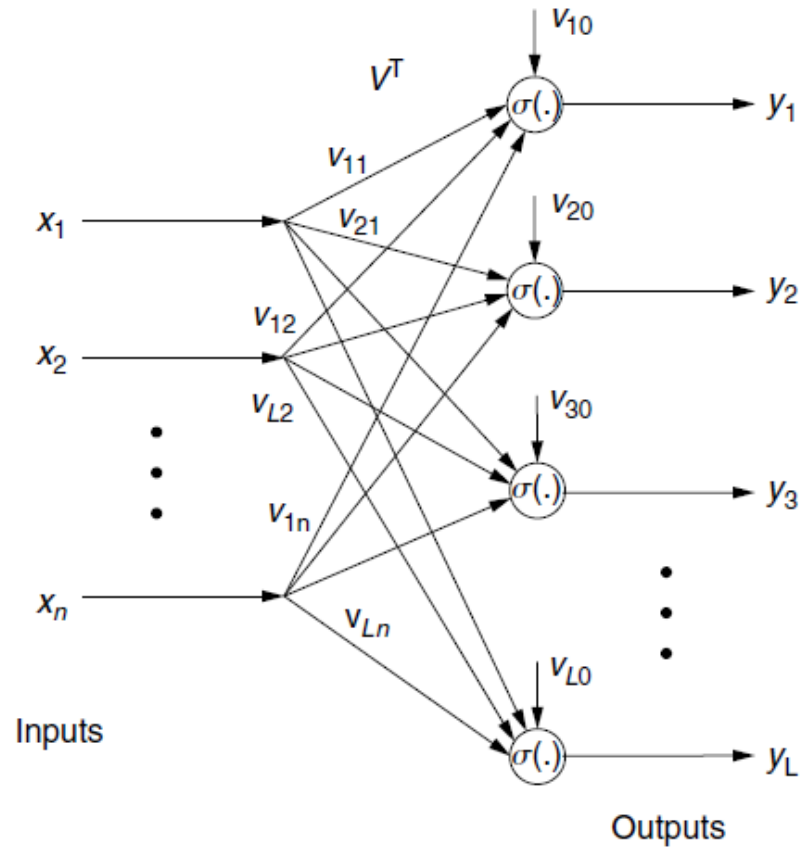
yang dapat juga ditulis sebagai

$$y = \sigma(v^T x) \quad (3.8)$$

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]

$$y_l(k) = \sigma \left(\sum_{j=1}^n v_{lj} x_j(k) + v_{l0} \right); \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (3.9)$$

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

$$\overline{V}^T \equiv \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{L1} & v_{L2} & \cdots & v_{Ln} \end{bmatrix}, \quad b_v = \begin{bmatrix} v_{10} \\ v_{20} \\ \vdots \\ v_{L0} \end{bmatrix}, \quad (3.10)$$

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

$$y = \bar{\sigma}(\bar{V}^T \bar{x} + b_v) \quad (3.11)$$

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

$$\bar{\sigma}(w) \equiv [\bar{\sigma}(w)_1 \ \bar{\sigma}(w)_2 \ \cdots \ \bar{\sigma}(w)_L]^T \quad (3.12)$$

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

$$V^T \equiv \begin{bmatrix} v_{10} & v_{11} & \cdots & v_{1n} \\ v_{20} & v_{21} & \cdots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{L0} & v_{L1} & \cdots & v_{Ln} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

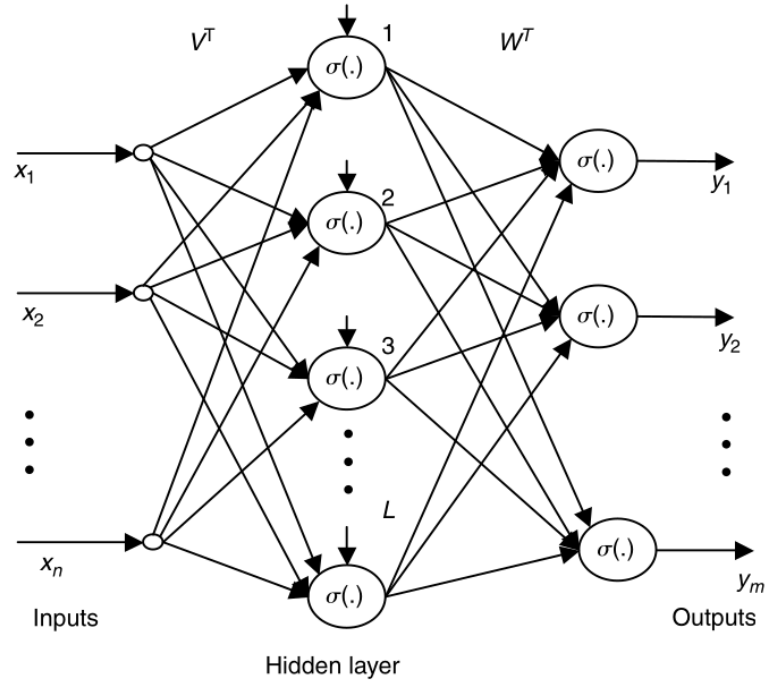
Kemudian output JST dapat digambarkan dalam bentuk vektor *augmented* input $x(k)$ sebagai

$$y = \bar{\sigma}(V^T x) \quad (3.14)$$

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.

Output jaringan 2 layer ditunjukkan oleh Persamaan *recall* berikut

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

Menentukan output jaringan tersembunyi z_1 dapat ditulis sebagai berikut

$$\begin{aligned} z_l &= \sigma \left(\sum_{j=1}^n v_{lj} x_j + v_{l0} \right); & l = 1, 2, \dots, L \\ y_i &= \sigma \left(\sum_{l=1}^L w_{il} z_l + w_{i0} \right); & l = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (3.16)$$

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

$$\bar{W}^T \equiv \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1n} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{L1} & w_{L2} & \cdots & w_{Ln} \end{bmatrix}, \quad b_w = \begin{bmatrix} w_{10} \\ w_{20} \\ \vdots \\ w_{L0} \end{bmatrix}, \quad (3.17)$$

$$W^T \equiv \begin{bmatrix} w_{10} & w_{11} & \cdots & w_{1n} \\ w_{20} & w_{21} & \cdots & w_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{L0} & w_{L1} & \cdots & w_{Ln} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Output JST dapat ditulis sebagai berikut

$$y = \bar{\sigma} \left(\bar{W}^T \bar{\sigma}(\bar{V}^T \bar{x} + b_v) + b_w \right), \quad (3.19)$$

atau

$$y = \bar{\sigma} \left(W^T \sigma(V^T x) \right). \quad (3.20)$$

Pada Persamaan ini, notasi $\bar{\sigma}$ berarti bahwa vektor ditentukan sesuai dengan Persa-

maan (3.12). Dalam (3.20) perlu menggunakan vektor *augmented*

$$\sigma(w) \equiv [1 \quad \bar{\sigma}(w)^T]^T = [1 \quad \sigma(w_1) \sigma(w_2) \dots \sigma(w_L)]^T, \quad (3.21)$$

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

$$\bar{z} = \sigma(V^T x), \quad (3.22)$$

$$y = \sigma(W^T z). \quad (3.23)$$

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

III.4. Kontrol Jaringan Saraf Tiruan

Untuk mengendalikan lingkungan termal, pada umumnya menggunakan 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 ini.

Tabel 3.1. Perbandingan metode kontrol [1]

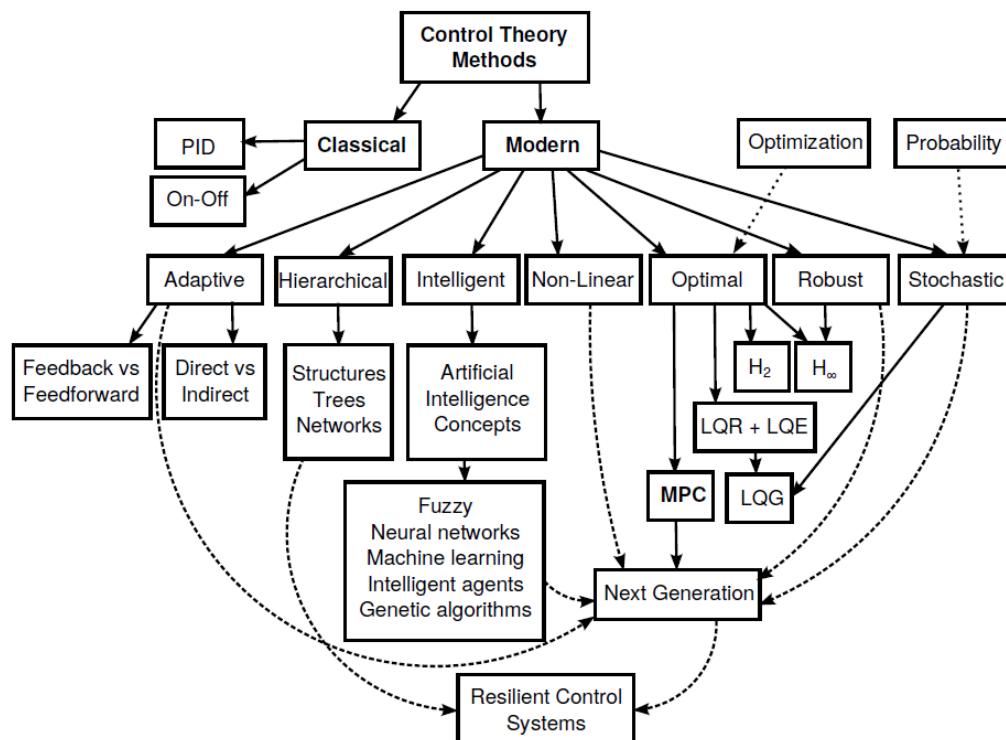
Metode kontrol	Klasik	Modern
Domain	Frekuensi, Domain-S	Waktu, Domain-t
Representasi Model	Fungsi Transfer	State-Space
Kontinyuitas	Kontinyu	Kontinyu, Diskrit, <i>Hybrid</i>
Linieritas	Linier	Linier, Nonlinier
Variansi waktu	<i>Time-invariant</i> (TI)	<i>Time-variant</i> (TV)
Dimensi	SISO	MIMO
Determinisme	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 menggunakan representasi model fungsi keadaan.[1]

Kelemahan utama dari metode klasik adalah, bahwa mereka hanya dapat di-

gunakan 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 dibawah, 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 penulis dalam melakukan penelitian. Alat dan bahan yang digunakan oleh penulis disebutkan secara rinci pada Tabel 4.1, dan Tabel 4.2.

Tabel 4.1. Daftar alat dan bahan

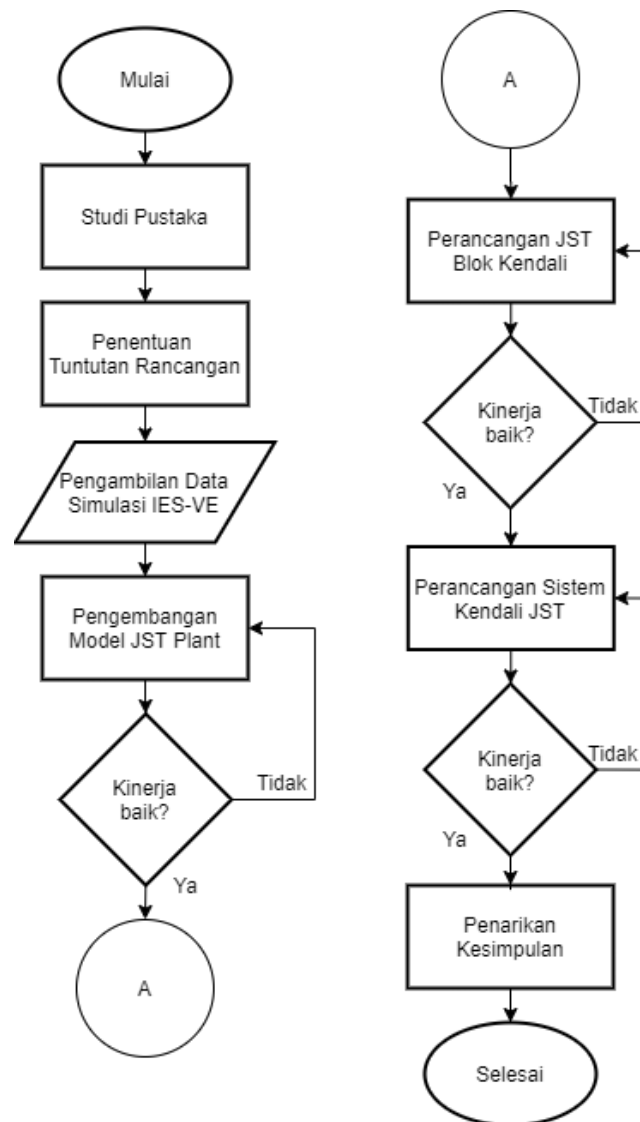
No.	Nama alat/bahan	Fungsi
1	ASUS N550JX	Perangkat komputer
2	IES-VE 2019	Perangkat lunak untuk pengambilan data lingkungan termal <i>climate chamber</i> dan variasi gangguan
3	MS Excel 365	Perangkat lunak pengolahan data tabular
4	MATLAB R2018a	Perangkat lunak pemrograman dalam merancang jaringan saraf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

Tabel 4.2. Spesifikasi laptop ASUS N550JX

No.	Komponen	Spesifikasi
1	Processor	Intel Core i7-4720HQ CPU @ 2.60GHz x 8
2	Graphics	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 penulis 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 controller ditinjau dari nilai *steady-state error* suhu ruang dan kelembapan relatif. Semakin kecil nilai *error steady-state* kontroler maka semakin baik kinerjanya.

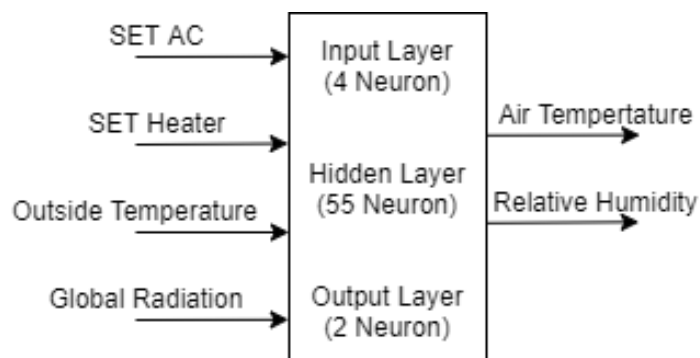
IV.2.3. Pengambilan Data Simulasi IES-VE

Penelitian ini menggunakan data yang sama dengan data yang digunakan oleh penelitian Tri Hartanto[2] yang bersumber dari model yang telah dibuat di 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*. Variasi 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 oleh penulis.

