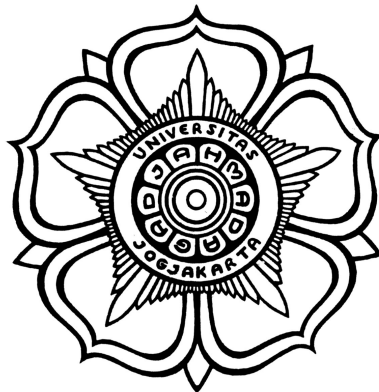


**PERANCANGAN SISTEM KONTROL LINGKUNGAN
TERMAL *CLIMATE CHAMBER* BERBASIS JARINGAN
SARAF TIRUAN**

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, **5 Juli 2020**
Yang menyatakan,

(Materai Rp. 6000,-)

Ridhan Fadhilah
NIM. 15/384859/TK/43521

HALAMAN PENGESAHAN

SKRIPSI

PERANCANGAN SISTEM KONTROL LINGKUNGAN TERMAL *CLIMATE* *CHAMBER* BERBASIS JARINGAN SARAF TIRUAN

oleh

Ridhan Fadhilah
15/384859/TK/43521

telah dipertahankan di depan Tim Penguji
pada tanggal **15 Juli 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 Sistem Kontrol Lingkungan Termal <i>Climate Chamber</i> Berbasis Jaringan Saraf Tiruan
Permasalahan	: Untuk memenuhi kebutuhan penelitian kenyamanan termal, kondisi lingkungan termal pada <i>climate chamber</i> (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 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	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
HALAMAN TUGAS	iv
HALAMAN PERSEMBAHAN	v
HALAMAN MOTTO	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN	xvi
INTISARI	xviii
ABSTRACT	xix
I. PENDAHULUAN	1
I.1. Latar Belakang	1
I.2. Perumusan Masalah	3
I.3. Batasan Masalah	4
I.4. Tujuan	4
I.5. Manfaat	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
II.1. Penelitian Lingkungan Termal <i>Climate Chamber</i>	6

II.2.	Sistem Kontrol Jaringan Saraf Tiruan	10
III.	DASAR TEORI	16
III.1.	Fisika Bangunan	16
III.1.1.	Lingkungan Termal	16
III.2.	Sistem Kontrol Otomatis	17
III.2.1.	Dasar-dasar Sistem Kontrol	17
III.2.2.	Kesalahan Keadaan-Ajeg	21
III.3.	Jaringan Saraf Tiruan	24
III.3.1.	Model Matematis Neuron	26
III.3.2.	Jaringan Layar Jamak (MLP)	30
III.4.	Sistem Kontrol Jaringan Saraf Tiruan	33
IV.	PELAKSANAAN PENELITIAN	35
IV.1.	Alat dan Bahan Penelitian	35
IV.2.	Tata Laksana Penelitian	36
IV.2.1.	Studi Pustaka	37
IV.2.2.	Penentuan Tuntutan Rancangan	37
IV.2.3.	Pengambilan Data Simulasi IES-VE	37
IV.2.4.	Pengembangan Model Plant JST	38
IV.2.5.	Perancangan Sistem kontrol JST	39
IV.2.6.	Penarikan Kesimpulan	40
IV.3.	Rencana Analisis Hasil Penelitian	41
V.	HASIL DAN PEMBAHASAN	42
V.1.	Hasil Pengembangan Model Plant JST	42
V.2.	Hasil Perancangan Sistem Kontrol JST	45
V.2.1.	Kinerja Emulator JST	45

V.2.2.	Kinerja Kontroler JST	46
V.2.3.	Kinerja Sistem Kontrol JST	47
VI.	KESIMPULAN DAN SARAN	54
VI.1.	Kesimpulan	54
VI.2.	Saran	54
LAMPIRAN		
A.	Data Penelitian	59
A.1.	Data <i>Climate Chamber</i>	59
A.2.	Kinerja Model Plant JST	59
A.3.	Kinerja Emulator JST	59
A.4.	Kinerja Kontroler JST	60
A.5.	Hasil Simulasi Simulink SP1	60
A.6.	Hasil Simulasi Simulink SP2	60
B.	Listing Program	61
B.1.	Kode Sumber Model Plant JST	61
B.2.	Kode Sumber Emulator JST	63
B.3.	Kode Sumber Kontroler JST	65
B.4.	Fungsi Min Max Scaler	68
B.5.	Fungsi Kuantisasi AC	68
B.6.	Fungsi Kuantisasi Heater	69
B.7.	Fungsi Scaler Suhu Ruang	69
B.8.	Fungsi Scaler Kelembapan Relatif	69
B.9.	Fungsi Scaler Suhu Luar	69
B.10.	Fungsi Scaler Radiasi Matahari	69