IV.2.4. Pengembangan Model Plant JST

Model plant pada penelitian ini mengadaptasi model plant JST yang telah dirancang pada penelitian sebelumnya[2]. Model plant tersebut memiliki nilai MAE perhitungan antara target dan prediksi sebesar $0,59^{\circ}\text{C}$ 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 4.2.



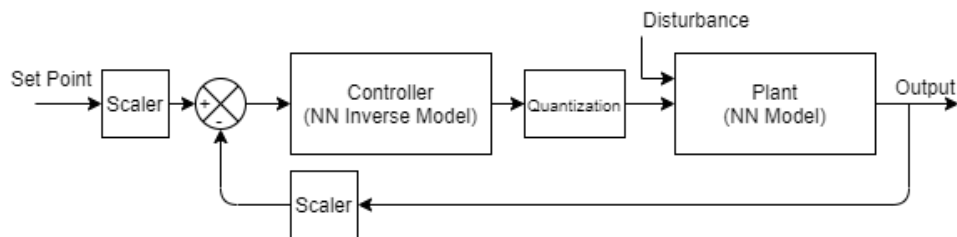
Gambar 4.2. Arsitektur Model Plant JST

Model plant ini akan dikembangkan kembali dalam melakukan perancangan kontroler JST. Rancangan Model plant JST yang dikembangkan akan dipilih berdasarkan kinerja prediksi yang lebih baik untuk variabel kelembapan relatif. Kinerja model akan dievaluasi melalui nilai koefisien korelasi (R).

IV.2.5. Perancangan Kontroler JST

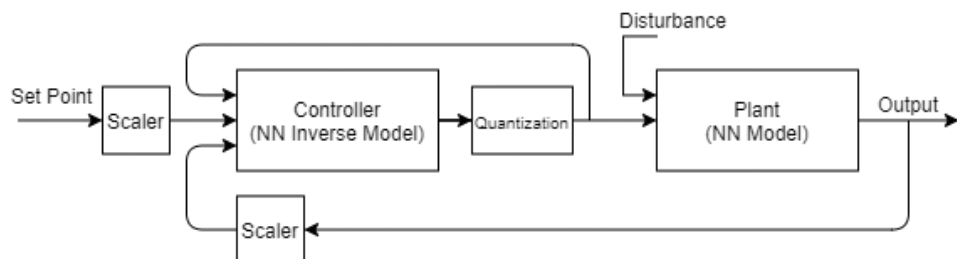
Pada penelitian ini perancangan kontroler mengacu pada beberapa referensi mengenai kontroler JST [19][20][21]. Kemudian dibangun 4 rancangan blok diagram kontroler JST untuk dibandingkan. Pemilihan rancangan blok diagram terbaik dilakukan dengan membandingkan kinerja setiap rancangan melalui nilai *steady-state error*. Rancangan dengan nilai *steady-state error* terkecil yang akan dipilih sebagai kontroler yang akan digunakan. Berikut merupakan keempat rancangan blok diagram kontroler JST tersebut:

1. Design I: Neural Network Inverse Model



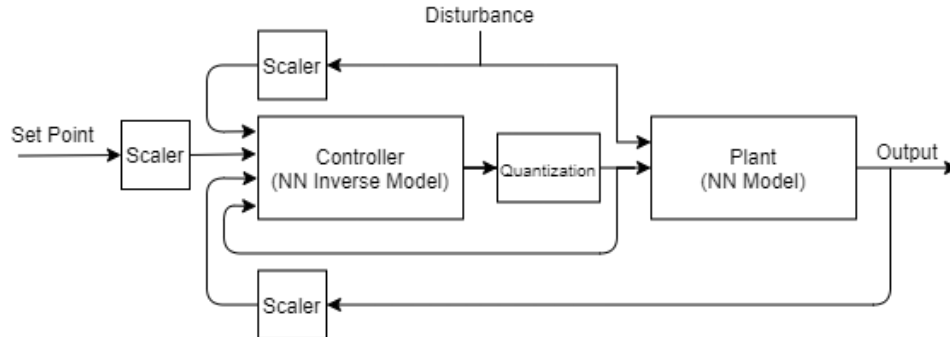
Gambar 4.3. Blok Diagram Kontroler I

2. Design II: NN Inverse Model dengan Umpan Variabel Manipulasi[19]



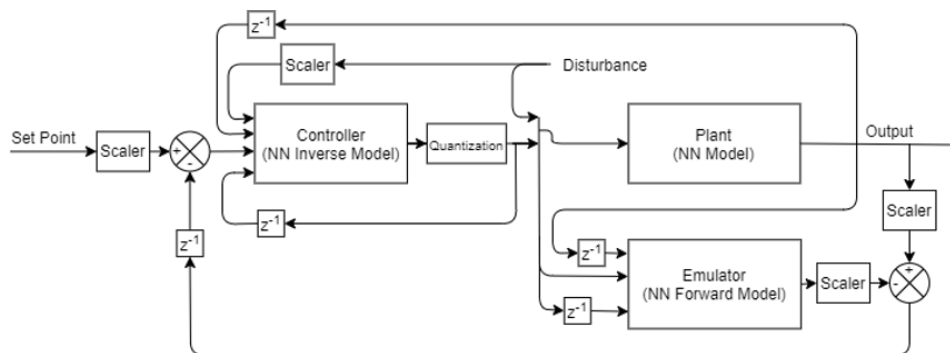
Gambar 4.4. Blok Diagram Kontroler II

3. Design III: NN Inverse Model dengan Umpan Variabel Gangguan[20]



Gambar 4.5. Blok Diagram Kontroler III

4. Design IV: NN Internal Model Control[21]



Gambar 4.6. Blok Diagram Kontroler IV

IV.2.6. Penarikan Kesimpulan

Penarikan kesimpulan didapatkan berdasarkan kinerja kontroler terbaik dan kinerja dari masing-masing komponen model jaringan saraf tiruan di dalamnya. Kesimpulan menggambarkan bagaimana rancangan kontroler dapat digunakan pada *climate chamber* DTNTF FT-UGM.

IV.3. Rencana Analisis Hasil Penelitian

Kinerja dari model JST akan dievaluasi berdasarkan nilai MAE (*Mean Absolute Error*) dan R (koefisien korelasi) dari rancangan tersebut. Kinerja dari kontroler akan dievaluasi berdasarkan nilai Kesalahan Keadaan-Ajeg (*steady-state error*) untuk suhu ruang dan kelembapan relatif. Kemudian kontroler dengan rancangan terpilih akan diuji dengan 3 variasi SET POINT untuk ditinjau kembali nilai *steady-state error* dari kontroler tersebut.

BAB V

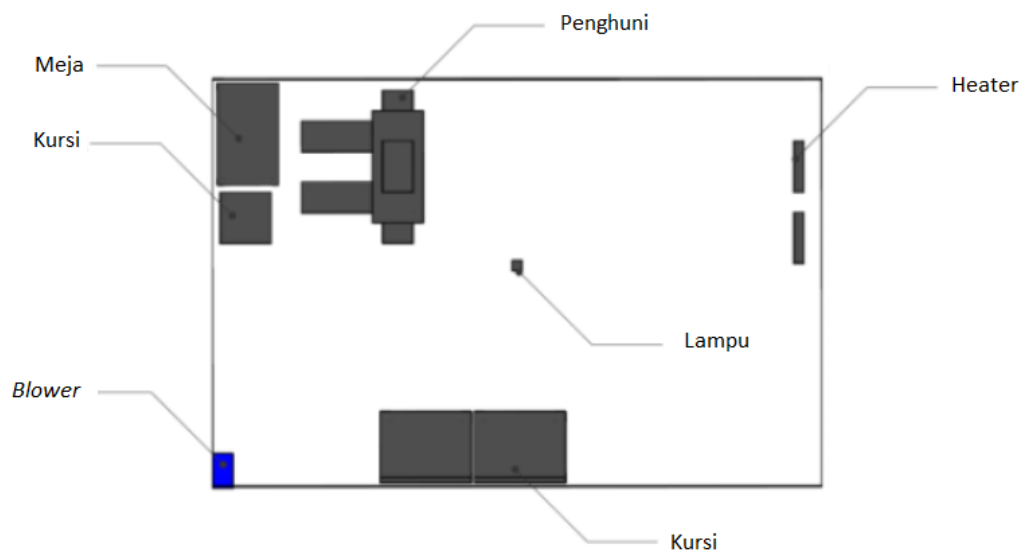
HASIL DAN PEMBAHASAN

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. Pengambilan Data Simulasi IES-VE

V.1.1. Kondisi *Climate Chamber*

Climate chamber memiliki ukuran $3\text{m} \times 2\text{m} \times 3\text{m}$ ($p \times l \times t$). 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 5.1.



Gambar 5.1. Posisi Komponen-Komponen di dalam *Climate Chamber*



Gambar 5.2. Perangkat AC



Gambar 5.3. Perangkat Heater

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. Maka dari itu, Perangkat AC sangatlah berpengaruh terhadap kondisi lingkungan termal di dalam ruangan. Tampak dari wujud

perangkat AC dapat dilihat pada Gambar 5.2

Perangkat heater yang berada di dalam *climate chamber* memiliki daya sebesar 900W. Terdapat dua buah perangkat heater di dalam *climate chamber*. Semakin banyak perangkat heater yang aktif maka akan suhu ruang akan menjadi semakin meningkat. Kenaikan rerata suhu ruang yaitu sebesar $\pm 1,9^{\circ}\text{C}$ untuk setiap perangkat heater. Tampak dari wujud perangkat heater dapat dilihat pada Gambar 5.3.

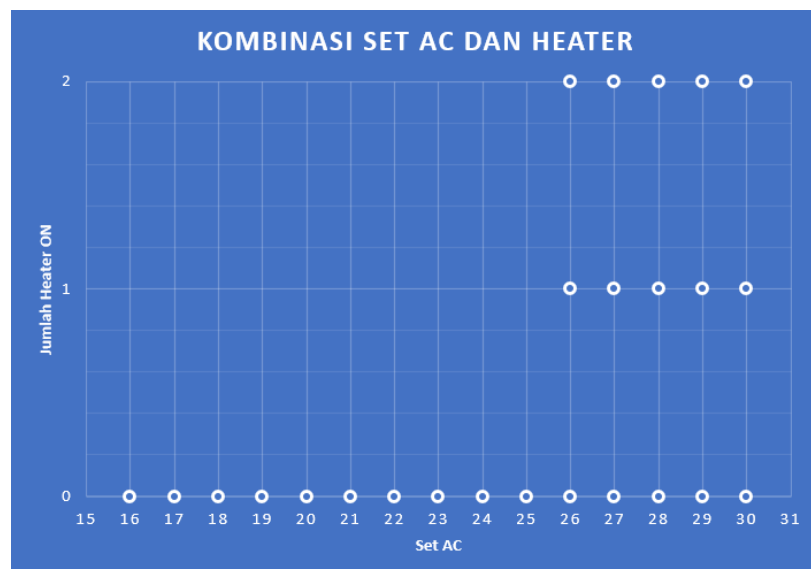
Selain faktor dari dalam *climate chamber*, faktor dari luar ruangan *climate chamber* pun secara tidak langsung mempengaruhi kondisi lingkungan termal *climate chamber*. Diantaranya adalah suhu lingkungan (*dry bulb temperature*) dan intensitas radiasi matahari. Posisi harian matahari mempengaruhi perubahan nilai suhu lingkungan dan intensitas radiasi matahari. Pada siang hari (posisi altitude matahari ketika berada tepat diatas *climate chamber*) memberikan paparan radiasi matahari yang mengenai selubung bangunan. Hal ini menyebabkan kenaikan suhu di dalam *climate chamber*. Kalor yang menembus selubung bangunan berbanding lurus dengan nilai U-value. Nilai U-Value pada selubung bangunan dapat dilihat pada Tabel 5.1.

Tabel 5.1. U-Value Selubung Climate Chamber[2]

Selubung Climate Chamber	U-Value ($\text{W/m}^2.\text{K}$)
Dinding	0,707
Atap	1,996
Lantai	0,707

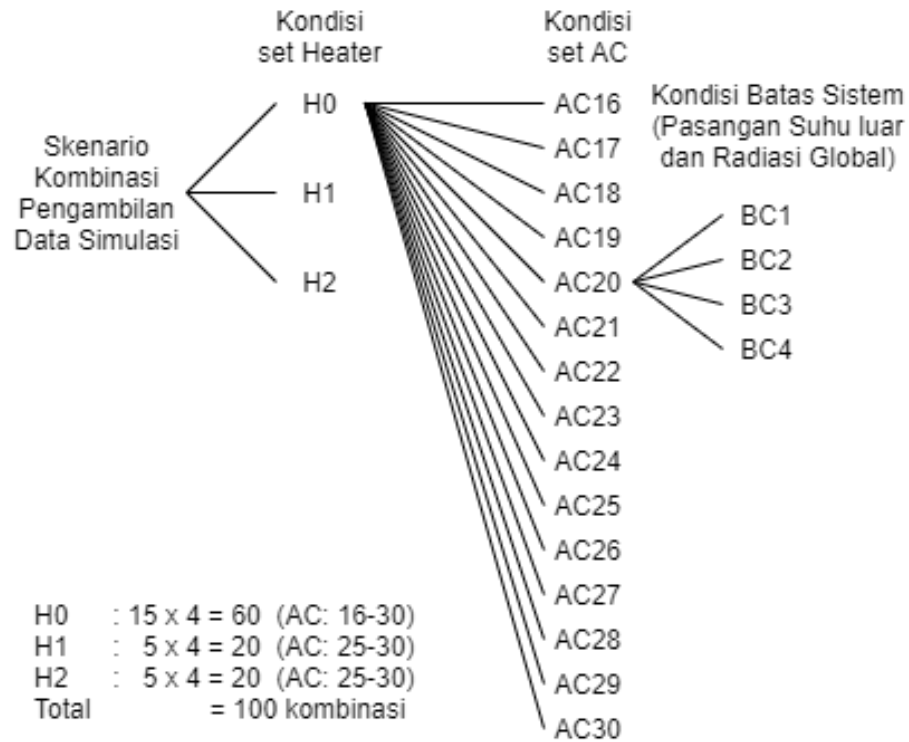
V.1.2. Rancangan Skenario Pengambilan Data

Rancangan skenario pada climate chamber menghasilkan kombinasi antara set AC dan jumlah heater ON. Set AC dikondisikan untuk menyala dari pukul 08:00 s.d. 17:00 dengan rentang nilai 16°C - 30°C. Set jumlah heater 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. Kombinasi set heater dan set AC digambarkan pada Gambar 5.4.



Gambar 5.4. Kombinasi SET AC dan Heater

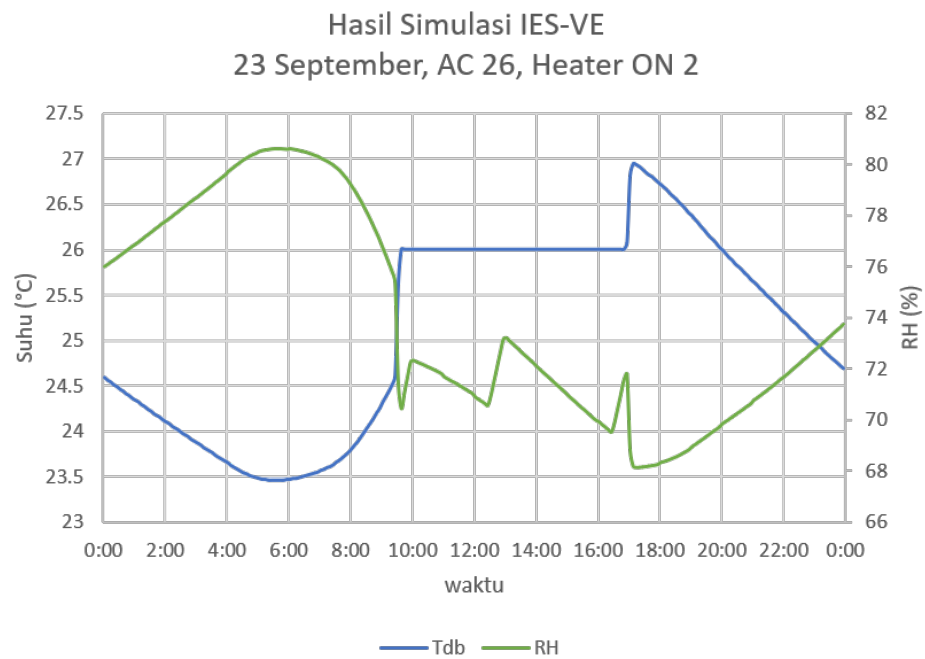
Untuk variasi suhu lingkungan dan intensitas radiasi matahari digunakan 4 titik ekstrim bumi terhadap matahari yaitu pada tanggal 21 Maret, 21 Juni, 23 September dan 22 Desember. Kemudian kami melakukan simulasi disetiap titik tersebut dengan kombinasi pada Gambar 5.5. Sehingga, total skenario yang dihasilkan dari kombinasi tersebut berjumlah 100 skenario.



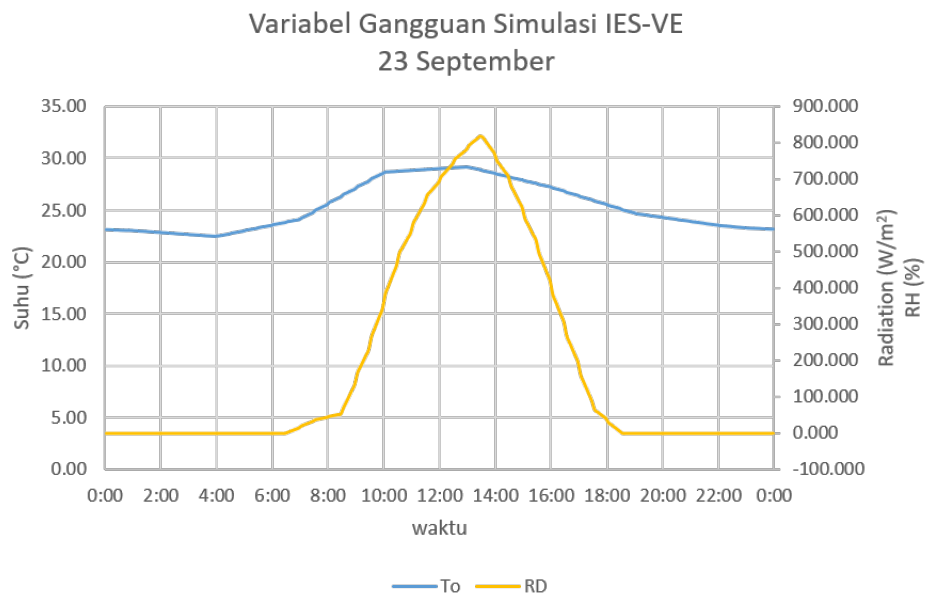
Gambar 5.5. Skenario Pengambilan Data

V.1.3. Hasil Simulasi IES-VE

Pada Gambar 5.6 penulis menunjukkan salah satu hasil simulasi untuk skenario SET AC 26°C dan SET Heater ON 2 buah dengan variabel gangguan yang digambarkan pada Gambar 5.7. Grafik yang ditampilkan terdiri dari 4 parameter yaitu suhu luar (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. Selang waktu tersebut adalah waktu tersingkat yang dapat dilakukan pada software IES-VE 2019. Respon waktu suhu ruang terhadap aktivasi AC tidak penulis perhitungkan dikarenakan secara fisis, respons transien termal pada bangunan cukup lama, sehingga hanya berfokus untuk meninjau nilai kesalahan keadaan-ajeg (*steady-state error*).



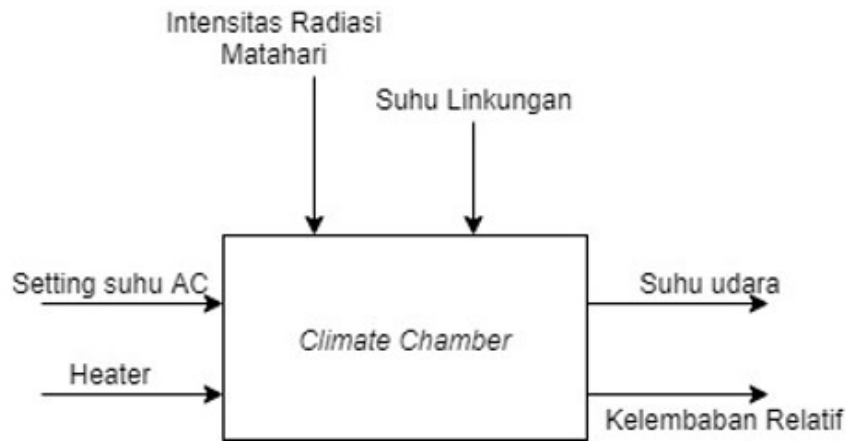
Gambar 5.6. Data Hasil Simulasi ISE-VE



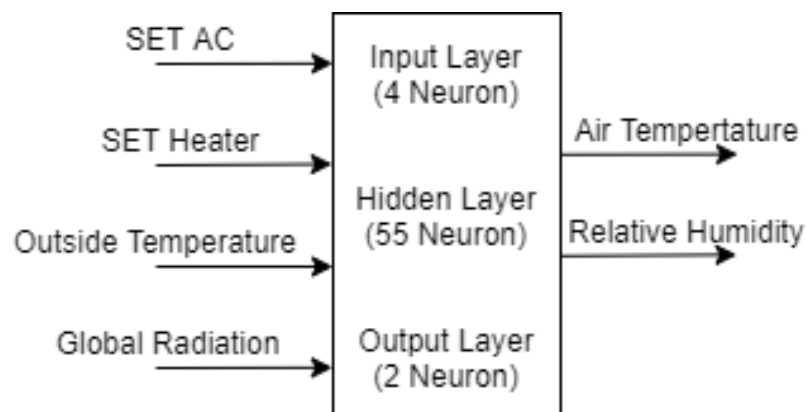
Gambar 5.7. Variabel Gangguan Simulasi ISE-VE

V.2. Pengembangan Model Plant JST

Model Plant mengacu pada model JST yang telah dibangun oleh Tri Hartanto[2] yang kemudian dikembangkan kembali untuk meningkatkan kinerjanya sebagai model *plant*. Arsitektur model dirancang dengan memperhatikan sistem plant pada Gambar 5.8. Arsitektur Model digambarkan pada Gambar 5.9 dengan *hyperparameter* yang dirangkum pada Tabel 5.2. Model dikembangkan dengan melakukan variasi pembagian data (data latih, data validasi, dan data uji) ke dalam beberapa variasi. Kinerja model JST dievaluasi dengan meninjau nilai MAE dari model tersebut.



Gambar 5.8. Blok Diagram Plant



Gambar 5.9. Arsitektur Model Plant JST

Tabel 5.2. 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.2.1. Variasi Pembagian Data

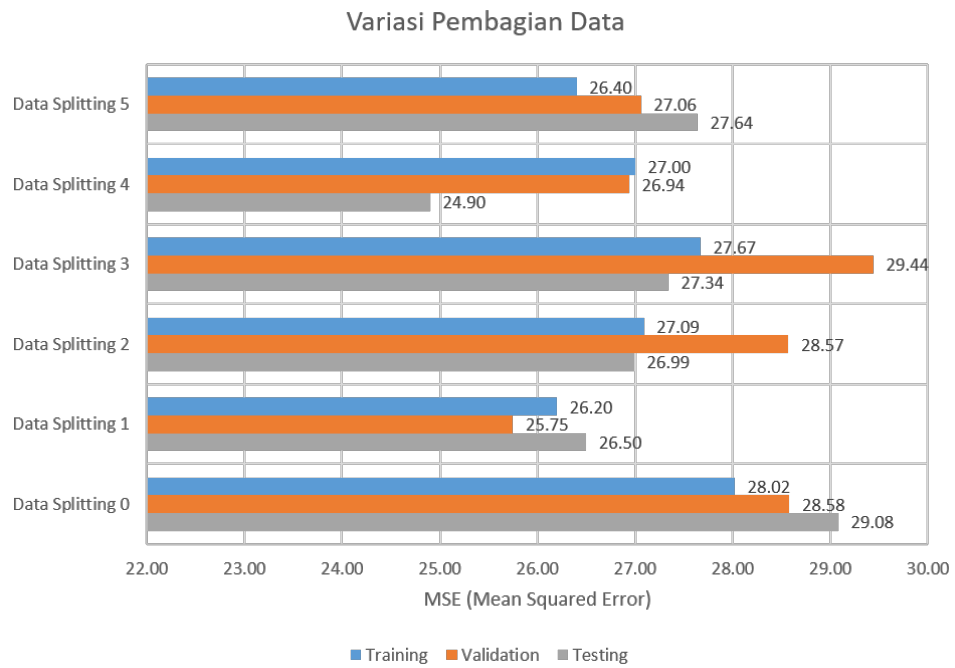
Variasi pembagian data dilakukan dengan membandingkan beberapa variasi pembagian data ke dalam 5 variasi. Kemudian kinerja dari setiap pembagian data dibandingkan dengan konfigurasi *hyperparameter* pada 5.2.

Tabel 5.3. Daftar variasi pembagian data

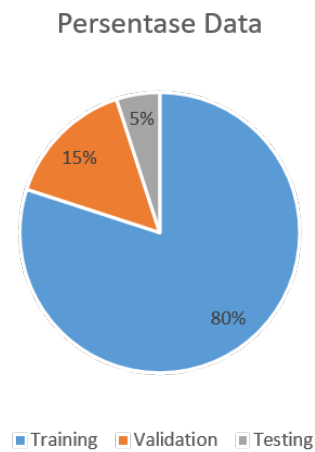
Pembagian Data	Persentase Data
Data Splitting 0	(50% 25% 25%)
Data Splitting 1	(60% 20% 20%)
Data Splitting 2	(70% 15% 15%)
Data Splitting 3	(80% 10% 10%)
Data Splitting 4	(80% 15% 05%)
Data Splitting 5	(85% 10% 05%)

Pada Tabel 5.3, "Data Splitting 0" merupakan konfigurasi pembagian data yang digunakan oleh Tri Hartanto pada penelitian sebelumnya dalam membangun model plant JST. Pada tabel yang penulis sajikan, penulis menulis pembagian data dengan format 'Data Splitting n' dan '(x% y% z%)' dimana n = nomor variasi, x = pembagian data pelatihan, y = pembagian data validasi, dan z = pembagian data pengujian. Pembagian data terbaik yang penulis gunakan yaitu pembagian data bernama "Data Splitting 4". Data dibagi menjadi 3 bagian, yakni 80% data pelatihan,

15% data validasi, dan 5% data pengujian.



Gambar 5.10. Hasil Variasi Pembagian Data



Gambar 5.11. Pembagian Data yang digunakan

V.2.2. Hasil Model Plant JST

Dari pengembangan model plant JST ini, didapatkan rancangan yang lebih baik dari hasil kinerja rancangan sebelumnya. Dengan mengubah pembagian data dari 50% 25% 25% menjadi 80% 15% 5%, nilai R model untuk kelembapan relatif pun berubah dari 68,90% menjadi sebesar 71,44%. Hasil akhir rancangan model plant JST ini dirangkum pada Tabel 5.4.