C.	Diagram Blok	70
C.1.	Diagram Blok Model Plant JST	70
C.2.	Diagram Blok Emulator JST	70
C.3.	Diagram Blok Kontroler JST	71
C.4.	Diagram Blok Sistem Kontrol Simulink	72

DAFTAR TABEL

2.1. Tinjauan Pustaka Lingkungan Termal	8
2.2. Tinjauan Pustaka Lingkungan Termal (lanjutan)	9
2.3. Tinjauan Pustaka Sistem kontrol JST	14
2.4. Tinjauan Pustaka Sistem kontrol JST (lanjutan)	15
3.1. Perbandingan metode kontrol	33
4.1. Daftar alat dan bahan	35
4.2. Spesifikasi laptop ASUS N550JX	35
5.1. Tabel Rancangan Model Plant JST Tri Hartanto	42
5.2. Daftar variasi pembagian data	43
5.3. Tabel Rancangan Model Plant JST Penulis	45
5.4. Tabel Rancangan Emulator JST (<i>NN Forward Model</i>)	46
5.5. Tabel Rancangan Kontroler JST (<i>NN Inverse Model</i>)	47
5.6. Nilai Kombinasi SET POINT SP1	48
5.7. Hasil Simulasi Sistem Kontrol SP1	48
5.8. Nilai Kombinasi SET POINT SP2	50
5.9. Hasil Simulasi Sistem Kontrol SP2	50
5.10. Nilai Kombinasi SET POINT SP3	52
A.1. Tabel Rancangan Model Plant JST Penulis	59
A.2. Tabel Rancangan Emulator JST (<i>NN Forward Model</i>)	59
A.3. Tabel Rancangan Kontroler JST (<i>NN Inverse Model</i>)	60
A.4. Hasil Simulasi Sistem Kontrol SP1	60
A.5. Hasil Simulasi Sistem Kontrol SP2	60

DAFTAR GAMBAR

1.1.	Penggunaan energi final per sektor di Indonesia, 2000 dan 2015	1
3.1.	Sistem dengan a. kesalahan keadaan tunak bernilai terbatas untuk input fungsi step; b. kesalahan keadaan tunak nol untuk input fungsi step	21
3.2.	Error sistem kontrol tertutup: a. Representasi secara umum; b. Representasi untuk sistem umpan balik satuan	23
3.3.	Anatomi neuron	25
3.4.	Model matematis neuron.	26
3.5.	Fungsi-fungsi aktivasi	27
3.6.	Jaringan layar tunggal	29
3.7.	Jaringan 2 layar	31
4.1.	Bagan Tata Laksana Penelitian	36
4.2.	Arsitektur Model Plant JST	38
4.3.	Blok Diagram Sistem Kendali JST	39
4.4.	Arsitektur NN Forward Model	39
4.5.	Arsitektur NN Inverse Model	40
5.1.	Hasil Variasi Pembagian Data	44
5.2.	Pembagian Data yang digunakan	44
5.3.	Blok Diagram Sistem Kendali JST	47
5.4.	Hasil Simulasi Sistem Kontrol untuk Suhu Ruang SP1	48
5.5.	Hasil Simulasi Sistem Kontrol untuk Kelembapan Relatif SP1	49
5.6.	Nilai MV SET AC SP1	49
5.7.	Nilai MV SET Heater SP1	49

5.8. Hasil Simulasi Sistem Kontrol untuk Suhu Ruang SP2	50
5.9. Hasil Simulasi Sistem Kontrol untuk Kelembapan Relatif SP2	51
5.10. Nilai MV SET AC SP2	51
5.11. Nilai MV SET Heater SP2	51
5.12. Hasil Simulasi Sistem Kontrol untuk Suhu Ruang SP3	52
5.13. Hasil Simulasi Sistem Kontrol untuk Kelembapan Relatif SP3	53
5.14. Nilai MV SET AC SP3	53
5.15. Nilai MV SET Heater SP3	53
C.1. Arsitektur Model Plant JST	70
C.2. Arsitektur NN Forward Model	70
C.3. Arsitektur NN Inverse Model	71
C.4. Blok Diagram Sistem Kontrol Simulink	72

DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN

Lambang Romawi

<i>Lambang</i>	<i>Kuantitas</i>	<i>Satuan</i>
T_d	Suhu Ruang (Dry-Bulb Temperature)	$^{\circ}\text{C}$
RH	Kelembapan Relatif	%
T_o	Suhu Luar (Dry-Bulb Temperature)	$^{\circ}\text{C}$
RD	Radiasi Global Matahari	W/m^2
AC	SET AC	$^{\circ}\text{C}$
HT	SET Heater	ON
t	Waktu	detik
s	Frekuensi	Hertz
R	Koefisien Korelasi	%
\mathbb{R}	Domain Bilangan Riil	
$R(s)$	Input Sistem Kontrol	
$E(s)$	Error Sistem Kontrol	
$C(s)$	Ouput Sistem Kontrol	
K	Gain Konstan	
$T(s)$	Fungsi Gain Lup tertutup	
$G(s)$	Fngsi Gain Lup Tertutup Umpan Balik Satuan	
$H(s)$	Fungsi Gain Umpan Balik	
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 Ajeg Sistem

Superskrip

<i>Lambang</i>	<i>Deskripsi</i>
n+1	Dimensi n+1
T	Fungsi Tranpos Vektor/Matrix

Singkatan

ANN	Artificial Neural Network
DBT	Dry-Bulb Temperature
DTNTF	Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika
IMC	Internal Model Control
JST	Jaringan Saraf Tiruan
MRT	Mean Radiant Temperature
MAE	Mean Absoulte Error
MSE	Mean Squared Error
NN	Neural Network

PERANCANGAN SISTEM KONTROL 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 **15 Juli 2020**
untuk memenuhi sebagian persyaratan untuk memperoleh derajat
Sarjana Program Studi Teknik Fisika

INTISARI

Vivamus vehicula leo a justo. Quisque nec augue. Morbi mauris wisi, aliquet vitae, dignissim eget, sollicitudin molestie, ligula. In dictum enim sit amet risus. Curabitur vitae velit eu diam rhoncus hendrerit. Vivamus ut elit. Praesent mattis ipsum quis turpis. Curabitur rhoncus neque eu dui. Etiam vitae magna. Nam ullamcorper. Praesent interdum bibendum magna. Quisque auctor aliquam dolor. Morbi eu lorem et est porttitor fermentum. Nunc egestas arcu at tortor varius viverra. Fusce eu nulla ut nulla interdum consectetur. Vestibulum gravida. Morbi mattis libero sed est.

Nam quis enim. Quisque ornare dui a tortor. Fusce consequat lacus pellentesque metus. Duis euismod. Duis non quam. Maecenas vitae dolor in ipsum auctor vehicula. Vivamus nec nibh eget wisi varius pulvinar. Cras a lacus. Etiam et massa. Donec in nisl sit amet dui imperdiet vestibulum. Duis porttitor nibh id eros.

Kata kunci: Lingkungan Termal, Sistem Kontrol, 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 CONTROL SYSTEM 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 **July 15, 2020**
in partial fulfillment of the requirement for the Degree of
Bachelor of Engineering in Engineering Physics

ABSTRACT

Aenean adipiscing auctor est. Morbi quam arcu, malesuada sed, volutpat et, elementum sit amet, libero. Duis accumsan. Curabitur urna. In sed ipsum. Donec lobortis nibh. Duis mattis. Sed cursus lectus quis odio. Phasellus arcu. Praesent imperdiet dui in sapien. Vestibulum tellus pede, auctor a, pellentesque sit amet, vulputate sed, purus. Nunc pulvinar, dui at eleifend adipiscing, tellus nulla placerat massa, sed condimentum nulla tellus sed ligula. Nulla vitae odio sit amet leo imperdiet blandit. In vel massa. Maecenas varius dui at turpis. Sed odio.

Quisque aliquam ipsum sed turpis. Pellentesque laoreet velit nec justo. Nam sed augue. Maecenas rutrum quam eu dolor. Fusce consectetur. Proin tellus est, luctus vitae, molestie a, mattis et, mauris. Donec tempor. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Duis ante felis, dignissim id, blandit in, suscipit vel, dolor. Pellentesque tincidunt cursus felis. Proin rhoncus semper nulla. Ut et est. Vivamus ipsum erat, gravida in, venenatis ac, fringilla in, quam. Nunc ac augue. Fusce pede erat, ultrices non, consequat et, semper sit amet, urna.