Tabel 5.4. Tabel Rancangan Model Plant JST

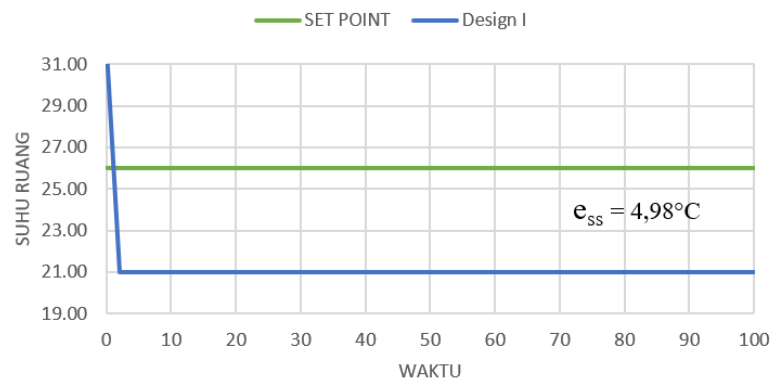
Nama Hyperparameter	Nilai Hyperparameter
Arsitektur	Feedforward Neural Network
Pembagian Data	80% 15% 5%
Jumlah Layer Tersembunyi	1
Jumlah Neuron pada Layer	[55]
Fungsi Aktivasi Layer	Hyperbolic Tangent
Algoritma Pembelajaran	Levenberg-Marquardt
Mean Absolute Error (MAE)	Tdb: 0,62°C ; RH: 5,45%
Mean Squared Error (MSE)	Tdb: 0,82°C ; RH: 54,45%
Koefisien Korelasi (R)	Tdb: 93,09% ; RH: 71,44%

V.3. Perancangan Kontroler JST

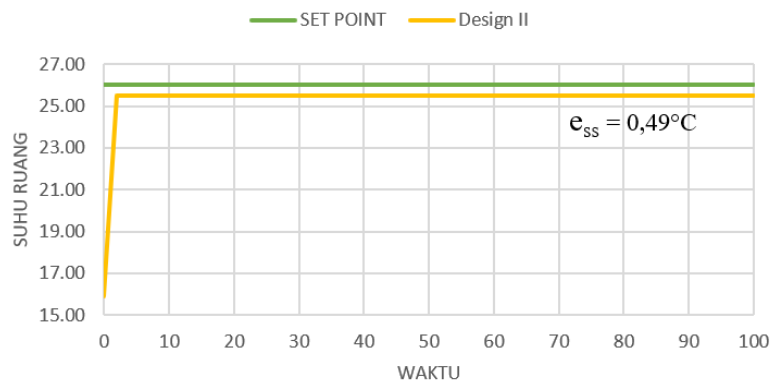
Perancangan kontroler dipilih dengan membandingkan kinerja dengan nilai *steady-state error* dari 4 rancangan kontroler berbasis jaringan saraf tiruan. Keempat rancangan kontroler tersebut adalah sebagai berikut:

1. Design I: Neural Network Inverse Model
2. Design II: NN Inverse Model dengan Umpan Variabel Manipulasi
3. Design III: NN Inverse Model dengan Umpan Variabel Gangguan
4. Design IV: NN Internal Model Control

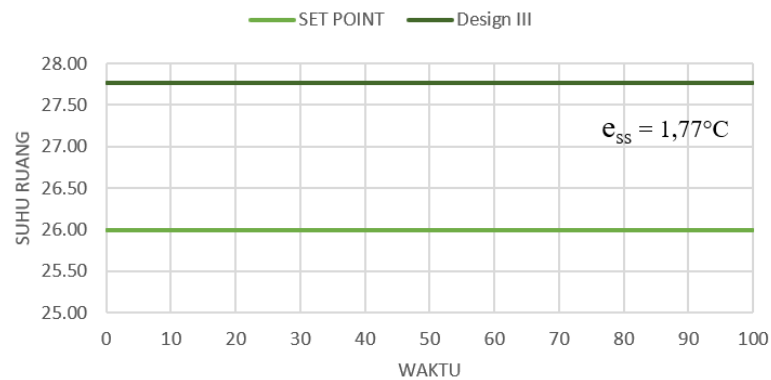
Hasil kontrol untuk suhu ruang dari empat rancangan kontroler yang digunakan dapat diamati pada Gambar 5.12, Gambar 5.13, Gambar 5.14, dan Gambar 5.15. Dari keempat rancangan tersebut dapat dilihat bahwa rancangan Design IV memiliki nilai *steady-state error* paling kecil untuk variabel suhu ruang, yaitu sebesar $0,09^{\circ}\text{C}$.



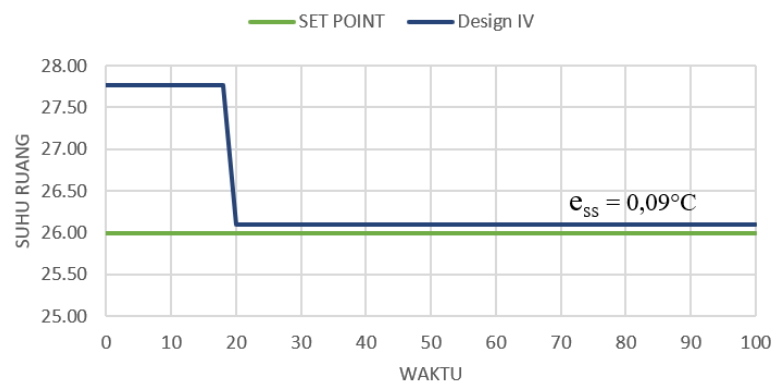
Gambar 5.12. Output Suhu Ruang Kontroler Design I



Gambar 5.13. Output Suhu Ruang Kontroler Design II

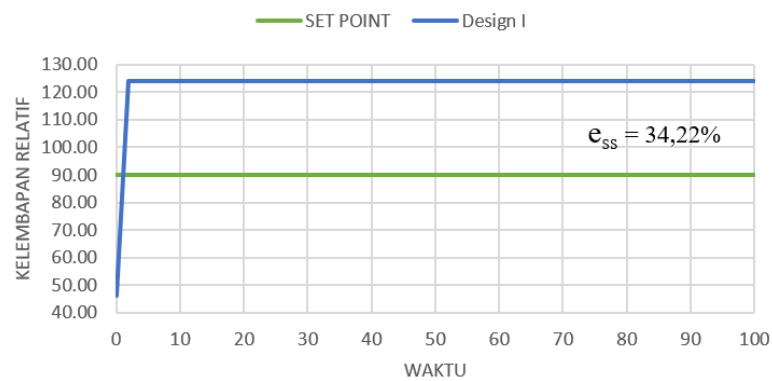


Gambar 5.14. Output Suhu Ruang Kontroler Design III

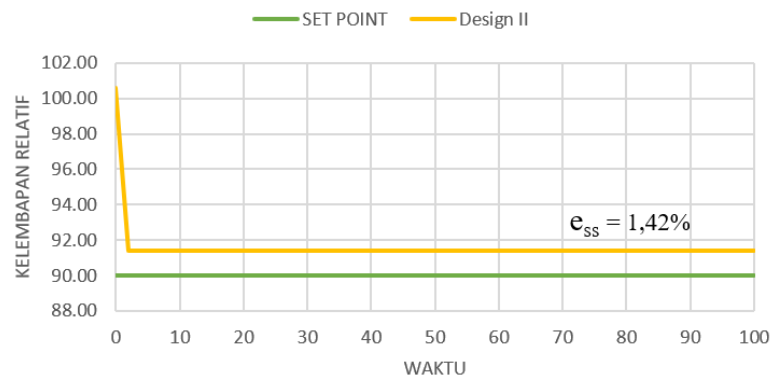


Gambar 5.15. Output Suhu Ruang Kontroler Design IV

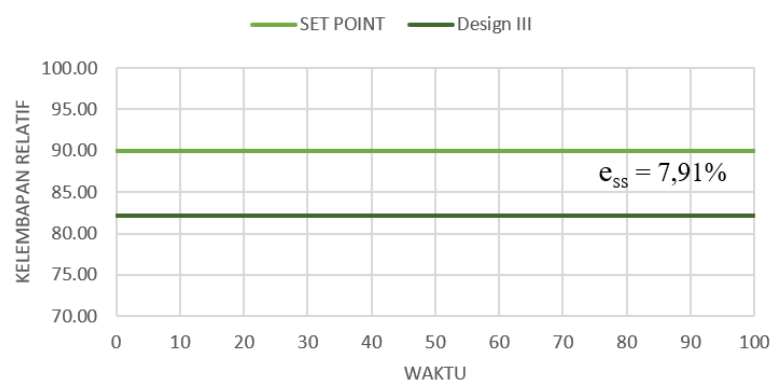
Hasil kontrol untuk kelembapan relatif dari empat rancangan kontroler yang digunakan dapat diamati pada Gambar 5.16, Gambar 5.17, Gambar 5.18, dan Gambar 5.19. Dari keempat rancangan tersebut dapat dilihat bahwa rancangan Design IV juga memiliki nilai *steady-state error* paling kecil untuk variabel kelembapan relatif, yaitu sebesar 1,24%.



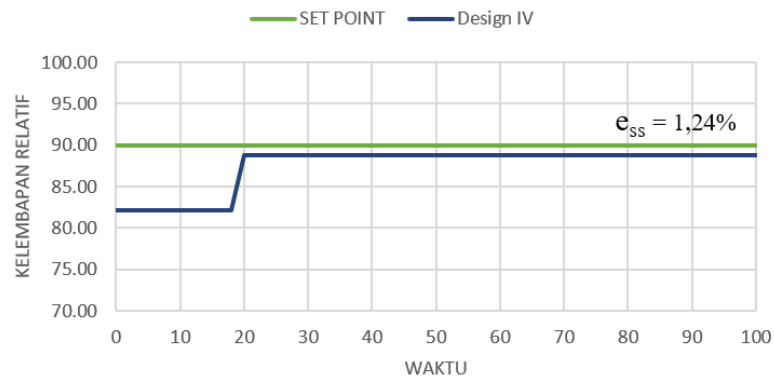
Gambar 5.16. Output Kelembapan Relatif Kontroler Design I



Gambar 5.17. Output Kelembapan Relatif Kontroler Design II



Gambar 5.18. Output Kelembapan Relatif Kontroler Design III



Gambar 5.19. Output Kelembapan Relatif Kontroler Design IV

Berdasarkan uraian diatas, dapat dilihat bahwa rancangan terbaik dengan nilai *steady-state error* paling rendah adalah rancangan Design IV: NN Internal Model Control. Sehingga rancangan ini yang dipilih untuk digunakan sebagai kontroler.

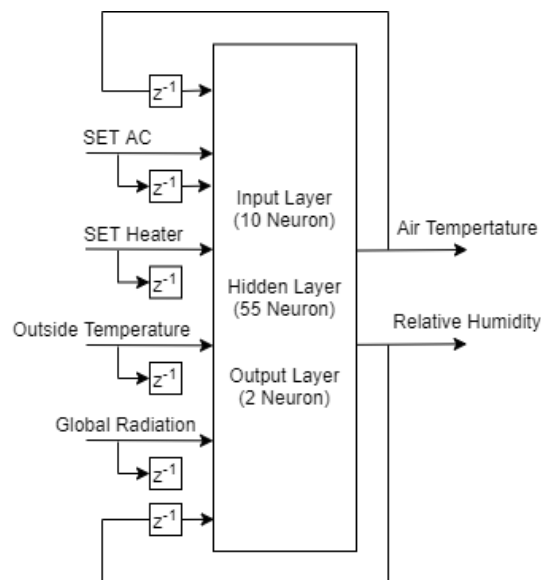
NN Internal Model Control terdiri dari 3 komponen utama, yaitu: Plant, Emulator, dan Kontroler. Emulator dibangun dari model umpan maju JST (*NN Forward Model*) dan kontroler dibangun dari model umpan balik JST (*NN Inverse Model*).

V.4. Kinerja Kontroler JST Terpilih

Kontroler JST terpilih (Design IV: NN Internal Model Control) terdiri dari 3 komponen utama, yaitu: blok plant, blok emulator, dan blok kontroler. Masing-masing dibangun oleh model jaringan saraf tiruan dengan 1 layer tersembunyi. Kinerja JST untuk Plant sudah dijelaskan pada Sub Bab 5.2. Oleh karena itu, selanjutnya akan dijelaskan kinerja model JST untuk blok emulator dan blok kontrol. Kemudian dijelaskan pula kinerja simulasi kontrol dengan 3 variasi *set point*.

V.4.1. Kinerja JST Blok Emulator

Emulator JST dibangun menyerupai rancangan model plant JST. Perbedaan-nya berada pada masukan dan keluaran dari arsitektur JST. Emulator juga menggunakan nilai Output Plant sebelumnya sebagai masukan untuk memprediksi nilai Output Plant pada saat ini. Blok diagram untuk Emulator dapat dilihat pada Gambar 5.20. Hasil kinerja emulator JST ini dijabarkan pada Tabel 5.5.



Gambar 5.20. Arsitektur NN Forward Model

Tabel 5.5. Tabel Rancangan Emulator JST (*NN Forward Model*)

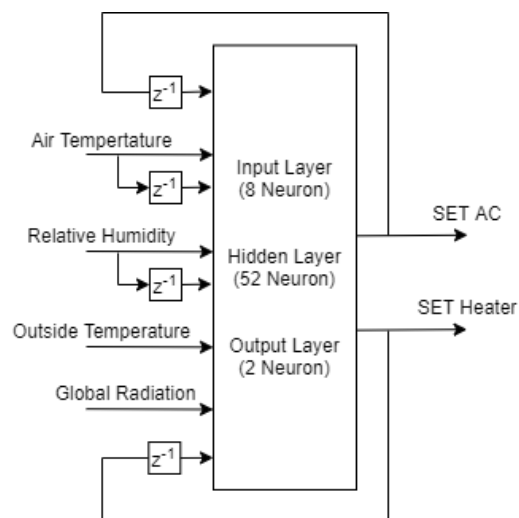
Nama Hyperparameter	Nilai Hyperparameter
Arsitektur	Feedforward Neural Network
Pembagian Data	80% 15% 5%
Jumlah Layer Tersembunyi	1
Jumlah Neuron pada Layer	[55]
Fungsi Aktivasi Layer	Hyperbolic Tangent
Algoritma Pembelajaran	Levenberg-Marquardt
Mean Absolute Error (MAE)	Tdb: 0,51°C ; RH: 1,43%
Mean Squared Error (MSE)	Tdb: 0,49°C ; RH: 5,91%
Koefisien Korelasi (R)	Tdb: 96,38% ; RH: 97,79%

V.4.2. Kinerja JST Blok Kontroler

Kontroler JST dibangun dengan proses invers dari model plant JST. Pada proses pelatihan JST, dilakukan penskalaan terhadap semua input JST menggunakan metode *Min Max Scaling* kecuali variabel delay umpan masuk SET AC dan SET Heater. Penskalaan bertujuan untuk meningkatkan kinerja JST menjadi optimal dengan menyamakan rentang nilai dan besar satuan dari setiap variabel (berupa rentang nilai dari 0 hingga 1). Masing-masing variabel diubah menjadi skala satuan dengan melakukan transformasi data secara statistik. Data dari setiap variabel akan dikurangi dengan nilai minimum variabel tersebut yang dikemudian dibagi oleh selisih dari nilai maksimum dan nilai minimum variabel tersebut. Secara lengkap dapat dirumuskan pada persamaan berikut:

$$z = \frac{x_i - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (5.1)$$

Rancangan kontroler JST mirip dengan rancangan model plant JST. Perbedaannya hanyalah pada jumlah neuron pada *hidden layer* yang berjumlah 52 neuron. Blok diagram untuk Emulator dapat dilihat pada Gambar 5.21. Hasil kinerja dari kontroler JST ini dapat dilihat pada Tabel 5.6.