Keywords: Thermal Environment, Control System, Artificial Neural Network, Climate Chamber.

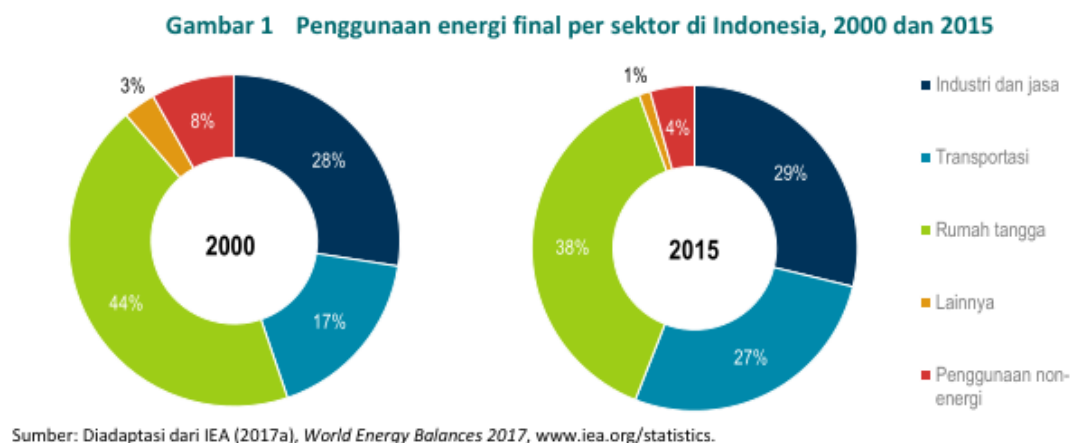
Supervisor: Faridah, S.T., M.Sc.
Co-supervisor: Ir. Agus Arif, M.T.

BAB I

PENDAHULUAN

I.1. Latar Belakang

Indonesia merupakan pengguna energi terbesar di Asia Tenggara, 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 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



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

sangat penting dilakukan untuk menghemat energi. Penggunaan teknologi pendingin ruangan yang lebih efisien diperkirakan mampu menghemat tagihan pelanggan listrik USD 690 juta per tahun di tahun 2030. Kebutuhan pendingin ruangan tumbuh cepat dan diperkirakan bertambah dua kali lipat antara tahun 2016 dan 2020 [1].

Ruangan pada setiap bangunan umumnya menggunakan pendingin ruangan (AC) untuk mencapai kondisi yang nyaman bagi penghuni di dalamnya. Padahal hal

tersebut kurang 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 sederhana upaya untuk menurunkan suhu di suatu ruangan. Kenyamanan termal bergantung juga kepada sensasi termal tubuh manusia. Sehingga, kebutuhan energi dalam pemenuhan kenyamanan termal tersebut dapat dikatakan cukup tinggi.

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.

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.

Permasalahan *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 [2].

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

I.2. Perumusan Masalah

Penulis mengambil studi kasus pada *climate chamber* di Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika (DTNTF) 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.

Penulis menggunakan aplikasi perangkat lunak IES-VE untuk melakukan simulasi dalam pengambilan data. Model IES-VE untuk *climate chamber* DTNTF berasal dari model sistem di penelitian sebelumnya terkait **pemodelan lingkungan termal sistem Climate Chamber** yang ditulis oleh Ichfan Kurniawan [3].

Berdasarkan hal tersebut, ~~perumusan masalah~~ yang penulis angkat yaitu ba
Permasalahan

gaimana rancangan model jaringan saraf tiruan yang optimal untuk mengendalikan lingkungan termal pada *climate chamber* DTNTF 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 sistem yang ditinjau hanya *steady state error* karena secara fisis, respons transien termal pada bangunan cukup lama, sehingga para peneliti umumnya hanya fokus untuk meninjau nilai kesalahan keadaan tunak (*steady state error*).
3. Pemodelan *plant* dilakukan berdasarkan data IES-VE dari skripsi yang dibuat oleh Ichfan Kurniawan [3].
4. Pemodelan *plant* dan perancangan sistem kontrol pada penelitian ini menggunakan metode jaringan saraf tiruan.
5. Pembahasan pada penelitian ini tidak mencakup karakterisasi sistem lingkungan termal.