Gambar 5.21. Arsitektur NN Inverse Model

Tabel 5.6. Tabel Rancangan Kontroler JST (*NN Inverse Model*)

Nama Hyperparameter	Nilai Hyperparameter
Arsitektur	Feedforward Neural Network
Pembagian Data	80% 15% 5%
Jumlah Layer Tersembunyi	1
Jumlah Neuron pada Layer	[52]
Fungsi Aktivasi Layer	Hyperbolic Tangent
Algoritma Pembelajaran	Levenberg-Marquardt
Mean Absolute Error (MAE)	AC: 0,23°C ; HT: 0,00
Mean Squared Error (MSE)	AC: 4,85°C ; HT: 0,00
Koefisien Korelasi (R)	AC: 98,41% ; HT: 99,64%

V.4.3. Kinerja Simulasi Kontrol

Kontroler terpilih diuji dengan 3 variasi kombinasi SET POINT. Kombinasi terdiri dari SET POINT untuk variabel yang diinginkan dan variabel gangguan. Ketiga variasi tersebut adalah sebagai berikut:

1. SP1

Tabel 5.7. Nilai Kombinasi SET POINT SP1

Jenis Variabel	Variabel	Nilai
SET Point	Suhu Ruang (Tdb)	26°C
SET Point	Kelembapan Relatif (RH)	90%
Variabel Gangguan	Suhu Lingkungan (To)	27°C
Variabel Gangguan	Radiasi Matahari (RD)	400 W/m ²

2. SP2

Tabel 5.8. Nilai Kombinasi SET POINT SP2

Jenis Variabel	Variabel	SET Point
SET Point	Suhu Ruang (Tdb)	27°C
SET Point	Kelembapan Relatif (RH)	85%
Variabel Gangguan	Suhu Lingkungan (To)	27°C
Variabel Gangguan	Radiasi Matahari (RD)	400 W/m ²

3. SP3

Tabel 5.9. Nilai Kombinasi SET POINT SP3

Jenis Variabel	Variabel	SET Point
SET Point	Suhu Ruang (Tdb)	Step 26°C -> 27°C
SET Point	Kelembapan Relatif (RH)	Step 90% -> 85%
Variabel Gangguan	Suhu Lingkungan (To)	27°C
Variabel Gangguan	Radiasi Matahari (RD)	400 W/m ²

V.4.3.3. SET POINT SP1

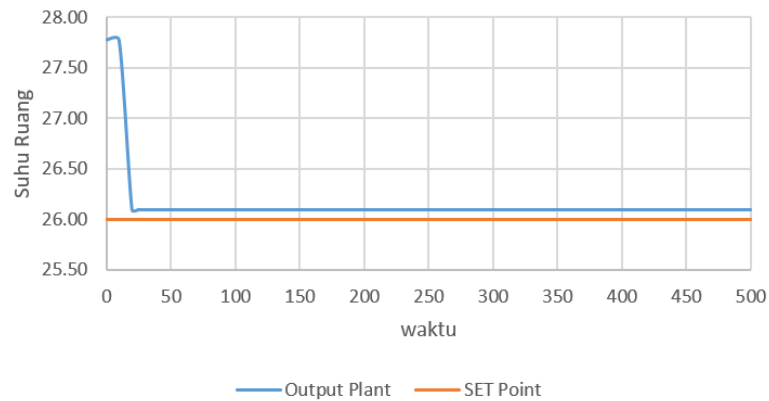
Kombinasi SET Point dapat dilihat pada Tabel 5.7. Hasil dari simulasi simulink dapat dilihat pada Gambar 5.22 dan Gambar 5.23. Pada Gambar 5.22 dan Gambar 5.23 dapat dilihat bahwa nilai *steady-state error* kontroler cukup kecil. Nilai *steady-state error* dari simulasi ini dapat dilihat pada Tabel 5.10. Grafik dari hasil simulasi dapat dilihat pada Gambar 5.22 untuk Suhu Ruang dan Gambar 5.23 untuk Kelembapan Relatif. Hasil simulasi dengan variasi SET POINT SP1 menunjukkan bahwa kontroler memiliki kinerja yang cukup baik dan sudah dapat mengikuti nilai SET POINT yang diinginkan dengan nilai *steady-state error* sebesar 0,09°C untuk suhu ruang dan 1,24% untuk kelembapan relatif.

Tabel 5.10. Hasil Simulasi Kontrol SP1

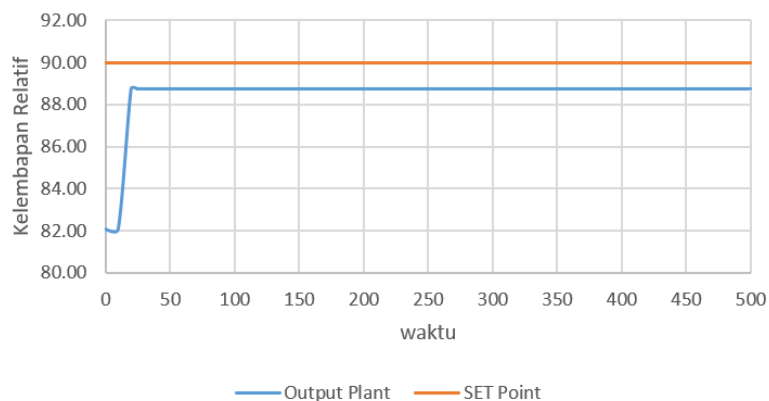
Variabel	SET Point	Output Plant	Steady-State Error
Suhu Ruang (Tdb)	26°C	26,09°C	0,09°C
Kelembapan Relatif (RH)	90%	88,76%	1,24%

Dengan adanya emulator pada sistem kontrol, maka kontroler mampu menyesuaikan perbedaan nilai antara plant dan emulator. Rancangan ini akan menekan perbedaan antara plant dan emulator untuk mencapai nilai yang cukup kecil sehingga kontroler mampu mengendalikan suhu ruang dan kelembapan relatif sesuai dengan *set point*.

Pada Gambar 5.22 dan Gambar 5.23 dapat dilihat bahwa kontroler mengendalikan nilai output sistem mendekati nilai *set point* pada detik ke-0 hingga detik ke-25.



Gambar 5.22. Hasil Simulasi Kontrol untuk Suhu Ruang SP1



Gambar 5.23. Hasil Simulasi Kontrol untuk Kelembapan Relatif SP1

V.4.3.3. SET POINT SP2

Kombinasi SET Point dapat dilihat pada Tabel 5.8. Hasil dari simulasi simulink dapat dilihat pada Gambar 5.24 dan Gambar 5.25. Pada Gambar 5.24 dan Gambar 5.25 dapat dilihat bahwa nilai *steady-state error* kontroler cukup kecil. Nilai *steady-state error* dari simulasi ini dapat dilihat pada Tabel 5.11. Grafik dari hasil simulasi dapat dilihat pada Gambar 5.24 untuk Suhu Ruang dan Gambar 5.25 untuk

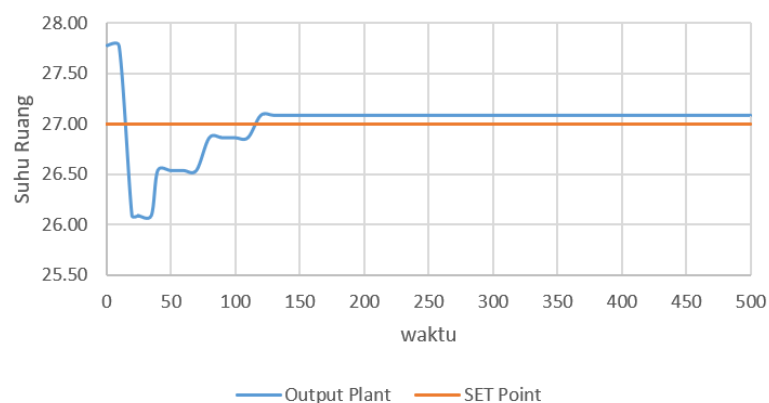
Kelembapan Relatif. Hasil simulasi dengan variasi SET POINT SP2 menunjukkan bahwa kontroler memiliki kinerja yang cukup baik dan sudah dapat mengikuti nilai SET POINT yang diinginkan dengan nilai *steady-state error* sebesar $0,09^{\circ}\text{C}$ untuk suhu ruang dan $1,14\%$ untuk kelembapan relatif.

Tabel 5.11. Hasil Simulasi Kontrol SP2

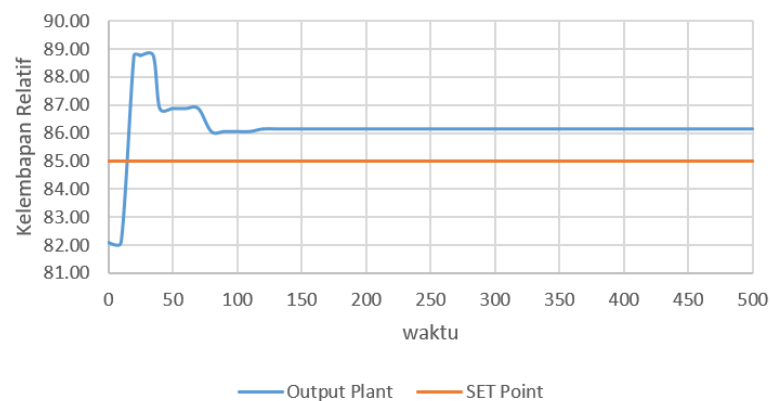
Variabel	SET Point	Output Plant	Steady-State Error
Suhu Ruang (Tdb)	27°C	$27,09^{\circ}\text{C}$	$0,09^{\circ}\text{C}$
Kelembapan Relatif (RH)	85%	86,14%	1,14%

Dengan adanya emulator pada sistem kontrol, maka kontroler mampu menyesuaikan perbedaan nilai antara plant dan emulator. Rancangan ini akan menekan perbedaan antara plant dan emulator untuk mencapai nilai yang cukup kecil sehingga kontroler mampu mengendalikan suhu ruang dan kelembapan relatif sesuai dengan *set point*.

Pada Gambar 5.24 dan Gambar 5.25 dapat dilihat bahwa kontroler mengendalikan nilai output sistem mendekati nilai *set point* pada detik ke-0 hingga detik ke-125.



Gambar 5.24. Hasil Simulasi Kontrol untuk Suhu Ruang SP2



Gambar 5.25. Hasil Simulasi Kontrol untuk Kelembapan Relatif SP2

V.4.3.3. SET POINT SP3

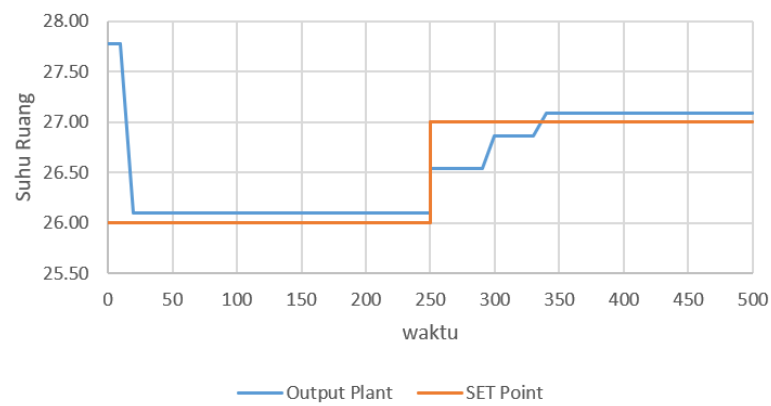
Kombinasi SET Point dapat dilihat pada Tabel 5.9. Hasil dari simulasi simulink dapat dilihat pada Gambar 5.26 dan Gambar 5.27. Pada Gambar 5.26 dan Gambar 5.27 dapat dilihat bahwa nilai *steady-state error* kontroler cukup kecil. Nilai *steady-state error* dari simulasi ini dapat dilihat pada Tabel 5.12. Grafik dari hasil simulasi dapat dilihat pada Gambar 5.26 untuk Suhu Ruang dan Gambar 5.27 untuk Kelembapan Relatif. Hasil simulasi dengan variasi SET POINT SP3 menunjukkan bahwa kontroler memiliki kinerja yang cukup baik dan sudah dapat mengikuti nilai SET POINT yang diinginkan.

Tabel 5.12. Hasil Simulasi Kontrol SP3

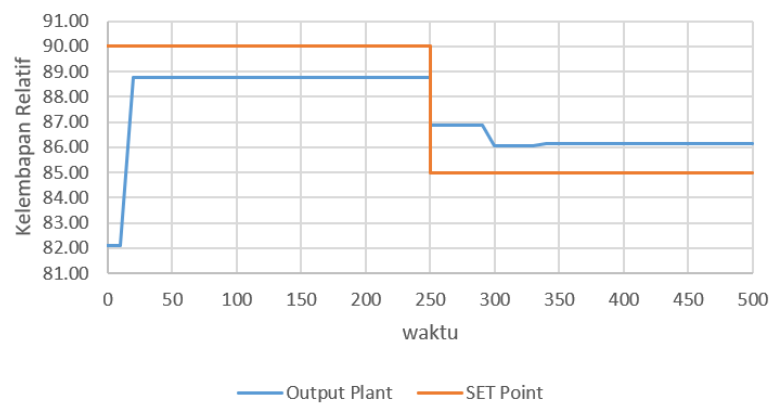
Variabel	SET Point	Output Plant	Steady-State Error
Suhu Ruang (Tdb)	Step 26°C -> 27°C	27,09°C	0,09°C
Kelembapan Relatif (RH)	Step 90% -> 85%	86,14%	1,14%

Dengan adanya emulator pada sistem kontrol, maka kontroler mampu menyesuaikan perbedaan nilai antara plant dan emulator. Rancangan ini akan menekan perbedaan antara plant dan emulator untuk mencapai nilai yang cukup kecil sehingga kontroler mampu mengendalikan suhu ruang dan kelembapan relatif sesuai dengan *set point*.