I.4. Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah ~~penulis mampu merancang dan~~ membangun model jaringan saraf tiruan ~~yang optimal~~ **kontroller berbasis yang optimal** untuk mengendalikan lingkungan termal pada *climate chamber* DTNTF UGM. **Performasi optimal dilihat dari.....**

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. Penelitian Lingkungan Termal *Climate Chamber*

Penelitian mengenai penggunaan *climate chamber* sebagai lingkungan termal yang terkendali telah banyak dilakukan oleh peneliti-peneliti sebelumnya. Penelitian yang dilakukan meliputi berbagai bidang seperti bidang lingkungan [4] [5] [6], bidang *engineering* [7], bidang biologi [8][9], dan bidang kimia [10]. Variabel lingkungan termal dalam *climate chamber* berfungsi sebagai stimulan pada objek penelitian. Penelitian-penelitian tersebut dijabarkan secara lebih rinci pada Tabel 2.1.

Variabel lingkungan termal yang mempengaruhi objek penelitian beragam bergantung pada tujuan dari penelitian yang akan dijalankan. Variabel yang dimaksud yaitu seperti variabel suhu [7][8][9][10][11], kelembaban udara [10], tekanan [6], ataupun kombinasi dari 2 atau lebih variabel lingkungan termal [10].

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 dengan akurasi tinggi dengan nilai eror yang masih dapat diterima, namun dengan rentang nilai yang lebar dan dapat dijaga untuk tetap berada pada rentang nilai tersebut untuk waktu yang lama. Lalu terdapat pula penelitian yang menginginkan perubahan variabel lingkungan termal dapat terjadi dengan waktu yang cepat.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan Nur Muna Nadiya[12], penghuni ruang yang terbiasa terpapar kondisi lingkungan termal yang panas dan lembap mampu

merasakan perubahan 1 level sensasi akibat perubahan suhu naik, minimal sebesar $2,78^{\circ}\text{C}$ dan perubahan suhu turun, minimal sebesar $2,70^{\circ}\text{C}$. Dengan kata lain, tuntutan dari penelitian yaitu memastikan nilai variabel lingkungan suhu untuk dapat dijaga pada nilai tertentu dengan galat $\pm 2,7^{\circ}\text{C}$.

Penelitian kenyamanan dalam climate chamber, yang ditulis pengkondisian lingkungan termal dalam penelitian tersebut,

Pengkondisian lingk termal utk penelitian di climate chamber

Tabel 2.1. Tinjauan Pustaka Lingkungan Termal

Tahun	Peneliti	Lokasi Penelitian	Variabel	Fungsi Chamber	Kondisi Lingkungan Termal
2004 [4]	H. Feriadi dan N. Hien	Bangunan tanpa sistem pendingin di Indonesia	Suhu netral, Suhu nyaman	Pengujian sensasi termal	Dilakukan pada rentang suhu 26-32,6°C DBT dan 26,5-34°C MRT
2006 [5]	H. Feriadi dan N. Hien	<i>Climate Chamber</i>	Sensasi termal	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>)
2007 [6]	A. P. Leskinen, J. K. Jokiniemi, dan K. E. J. Lehtinen	Partikel <i>aging aerosol</i> dari pembakaran kayu	Tekanan	digunakan sebagai tempat penelitian, pengukuran, dan analisa dari proses <i>aging flue gas</i> dan <i>filtered gas</i>	Peneliti menginginkan tekanan di dalam chamber yang sama dengan tekanan udara di luar, dengan suhu dan kelembaban dalam chamber bukan variabel yang dikontrol namun hanya dicek berapa nilainya.
2014 [7]	W. He, G. Xu, dan R. Shen	Pesawat ulang alik (<i>spacecraft</i>)	Suhu	digunakan sebagai ruang penelitian/pengetesan yang terkontrol dari pesawat ulang alik yang mendapatkan pengaruh dari kombinasi variabel fisis suhu dan akselerasi.	Peneliti mengajukan dan menerapkan metode kontrol <i>temperature uniformity</i> -nya pada <i>chamber</i> penelitian dan membandingkan hasilnya dengan metode kontrol pada penelitian sebelumnya baik secara simulasi dengan Simulink maupun secara eksperimental.
2014 [8]	A. Huguet, A. Francez, M. Dung, C. Fosse, dan S. Derenne	Lumut Sphagnum peat	Suhu	<i>Climate chamber / incubator</i> digunakan sebagai tempat penelitian dan analisa dari perubahan distribusi br GDGT pada lumut	Peneliti menginginkan suhu di dalam chamber iklim berada di 12°C dan 15°C.

Tabel 2.2. Tinjauan Pustaka Lingkungan Termal (lanjutan)

Tahun	Peneliti	Lokasi Penelitian	Variabel	Fungsi Chamber	Perlakuan Chamber
2016 [9]	E. Martinez, dkk.	Objek biologis, insekta/belalang	Suhu	<i>Walk in style Temperature Controlled Chamber</i> (TCC) digunakan sebagai ruang penelitian dari laju proses-proses metabolisme dari insekta	Peneliti menginginkan kontrol suhu dalam chamber dengan akurasi tertentu, memiliki range atau span suhu tertentu, dan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai set-point suhu chamber yang tidak lama.
2018 [10]	A. Jofrereche, dkk.	Material Postcured vinyl ester resin	Suhu dan kelembapan	<i>Weathering chamber</i> digunakan untuk memberikan aging pada post cured VE untuk dilihat perubahan struktur, mekanik, dan adhesive propertinya	Peneliti menginginkan terjadinya aging pada material post cured VE resin, dengan menggunakan weathering chamber yang di set pada suhu 80°C , kelembaban relatif 90% lalu dilihat pengaruh pada material tersebut pada hari ke 3, 7 dan 14 setelah dimasukan ke dalam chamber.
2019 [11]	A. Srinivasa, dkk.	Mayat (cadaver)	Suhu	<i>Chamber</i> digunakan sebagai tempat menyimpan sekaligus tempat penelitian mayat yang tersimpan dalam suhu rendah	Peneliti menjaga suhu di dalam chamber dijaga pada rentang 2°C - 4°C dengan pengaruh suhu panas di daerah tropis yang kecil.
2020 [12]	Nur Muna Nadiya	<i>Climate Chamber</i> DTNTF	Suhu	<i>Chamber</i> digunakan sebagai prasarana penelitian sensasi dan kenyamanan termal bangunan	Suhu bervariasi dengan rentang $16-30^{\circ}\text{C}$ To (<i>Operative Temperature</i>)
2020	Penelitian ini	<i>Climate Chamber</i> DTNTF	Suhu dan kelembapan udara	<i>Chamber</i> digunakan sebagai prasarana penelitian sensasi dan kenyamanan termal bangunan	Suhu bervariasi dengan rentang $16-30^{\circ}\text{C}$ Td (<i>Dry Bulb Temperature</i>)

II.2. Sistem Kontrol Jaringan Saraf Tiruan

Penelitian mengenai aplikasi jaringan saraf tiruan sebagai sistem kontrol telah banyak dilakukan oleh peneliti-peneliti sebelumnya. Penelitian yang dilakukan meliputi berbagai tipe bangunan seperti kantor tapak terbuka [13], rumah/tempat tinggal [14][15], bangunan institusi [16], bangunan residensial [17], Stadium [18], dan apartemen [19]. Variabel kontrol dalam sistem kontrol merupakan parameter yang mempengaruhi kenyamanan termal. Penelitian-penelitian tersebut dijabarkan secara lebih rinci pada Tabel 2.3.

Nilai dari variabel kontrol harus dapat dikendalikan sesuai dengan skenario penelitian yang akan dijalankan. Terdapat penelitian yang menggunakan jaringan saraf tiruan secara langsung sebagai sistem kontrol. Terdapat pula penelitian yang membandingkan JST dengan metode lain, seperti logika *fuzzy*, PID, RBC dan MPC. Lalu terdapat pula penelitian yang menggunakan metode lanjut dari JST, seperti NNARX, NNARMAX, NNOE [13] dan TDNN [17]. Dengan kata lain, penggunaan metode jaringan saraf tiruan untuk sistem kontrol memang sudah terbukti cukup baik.