Pada Gambar 5.26 dan Gambar 5.27 dapat dilihat bahwa kontroler mengendalikan nilai output sistem mendekati nilai *set point* pada proses transisi fungsi step pada detik ke-250 hingga detik ke-350.



Gambar 5.26. Hasil Simulasi Kontrol untuk Suhu Ruang SP3



Gambar 5.27. Hasil Simulasi Kontrol untuk Kelembapan Relatif SP3

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

VI.1. Kesimpulan

Berikut merupakan beberapa kesimpulan yang didapatkan dari pengerjaan Tugas Akhir dan penulisan skripsi ini:

1. Dengan adanya komponen emulator, kontroler dengan rancangan *Internal Model Control* berbasis Jaringan Saraf Tiruan memiliki kinerja paling baik dengan nilai *steady-state error* sebesar $0,09^{\circ}\text{C}$ untuk suhu ruang dan sebesar 1,24% untuk kelembapan relatif.
2. Kontroler berbasis jaringan saraf tiruan yang dihasilkan dibangun dengan pembagian data 80% data latih, 15% data validasi, dan 5% data uji. Model Kontroler JST menggunakan fungsi aktivasi *hyperbolic tangent* dengan algoritma pembelajaran Levenberg-Marquardt. Model Kontroler JST terdiri dari 1 lapisan tersembunyi dengan 52 neuron.

VI.2. Saran

Berikut merupakan saran-saran untuk pengembangan kontroler ini agar menjadi lebih baik pada penelitian-penelitian selanjutnya:

1. Menambahkan semacam manipulator/aktuator pada *climate chamber* untuk memanipulasi kelembapan relatif ruang secara langsung. Contoh: *humidifier*.
2. Menggunakan Jaringan Saraf Tiruan jenis *Reinforcement Learning* dengan penerimaan data pengukuran langsung untuk pengembangan sistem kontrol pada penelitian-penelitian *climate chamber* selanjutnya.

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] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Jin Woo Moon dan Jong-Jin Kim. “ANN-Based Thermal Control Models for Residential Buildings”. *Elsevier Ltd.*, 2010.

- [13] 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.
- [14] Ján Drgoňa, Damien Picard, Michal Kvasnica dan Lieve Helsen. “Approximate Model Predictive Building Control via Machine Learning”. *Elsevier Ltd.*, 2018.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Hugo Hens. *Building Physics - Heat, Air and Moisture: Fundamentals and Engineering Methods with Examples and Exercises*. Ernst and Sohn, Berlin, Germany, 2007.
- [18] BSN. *SNI 03-6390-2000: Konservasi Energi Sistem Tata Udara pada Bangunan Gedung*. Badan Standardisasi Nasional, 2000.
- [19] 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.
- [20] Liangyu Ma, Kwang Y. Lee dan Zhiyan Wang. “Intelligent Coordinated Controller Design for a 600 MW Supercritical Boiler Unit Based on Expanded-Structure Neural Network Inverse Models”. *Journal of Control Engineering Practice, Elsevier Ltd.*, 53:194–201, 2016.
- [21] M. A. Hussain, J. M. Ali dan M. J. H. Khan. “Neural Network Inverse Model Control Strategy: Discrete-Time Stability Analysis for Relative Order Two Systems”. *Hindawi*, 2014.

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 Plant JST

Tabel A.2. Bobot-bobot Model Plant JST

lw				b1	Lw		b2
0.708464608	-0.033621028	7.458550526	-12.1179871	-10.6759864	1.045357634	-6.698286708	1.17608299
0.985342937	0.017970681	0.297881614	2.673697433	-2.44857579	-0.686441559	2.969300886	-0.239146885
-1.909803045	-0.351980362	0.915922726	1.11710867	2.350778708	0.615214664	-2.471121896	
-2.458155083	2.830116341	3.098534216	4.030081089	6.413402073	-0.349778551	1.271661614	
2.744936316	4.274860715	-5.255579659	2.684780398	-3.42376582	0.623207113	-1.649511095	
-1.828929851	-0.138283731	2.552273255	3.27392567	3.379679632	-0.657514522	3.001682039	
0.698196279	0.006920322	7.370060478	-12.494702	-10.8336908	-1.096493845	6.63151271	
1.561808997	-1.504529509	3.794606273	3.455744415	4.120518286	-0.377297301	0.825607225	
-0.326869448	-2.088275711	6.193920298	-2.46845179	4.683057575	0.843544036	-2.997692588	
-1.497651917	2.467057556	-7.829361027	4.20499748	3.491324662	-0.283551059	1.36148903	
0.123311359	0.457387013	-10.18007155	-1.87410541	-5.57499274	0.314301491	-1.324249038	
-2.624403064	-1.514917398	2.209788836	2.374480735	3.164217701	-0.209892607	0.760202773	
-1.891960361	-3.426822093	-2.412960615	-0.2547786	2.683401183	-1.033531967	3.636785139	
-1.878202476	-0.002251884	-0.400901735	-4.00130703	3.450273585	-0.129757602	0.645243977	
-0.27035424	-1.149152934	-1.809029604	-0.19268117	0.904823784	-0.902134412	3.280154368	
-2.059059067	-2.544426499	-3.23167477	-0.78745921	3.038877334	0.551554799	-1.948705632	
1.641273976	-0.101279554	-3.042940289	-3.37518923	-3.33169911	-0.706551502	2.427483356	
-1.149455633	-1.623196401	-0.978865203	-2.60540341	-0.1353475	0.10294165	-0.602810425	
3.567875386	0.00064446	-3.644768202	0.280724801	1.044675763	0.489370059	-3.301387075	
3.171311402	8.456798755	-10.65323793	2.831156069	-7.75777596	0.205504486	-0.988971646	
6.153943387	5.60608602	-0.635668215	0.44265036	1.147397785	0.015194166	-0.294419791	
1.774910482	4.051627764	8.244996627	-7.77695344	-1.25862005	0.104351499	-0.363728009	
-2.975521494	-5.666150237	3.031381383	3.867739735	-1.57617132	0.166098104	-0.577984886	
0.33737428	-5.223300106	-2.977678054	2.374904447	-4.40257958	1.030803764	-3.648089761	
-1.472174225	0.393102381	-5.271802764	3.50153353	1.420820454	0.327066983	-1.708872836	
-0.398174091	2.478433629	0.533623092	1.122031568	-0.67235035	-0.642193036	2.244160606	
2.162199635	0.76900597	-0.046330786	-0.20489736	0.105345747	0.495776702	2.487254965	
3.132289275	-3.102026786	6.888065975	1.489487023	-0.07273804	-0.116057665	0.351251305	
-0.608846934	0.061189336	26.1494955	-1.43839781	9.661188202	0.118796445	-0.603819757	
0.089927335	5.268819173	2.742427704	2.286310563	1.881842187	0.089704916	-0.390843977	
2.61275364	7.836804104	-12.54900272	1.462642461	0.512443323	0.117893811	-0.458433061	
-2.430011076	3.906263047	3.893381358	-1.41277687	-0.49266671	-0.827932668	2.344305394	
-3.879446285	1.248208509	0.153743191	-0.37738558	-2.61772772	2.583490465	-3.624582822	
0.738227355	-0.074200333	-1.238263253	6.960064083	1.122458867	-0.107659777	0.281500492	
0.008335883	-4.050499227	-7.186241486	4.254890112	-2.00397651	-0.527409178	2.160292056	
3.695350913	2.879929494	-1.15372452	0.01088236	1.380318678	0.234772313	-0.865835053	
-0.474840161	6.749280387	-4.912345567	2.794904631	3.096164645	0.361833601	-1.613903802	
-1.218600422	4.776540944	-6.259445007	3.711381954	-0.41028129	0.68160409	-3.690930838	
-3.161010009	-0.12144464	3.818271311	-0.35429001	-1.54103583	0.990546763	-5.025392726	
-0.053986188	0.060823003	0.175548529	-2.32498051	-2.60984686	1.023846408	-1.9922673	
2.411789737	-2.364969652	-9.35155717	1.942218352	3.608967147	-0.235385584	0.862018056	
2.367996572	0.38495737	-3.924200325	0.553183579	2.447430527	1.039934134	-4.209217735	
-4.288653028	-2.637875008	1.414890298	-5.06560412	-8.25115899	0.175924534	-0.695515325	
0.476264276	-0.016235343	-0.522090968	1.41593631	-1.50294853	1.108581285	-5.481874261	
1.557331689	-0.40342358	-8.968279405	5.136483651	4.711198978	-0.29542878	1.256885281	
0.800617138	-0.539152462	6.462845446	-1.42593848	2.529563657	-0.578067265	1.997594359	
0.803357412	-2.152279911	3.92553518	-1.94852909	0.298772155	0.975312978	-5.08206395	
-1.952525267	-2.634474888	9.29956536	-5.97666827	-8.18375342	-0.213688071	0.753080369	
-7.277074567	2.86011676	-12.44897359	5.732651352	-6.24831347	-0.150236669	0.603485241	
-0.945385164	0.525121993	-1.079977127	-0.76017405	-1.29167111	-2.382131788	5.377156251	
0.981600019	0.228924334	1.159777322	3.764590567	-6.13519689	-0.572580452	3.452538334	
1.700792137	3.206076276	1.069866956	-0.12029581	-2.10940193	-0.441245717	2.059957408	
-0.471801806	0.539432695	9.224462746	-1.31052749	-7.41853303	0.307888388	-1.100437356	
-0.346019699	5.466177119	17.66431615	-1.83649703	-9.28406386	-0.128147148	0.553549017	
1.126403086	4.061354887	2.192130264	-2.58093603	3.817949618	0.305406521	-1.496630254	

A.3. Bobot-bobot Model Emulator JST

Tabel A.3. Bobot-bobot Model Emulator JST

lw											b1	Lw		b2
-0.52852	0.022664	-0.67976	0.670248	-0.28926	-0.32285	0.781428	-1.03417	0.684606	-0.34424		2.499740199	0.26592611	0.274336218	0.250159
-0.37844	-0.33661	0.587602	0.915035	0.762917	0.74368	0.882599	0.344794	-0.57149	-0.19961		1.969474693	-0.141735853	-0.067042858	-0.40509
-0.18641	-0.84907	0.128801	-0.28985	0.271182	0.657347	-1.0946	0.018758	-0.60496	-1.10779		1.493807666	0.125314786	-0.375637934	
-0.75149	0.399576	-0.61292	0.024738	-1.10418	0.538928	-0.8013	-0.00545	-0.61977	-0.87738		1.739511607	-0.013604854	0.02260414	
1.106342	0.019657	0.093146	1.095736	-0.28394	0.941831	-0.53306	-0.40967	-0.32127	-0.93473		-1.695220112	0.015188429	0.009464704	
0.532754	0.311208	0.951004	0.195696	0.549168	-1.01135	-0.53075	-1.01338	0.375412	-0.57511		-1.69449846	-0.018838795	0.050601585	
-0.95282	-0.45691	0.386136	0.451392	0.48825	0.27115	-0.1968	0.711807	1.104765	0.614038		1.741684018	0.011643936	-0.055882426	
0.170894	0.608982	1.852352	-0.37809	-0.61115	0.270004	-1.77953	0.662256	0.846389	0.129431		0.432278712	-0.171925388	0.52276687	
0.51738	-0.74653	-0.63615	0.320029	-0.83353	0.533363	0.256007	0.759956	-0.91614	-0.59563		-1.293350097	0.0772342	-0.003546553	
0.901009	-0.28579	-0.62841	0.50009	0.79662	0.169838	0.881577	-0.87605	0.2505	0.846303		-1.366545747	-0.216065854	0.016292158	
0.972078	0.629071	-0.98013	0.18708	-0.6635	0.110591	-0.47855	0.34402	0.810719	-0.19144		-1.167233212	0.207195601	-0.079176148	
-0.94663	-0.21366	-1.75056	-0.86342	0.235632	-0.2166	0.744997	0.79574	0.020713	0.033342		1.276125894	-0.367037701	0.165649551	
0.54102	0.333764	-0.38055	1.131076	-0.57404	-0.25038	0.85084	-0.28205	-0.5325	-0.63922		-1.41566779	-0.059293756	0.086608797	
-0.45113	-0.11035	-1.58662	-0.57652	-0.09967	0.536922	1.543754	-0.25714	0.228198	-0.27397		0.464896924	-0.038846684	0.290969775	
1.37675	0.332246	-0.16694	0.301077	1.019629	-0.25673	-0.79438	-0.81005	0.100789	-0.10367		-0.942428352	0.16622799	0.043443374	
0.799885	0.541469	0.194431	0.329031	0.719066	-0.30308	1.179706	-0.79316	0.862567	-0.19953		-0.522613026	0.079942265	0.023457677	
-1.18312	-0.48613	0.475665	0.119704	1.270704	-0.13334	-0.64126	0.597508	0.840302	0.316384		0.780752506	0.039693907	-0.040706909	
0.500552	-0.41098	-0.84694	0.492075	0.662463	0.59448	-0.25772	0.697646	-0.06448	0.885602		-0.669766646	0.010342785	0.01337678	
1.17603	0.853482	0.424575	-0.34516	0.417697	0.449112	0.922839	-1.04478	0.549286	0.949984		-0.682650574	0.034194496	-0.030513731	
0.268902	0.899222	-1.24804	-0.39943	-0.56105	-0.30042	1.261745	-0.7953	-0.27618	0.598346		-0.828998902	0.069164135	-0.106735245	
0.696779	-0.32458	0.619358	1.045829	0.029168	-0.1276	0.262405	-0.66146	0.769767	0.487019		-0.415672238	0.068617172	-0.010533305	
-0.22402	0.756333	0.68955	0.273756	-0.83151	-0.67412	0.921741	0.431653	-0.15391	-0.51838		-0.365373254	0.020898169	-0.008735282	
0.781724	0.910184	0.966286	0.700011	0.155255	-0.022	0.439815	-0.26983	-0.56241	0.141929		-0.158284401	0.279000225	0.002267001	
0.344311	-0.85662	0.458536	-0.14462	-0.75541	-0.43686	-0.59125	-0.16085	0.547615	0.746339		-0.218810009	0.065259309	-0.165901874	
0.679335	-0.80026	0.854504	-0.85729	-0.12809	0.097608	1.077838	0.547533	0.725136	0.666549		-0.207406807	0.013459576	0.046174996	
-0.74414	-0.48309	0.552734	-1.08821	0.248665	0.665067	-0.41511	0.546372	0.216779	-0.88674		0.704102146	-0.236247453	-0.07343212	
-0.36135	0.774359	1.204631	0.749787	-0.48438	-0.02484	-1.14674	-0.62849	0.347701	0.109996		0.331270941	-0.21277139	0.144422188	
-0.41935	0.932111	-0.24815	-0.18994	-0.94015	-0.40096	-0.31142	0.470438	-1.20067	-1.10245		-0.207581661	0.043893038	-0.036415799	
-0.04563	0.027566	-0.31203	0.378695	-1.00476	1.234209	-0.59801	0.530182	-0.18532	-0.90133		0.003683839	-0.084884497	-0.012817513	
0.730303	1.06728	-0.59436	0.866276	-0.4245	0.27635	-0.39027	0.283433	-1.01077	-0.00202		0.171685689	0.0815664	0.011564474	
0.273356	-0.58421	-0.47597	0.043072	-0.71438	0.858882	-0.15906	-1.33363	0.020421	-0.7408		0.052827645	0.002806594	-0.021114842	
-0.60982	0.561466	0.698465	0.895992	0.80526	-0.47232	-0.87854	-0.37408	-0.92074	0.160118		0.107990986	-0.089777484	0.134718429	
0.021145	0.65648	1.08842	-0.55196	-0.57811	-0.20781	-1.31965	-0.01012	-0.71295	-0.1248		-0.536533928	-0.099533416	0.118916824	
1.02329	-0.74204	-0.58135	-0.16703	0.229866	0.865322	-0.51276	0.328248	0.30401	0.455166		0.043029286	-0.028092584	0.029759827	
-1.18105	0.279697	1.118022	-0.61884	0.577123	0.43609	0.74789	-0.69622	-0.29649	0.055972		-0.471084058	0.036026775	-0.017432737	
-0.41964	-0.11631	-1.31469	-0.66044	-0.4278	0.775266	0.729467	0.587065	-0.59829	0.377206		-0.751306123	0.139184297	-0.243751385	
-0.7945	0.958269	0.500596	-0.12869	0.175469	-0.25702	1.059414	-0.78173	-1.25112	-0.09116		-0.799073896	-0.008416483	-0.00485541	
0.632544	0.678858	-0.87905	0.01626	-0.43298	0.044421	0.300316	-1.03929	-1.10664	-0.78416		0.918012867	-0.001861488	0.025476993	
-0.11215	-0.58616	-0.2671	0.681669	0.047068	0.01241	0.769939	-0.22236	0.249792	0.308383		-0.438010429	0.054444672	-0.364019168	
0.697892	-1.03901	0.715878	-0.46665	-0.83573	0.398852	0.332802	0.79265	0.547592	0.308493		1.243437702	-0.017241291	-0.107486765	
-0.66436	-1.01999	0.298857	-0.30212	0.300413	0.675671	0.465704	0.607843	-0.87506	0.546741		-1.339500934	-0.113053411	-0.207619936	
-0.57302	0.646162	1.183366	-0.13813	1.176291	-0.02294	0.108404	0.23163	-0.12417	0.483334		-1.024458053	0.031610205	-0.159129097	
0.682092	0.300429	0.343686	0.565285	-0.58723	-0.56305	0.597129	0.582754	-0.53427	-0.90433		0.927637255	-0.039696836	0.019912291	
-0.82585	-0.34582	-0.37796	-0.99523	0.171221	-0.14204	0.403933	0.356477	0.758467	-0.5773		-1.113064341	-0.207380046	0.03816524	
-0.02471	0.002846	-0.14667	0.711003	-0.04614	0.501506	0.442076	0.218824	-0.36094	-1.447		-1.05743681	0.015471146	-0.072049713	
-0.15631	-0.64041	-1.30198	0.133791	-0.0391	0.900128	-0.07265	-0.37878	0.457747	-0.90738		-1.600694485	0.110420592	-0.416286455	
0.124779	-0.10343	-0.47799	0.738849	0.274427	-0.79031	0.602377	-0.66861	0.172033	-0.37572		0.865679462	0.123144983	-0.359969874	
-0.69281	0.505084	-0.66247	0.015621	-0.11006	0.398987	-0.28379	-0.16708	-1.38075	0.682756		-1.284459389	-0.082158403	0.084573058	
0.363066	0.482181	1.200315	0.352585	-0.68741	0.649029	0.179596	0.771557	-0.48219	-1.00221		1.523356372	-0.045575451	0.091767069	
-0.25739	1.295551	0.384925	0.518845	0.00538	0.330968	-0.4149	-0.34081	0.02961	-0.47247		-2.132978782	-0.329860332	0.371858972	
0.537397	0.314328	-0.27092	-0.23015	-0.37023	-0.96404	-1.0305	1.115255	-0.31013	-0.22003		1.685049461	-0.050386312	0.025311868	
-0.50432	-0.64089	-1.04323	0.23218	0.569448	-0.40675	-0.66161	-0.51345	0.047197	0.478042		1.749673466	0.116348904	-0.198125326	
-0.73872	0.273204	-0.1424	-0.90449	-0.05984	0.946452	-0.44105	-0.87958	-0.81964	-0.53896		-1.698242684	-0.04703436	0.075808939	
0.599303	-0.95812	0.458103	-0.44015	-0.90014	-0.12005	0.415143	-1.16002	0.057935	0.742573		2.012863145	-0.014936553	-0.048364255	
0.57742	0.892465	0.54621	-0.39448	-0.04177	-1.14229	0.679341	0.000563	-0.18585	-0.11983		2.122298192	-0.263479121	0.169731853	

A.4. Bobot-bobot Model Kontroler JST

Tabel A.4. Bobot-bobot Model Kontroler JST

lw								b1	Lw		b2
-0.94813	0.964158	0.39439	-0.96042	-0.87599	0.59134	0.717609	-1.17738	2.381701785	-0.098001117	0.568555858	-0.02776
-1.5295	-0.7604	0.891437	0.496837	1.783393	-2.31147	1.822631	0.10195	2.978473354	1.846392638	-0.429087269	-0.90034
0.020241	-1.0496	0.017461	1.200416	1.375227	1.015215	-0.07211	-0.01101	2.21476189	-1.121393755	0.771166582	
-1.17863	-1.04526	0.654539	-1.00354	0.23636	-0.54015	0.740367	1.628008	1.983394385	-0.042958772	-0.109699696	
0.576541	0.979047	-0.82106	-1.15727	0.517447	-0.22514	1.596138	-0.39317	-2.015341914	0.655398092	-0.575275728	
-1.04948	1.611722	1.112714	0.092823	-1.12668	-0.82714	-0.64644	0.790656	2.160976762	-0.072876876	-0.074782842	
-0.71553	0.346946	-0.53192	-0.93957	0.939946	-1.37835	-0.67466	0.287276	2.080238461	-0.105651887	0.125366782	
-1.14587	-1.57964	-1.23839	0.645415	0.306536	-0.19605	-0.32613	-0.32646	1.64131082	-0.204243033	0.01616263	
-0.34626	0.697553	1.231885	-0.79962	0.169746	-0.46399	-0.86446	0.971233	1.471437413	-0.257264054	0.269441782	
-0.83851	-1.07394	0.107825	0.641811	-1.4943	0.141573	-0.13423	-0.23813	1.273766458	0.766439587	-0.34951154	
1.462376	-1.09878	0.958723	-0.57257	0.654609	-0.20216	-0.96375	-0.90437	-1.688433827	-0.004820049	0.023469071	
-0.93515	0.490718	-0.76188	0.350327	1.40664	1.727118	0.866564	0.94986	0.868962258	0.156040475	0.098042479	
-0.90832	0.322977	-0.50704	-0.9424	-0.95154	-0.09343	1.117346	1.492375	1.76779244	0.175783941	0.012431042	
-1.13207	0.156631	-1.71815	0.13871	-0.54754	0.24716	-0.49844	1.2113	1.274404304	0.099318705	0.136487805	
-0.52762	0.62753	0.486996	-1.10398	-1.12563	-0.693	-0.22261	-1.76173	1.015809619	-0.297288746	-0.401399616	
-1.02569	0.565788	0.509867	0.047751	1.129104	-0.14544	1.337083	-1.35036	0.90644658	0.20689574	-0.006422609	
-0.1607	0.72187	-0.18503	1.083104	-0.47045	-0.75078	1.425012	-0.89172	-0.765461512	-0.039562338	-0.042917759	
0.886219	-1.24987	0.175867	-0.64714	-0.55067	1.079979	0.87444	-0.21714	-0.778588649	0.10589969	0.123034823	
-0.06945	1.332623	-0.93887	0.49001	-1.28998	-0.65183	0.752509	-0.71028	-0.438190351	-0.070101866	0.050661435	
-1.50374	1.655256	-0.24664	-0.80542	-0.39358	-0.23239	0.566173	1.151702	1.10476989	-0.068967606	-0.002672293	
-0.91849	0.942897	0.642166	0.293605	-1.47674	-0.99173	-0.07997	-0.62091	0.562250446	0.113816559	0.097008114	
0.429572	-0.97577	0.241509	1.092044	1.456627	0.006339	0.64274	-1.18283	0.04870597	0.227058266	-0.082033933	
0.843551	0.163338	-0.81503	0.016866	1.154948	-0.74889	-0.9783	-0.36003	-1.11786446	0.786749467	-0.315447837	
0.149643	-0.16165	-1.04893	-0.44001	0.966478	-0.9398	-0.97217	0.515136	-0.791968105	-0.500931832	0.201096502	
-0.85876	1.295685	-0.49967	-0.75398	-1.15123	0.326097	0.775502	-0.16485	-0.121986541	-0.203238861	0.109115019	
0.599138	0.053684	-1.66446	-0.1101	0.822076	-0.77171	0.476757	-0.74506	-0.503086173	0.07122791	0.101855995	
-1.33234	0.244631	-1.12383	-0.53252	1.675852	0.465083	-0.47284	-0.57393	0.610617758	0.342565723	0.021345645	
-1.23807	0.230558	0.813025	-1.10383	0.467724	-0.49709	0.650696	-2.13847	-0.769216133	-0.421019252	-0.086973312	
0.986619	-1.07128	0.824891	-0.15902	0.071284	-0.13748	1.463797	-0.59661	-0.297761215	0.170269785	0.032901452	
-1.36106	-1.0872	-0.23059	-0.0723	-0.31312	-1.31349	0.121107	0.921581	-0.330172397	-0.035034315	0.156297404	
-1.24588	0.675765	-0.87511	-0.29866	0.868068	0.749465	-0.28664	0.874556	-0.306620615	0.133900167	-0.06760143	
0.428227	-0.68691	0.597991	-0.04916	-0.76856	0.214753	0.562355	-1.27205	0.023892905	0.20819209	0.038118102	
0.453545	-0.19803	-0.93918	-1.10754	-1.23044	1.398146	-0.21258	-0.2995	0.706690947	-0.344938045	0.015310879	
-0.0093	0.211735	-1.26017	-0.35807	1.388386	0.411842	-1.32532	-0.54469	0.884722247	-0.427174605	-0.376433293	
0.752966	-1.28352	-1.58882	-0.8217	0.556906	-0.00668	0.29947	0.166964	0.897913134	-0.51724847	-0.211927326	
0.605012	-0.8829	-1.65179	1.092926	0.453012	1.123349	1.071627	0.102226	2.015890031	1.501641765	-0.776745916	
1.539932	-1.12222	-1.64049	1.512453	0.335395	0.267537	-0.48732	0.723062	1.63038116	0.192891442	0.207334598	
0.36654	-0.95952	-0.39498	1.496223	-0.23445	0.340393	1.133888	1.05603	-0.60383464	-0.496362467	-0.165749545	
0.715318	1.171705	-0.39041	1.429334	-0.30561	-0.28314	-0.42293	-0.02418	1.447359726	-0.064545062	0.052528849	
0.111798	-0.96516	-0.872	0.442287	0.610999	0.027654	1.087039	1.151601	1.401442962	0.026644913	0.520782111	
-0.79051	-0.10484	-0.07357	-0.7488	-1.62409	0.206982	-0.19546	-1.44565	-1.992445989	0.411119065	0.015260098	
-1.1946	-0.23678	-0.12281	0.038557	0.500821	-0.52519	-0.32287	-1.58563	-2.396663921	-0.573057644	-0.17983712	
1.165409	0.163879	1.448346	0.481941	0.068768	0.551088	-0.55818	1.322043	1.199547188	0.185398107	0.003073109	
-0.1834	-0.62228	0.427697	0.981463	0.339484	0.654651	-1.66012	1.297576	-1.01526535	0.232129926	0.409188222	
0.392483	-0.21521	0.445111	0.706968	0.736068	-1.71508	-0.5156	1.424826	1.505683612	-0.058119186	-0.078686001	
-0.21432	-0.60328	-0.98316	-1.77107	0.549261	-0.07947	0.562511	0.038298	1.003595696	0.424939347	0.189664212	
-0.4827	-1.06279	-0.62343	0.378828	1.309876	-1.29022	0.555567	-0.36682	-1.97382472	-0.129284185	0.288735146	
-0.47399	0.624678	-0.82612	0.184918	-0.39671	0.972124	0.081614	1.278821	-2.155976996	0.24779507	0.027053806	
0.141462	-0.27255	0.934038	-0.24614	-0.90557	0.849041	-0.80977	-0.44456	2.11341758	-0.237276594	0.13744199	
-0.11991	0.291736	0.402214	-0.95806	0.665764	-0.57707	1.343513	0.921709	-1.929274209	0.204802255	0.1520428	
0.386973	0.449532	-0.59801	0.613996	0.102633	1.457903	0.954612	0.016137	2.065671755	-0.828273873	0.143643228	
0.328197	0.190904	-0.90939	-0.88641	-0.76238	-1.46763	0.612302	0.99479	2.584831164	-0.178091699	0.140984857	

LAMPIRAN B

LISTING PROGRAM

B.1. Kode Sumber Model Plant JST

```
1 % Import Data
2 data = xlsread('DataSkripsiS1Ridhan.xlsx');
3 Control_Input = data(:,5:6)';
4 Load_var      = data(:,7:8)';
5 Plant_Output  = data(:,9:10)';
6
7 % Set up Data
8 u = Control_Input;
9 v = Load_var;
10 Yp = Plant_Output;
11 clear data Control_Input Load_var Plant_Output;
12
13 % ANN Input Output
14 X = [u; v];
15 T = Yp;
16 clear Yp u v;
17
18 % Create a Fitting Network
19 hiddenLayerSize = 55;
20 netP = feedforwardnet(hiddenLayerSize);
21
22 % Choose a Training Function
23 netP.trainFcn = 'trainlm'; % Levenberg-Marquardt
    backpropagation.
24
25 % Choose Input and Output Pre/Post-Processing Functions
26 % For a list of all processing functions type: help
    nnprocess
27 netP.input.processFcns = {'removeconstantrows','
    mapminmax'};
28 netP.output.processFcns = {'removeconstantrows','
    mapminmax'};
29
30 % Setup Division of Data for Training, Validation,
    Testing
```

```

31 % For a list of all data division functions type: help
    nndivision
32 netP.divideFcn = 'divideint'; % Divide data
33 netP.divideMode = 'sample'; % Divide up every sample
34 netP.divideParam.trainRatio = 80/100;
35 netP.divideParam.valRatio = 15/100;
36 netP.divideParam.testRatio = 5/100;
37
38 % Choose activation functions
39 netP.layers{1}.transferFcn = 'tansig';
40 netP.layers{2}.transferFcn = 'purelin';
41
42 % Choose a Performance Function
43 % For a list of all performance functions type: help
    nnperformance
44 netP.performFcn = 'mse'; % Mean Squared Error
45
46 % Choose Plot Functions
47 % For a list of all plot functions type: help nnplot
48 netP.plotFcns = {'plotperform','plottrainstate','
    ploterrhist', ...
49 'plotregression','plotfit'};
50
51 % Train the Network
52 [netP,tr] = train(netP,X,T);
53
54 % Test the Network
55 y = netP(X);
56
57 % Network Performance
58 e = gsubtract(T,y);
59 MAE = mean(abs(e),2);
60 MAE_All = mean(MAE);
61 MSE = mean(e.^2,2);
62 MSE_All = perform(netP,T,y);
63 MSE_Relatif = mean(e/T,2);
64 MSE_Std = std(e,0,2);
65
66 % Correlation Coefficient
67 [~,~,R_Td] = postreg(T(1,:),y(1,:));
68 [~,~,R_RH] = postreg(T(2,:),y(2,:));
69 [~,~,R_All] = postreg(T,y);
70 R = [R_Td,R_RH];

```

```

71 clear R_Td R_RH;
72
73 % Recalculate Training , Validation and Test Performance
74 trainTargets = T .* tr.trainMask{1};
75 valTargets = T .* tr.valMask{1};
76 testTargets = T .* tr.testMask{1};
77 All_MSETrain = perform(netP,trainTargets,y);
78 All_MSEVal = perform(netP,valTargets,y);
79 All_MSETest = perform(netP,testTargets,y);

```

B.2. Kode Sumber Model Emulator JST

```

1 % Import Data
2 data = xlsread('DataSkripsiS1Ridhan.xlsx');
3 Control_Input = data(:,5:6)';
4 Load_var      = data(:,7:8)';
5 Plant_Output  = data(:,9:10)';
6
7 % Set up Data
8 u = Control_Input;
9 v = Load_var;
10 Yp = Plant_Output;
11 [~,datasize] = size(Yp);
12 clear data Plant_Input Plant_Output;
13
14 % ANN Input Output
15 normal = 2:datasize;
16 delay = 1:datasize-1;
17 X = [Ypz(:,delay);uv(:,normal);uv(:,delay)]; % Feature
18 T = Yp(:,normal); % Target
19 clear normal delay;
20
21 % Create a Fitting Network
22 hiddenLayerSize = 55;
23 netM = feedforwardnet(hiddenLayerSize);
24
25 % Choose a Training Function
26 netM.trainFcn = 'trainlm'; % Levenberg-Marquardt
    backpropagation.
27
28 % Choose Input and Output Pre/Post-Processing Functions

```



```

29 % For a list of all processing functions type: help
    nnprocess
30 netM.input.processFcns = {'removeconstantrows','
    mapminmax'};
31 netM.output.processFcns = {'removeconstantrows','
    mapminmax'};
32
33 % Setup Division of Data for Training, Validation,
    Testing
34 % For a list of all data division functions type: help
    nndivision
35 netM.divideFcn = 'divideint'; % Divide data randomly
36 netM.divideMode = 'sample'; % Divide up every sample
37 netM.divideParam.trainRatio = 80/100;
38 netM.divideParam.valRatio = 15/100;
39 netM.divideParam.testRatio = 5/100;
40
41 % Choose activation functions
42 netM.layers{1}.transferFcn = 'tansig';
43 netM.layers{2}.transferFcn = 'purelin';
44
45 % Choose a Performance Function
46 % For a list of all performance functions type: help
    nnperformance
47 netM.performFcn = 'mse'; % Mean Squared Error
48
49 % Choose Plot Functions
50 % For a list of all plot functions type: help nnplot
51 netM.plotFcns = {'plotperform','plottrainstate','
    ploterrhist', ...
52 'plotregression', 'plotfit'};
53
54 % Train the Network
55 [netM,tr] = train(netM,X,T);
56
57 % Test the Network
58 y = netM(X);
59
60 % Network Performance
61 e = gsubtract(T,y);
62 MAE = mean(abs(e),2);
63 All_MAE = mean(MAE);
64 MSE = mean(e.^2,2);

```

```

65 All_MSE = perform(netM,T,y);
66 MSE_Relatif = mean(e/T,2);
67 MSE_Std = std(e,0,2);
68
69 % Correlation Coefficient
70 [~,~,R_Td] = postreg(T(1,:),y(1,:));
71 [~,~,R_RH] = postreg(T(2,:),y(2,:));
72 [~,~,All_R] = postreg(T,y);
73 R = [R_Td,R_RH];
74 clear R_Td R_RH;
75
76 % Recalculate Training, Validation and Test Performance
77 trainTargets = T .* tr.trainMask{1};
78 valTargets = T .* tr.valMask{1};
79 testTargets = T .* tr.testMask{1};
80 All_MSETrain = perform(netM,trainTargets,y);
81 All_MSEVal = perform(netM,valTargets,y);
82 All_MSETest = perform(netM,testTargets,y);

```

B.3. Kode Sumber Model Kontroler JST

```

1 % Import Data
2 data = xlsread('DataSkripsiS1Ridhan.xlsx');
3 Control_Input = data(:,5:6)';
4 Load_var = data(:,7:8)';
5 Plant_Output = data(:,9:10)';
6
7 % Set up Data
8 Yp = Plant_Output; % Plant Output
9 v = Load_var; % Disturbance
10 u = Control_Input; % Manipulated Variable
11 clear data Control_Input Load_var Plant_Output;
12
13 % Feature Scaling
14 parY = [30.31, 100; 16, 55.84];
15 [Yp, ~] = MinMaxScaler(Yp',parY);
16 parv = [29.38, 845.418; 22.48, 0];
17 [v, ~] = MinMaxScaler(v',parv);
18 Yp = Yp'; v = v';
19 [~,datasize] = size(Yp);
20 clear parY parv;

```



```

21
22 % ANN Input Output
23 normal = 2:datasize;
24 delay = 1:datasize-1;
25 X = [Yp(:,delay);Yp(:,normal);v(:,normal);ud(:,delay)];
    % Feature
26 T = u(:,normal); % Target
27 clear v Yr Yp E u normal delay;
28
29 % Create a Fitting Network
30 hiddenLayerSize = 52;
31 netC = feedforwardnet(hiddenLayerSize);
32
33 % Choose a Training Function
34 netC.trainFcn = 'trainlm'; % Levenberg-Marquardt
    backpropagation.
35
36 % Choose Input and Output Pre/Post-Processing Functions
37 % For a list of all processing functions type: help
    nnprocess
38 netC.input.processFcns = {'removeconstantrows','
    mapminmax'};
39 netC.output.processFcns = {'removeconstantrows','
    mapminmax'};
40
41 % Setup Division of Data for Training, Validation,
    Testing
42 % For a list of all data division functions type: help
    nndivision
43 netC.divideFcn = 'divideint'; % Divide data randomly
44 netC.divideMode = 'sample'; % Divide up every sample
45 netC.divideParam.trainRatio = 80/100;
46 netC.divideParam.valRatio = 15/100;
47 netC.divideParam.testRatio = 5/100;
48
49 % Choose activation functions
50 netC.layers{1}.transferFcn = 'tansig';
51 netC.layers{2}.transferFcn = 'purelin';
52
53 % Choose a Performance Function
54 % For a list of all performance functions type: help
    nnperformance
55 netC.performFcn = 'mse'; % Mean Squared Error

```

```

56
57 % Choose Plot Functions
58 % For a list of all plot functions type: help nnplot
59 netC.plotFcns = {'plotperform','plottrainstate','
    ploterrhist', ...
60 'plotregression', 'plotfit'};
61
62 % Train the Network
63 [netC, tr] = train(netC, X, T);
64
65 % Test the Network
66 u = netC(X);
67
68 for i = 1:datasize-1
69     AC = round(u(1,i));
70     if (AC < 12)
71         u(1,i) = 0;
72     elseif (AC <= 16)
73         u(1,i) = 16;
74     elseif (AC >= 30)
75         u(1,i) = 30;
76     else
77         u(1,i) = AC;
78     end
79
80     HT = round(u(2,i));
81     if (HT < 1)
82         u(2,i) = 0;
83     elseif (HT > 2)
84         u(2,i) = 2;
85     else
86         u(2,i) = HT;
87     end
88 end
89 clear i AC HT datasize;
90
91 % Network Performance
92 e = gsubtract(T,u);
93 MAE = mean(abs(e),2);
94 MAE_All = mean(MAE);
95 MSE = mean(e.^2,2);
96 MSE_All = perform(netC,T,u);
97 MSE_Relatif = mean(e/T,2);

```

```

98 MSE_Std = std(e,0,2);
99
100 % Correlation Coefficient
101 [~,~,R_AC] = postreg(T(1,:),u(1,:));
102 [~,~,R_HT] = postreg(T(2,:),u(2,:));
103 [~,~,R_All] = postreg(T,u);
104 R = [R_AC,R_HT];
105 clear R_AC R_HT;
106
107 % Recalculate Training, Validation and Test Performance
108 trainTargets = T .* tr.trainMask{1};
109 valTargets = T .* tr.valMask{1};
110 testTargets = T .* tr.testMask{1};
111 All_MSETrain = perform(netC,trainTargets,u);
112 All_MSEVal = perform(netC,valTargets,u);
113 All_MSETest = perform(netC,testTargets,u);

```

B.4. 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.5. 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.6. 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.7. Fungsi Scaler Suhu Ruang

```

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

```

B.8. Fungsi Scaler Kelembapan Relatif

```

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

```

B.9. Fungsi Scaler Suhu Lingkungan

```
1 function y = ScalerTo(u)
2     maxTo = 29.38;
3     minTo = 22.48;
4     y = ( u - minTo ) ./ ( maxTo - minTo );
```

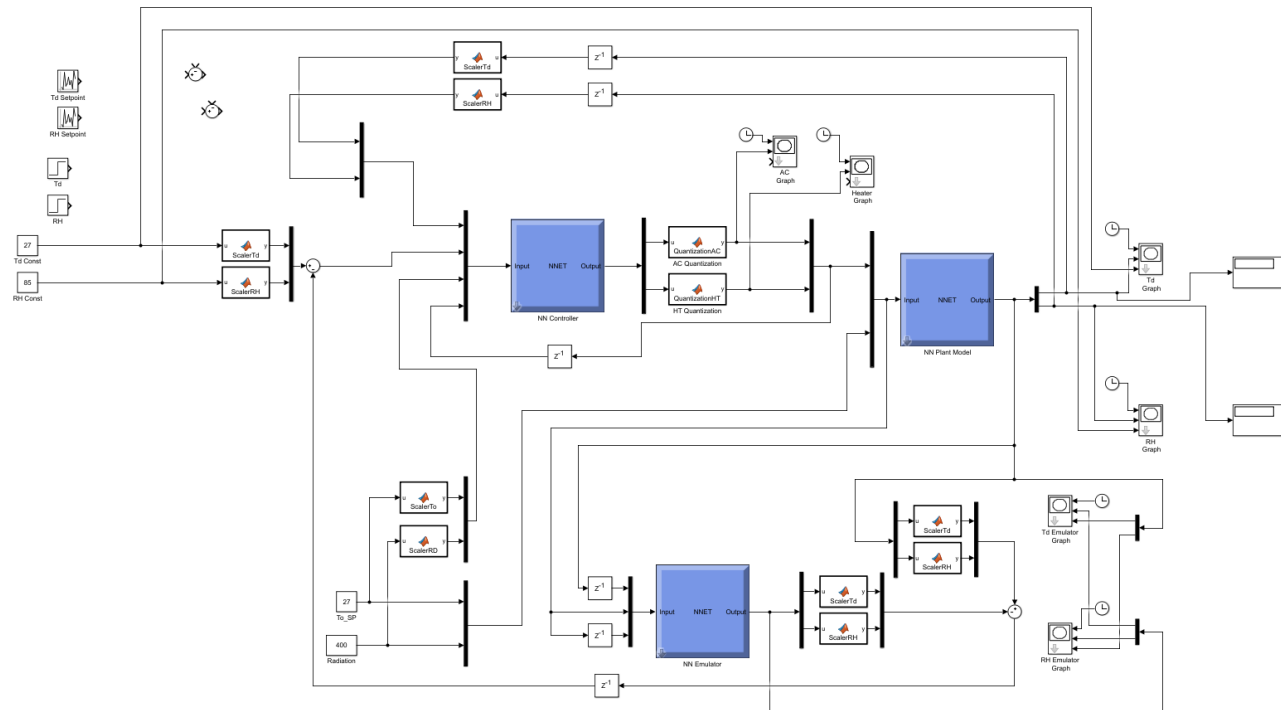
B.10. Fungsi Scaler Radiasi Matahari

```
1 function y = ScalerRD(u)
2     maxRD = 845.418;
3     minRD = 0;
4     y = ( u - minRD ) ./ ( maxRD - minRD );
```

LAMPIRAN C

DIAGRAM BLOK

C.1. Diagram Blok Rancangan Sistem Kontrol Simulink



Gambar C.1. Blok Diagram Rancangan Sistem Kontrol Simulink