Pada tahun 2010, G. Mustafaraj, J.Chen, dan G. Lowry melakukan penelitian yang membahas mengenai prediksi *thermal behavior* dengan menggunakan Jaringan Saraf Tiruan (JST) pada kantor tapak terbuka di bangunan komersial modern. Variabel yang diukur meliputi data cuaca eksternal, suhu *dry-bulb* ruang, laju kecepatan udara ventilasi, suhu udara ventilasi, dan suhu panas dan dingin air. Penelitian tersebut menggunakan 3 metode model *black-box non-linear neural network*, ya itu: model *neural network-based non-linear autoregressive model with external inputs* (NNARX), model *neural network-based non-linear autoregressive moving average model with external inputs* (NNMARMAX), dan model *neural network-based non-linear output error* (NNOE). Semua model memberikan prediksi yang cukup baik, tetapi model NNARX dan NNMARMAX mengungguli model NNOE. Nilai R^2 masing-

masing bernilai 0.95, 0.9469, dan 0.8586 untuk NNARX, NNARMAX, dan NNOE. Penelitian tersebut menyimpulkan bahwa model NNARX lebih cocok dalam memprediksi suhu ruang menggunakan data pengembangan model dalam satu minggu selama musim *summer*, *autumn*, dan *winter*. Model ini dapat digunakan dalam sistem kontrol HVAC dan dapat digunakan lebih luas pada jenis bangunan lainnya, termasuk rumah sakit, supermarket, bandara, dan sekolah [13].

Pada tahun 2010, Jin Woo Moon dan Jong-Jin Kim melakukan penelitian mengenai model kontrol termal berbasis jaringan saraf tiruan untuk bangunan residensial. Tipe bangunan yang digunakan merupakan sebuah rumah di amerika. Jin Woo Moon dan Jong-Kin Kim mencoba mengendalikan kondisi termal dengan menjadikan suhu, kelembapan relatif dan PMV (*Predicted Mean Vote*) sebagai variabel kontrol. Pada penelitian tersebut JST mampu memenuhi tuntutan kontrol pada variabel suhu (20-23)°C di semua kasus, sedangkan kelembapan (35-60)% hanya memenuhi 98% dari total kasus yang ada [14].

Pada tahun 2016, Jin Woo Moon, Sung Kwon Jung, Youngchul Kim, dan Seung-Hoon Han melakukan penelitian studi perbandingan metode kontrol termal bangunan berbasis jaringan saraf tiruan. 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). ANN dan ANFIS memiliki nilai galat 1.13°C (musim dingin) dengan nilai deviasi 1.19°C untuk ANN (musim panas) dan 1.17°C untuk ANFIS (musim panas) [15].

Pada tahun 2017, Zakia Afroz, GM Shafiullah, Tania Urmee dan Gary Higgins melakukan penelitian mengenai prediksi suhu ruangan pada bangunan institusi. Penelitian tersebut menggunakan jaringan saraf tiruan untuk memprediksi suhu udara

ruangan. Penelitian tersebut menegaskan bahwa mengidentifikasi variabel-variabel input yang relevan dan menyortirnya berdasarkan relevansi untuk mewakili suhu ruangan dalam bangunan adalah langkah-langkah kunci untuk menentukan arsitektur jaringan yang optimal yang pada gilirannya memberikan akurasi prediksi yang baik. Untuk kedua kasus bangunan dan untuk semua set data yang berbeda yang digunakan dalam penelitian tersebut Lovenberg-Marquardt telah menemukan algoritma pelatihan yang paling cocok untuk memprediksi suhu ruangan dalam ruangan dalam hal akurasi prediksi, kemampuan generalisasi dan waktu iterasi [16].

Pada tahun 2017, Ján Drgoňa melakukan penelitian dengan membuat sebuah *model predictive control* untuk rumah bertingkat 6 ruang dengan memanipulasi sistem HVAC yang ada. 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 mampu mengurangi kompleksitas solusi secara drastis [17].

Pada tahun 2018, Hyun-Jung Yoon, Dong-Seok Lee, Hyun Cho, dan Jae-Hun Jo melakukan penelitian mengenai prediksi lingkungan termal pada ruangan luas menggunakan jaringan saraf tiruan. Penelitian ini menjadikan stadium sebagai objek penelitiannya. Variabel yang diukur yaitu suhu permukaan tembok dalam ruang, dan suhu udara luar. Penelitian tersebut menyimpulkan bahwa metode prediksi lingkungan termal diusulkan menggunakan model JST untuk mengevaluasi lingkungan termal di ruangan besar yang dibagi menjadi zona-zona. Proses evaluasi lingkungan termal yang diturunkan dalam makalah ini dapat digunakan untuk mengontrol fasilitas HVAC di setiap zona bangunan ruang besar melalui pembelajaran mesin oleh model JST [18].

Pada tahun 2018, Zhipeng Deng dan Qingyan Chen melakukan penelitian menggunakan jaringan saraf tiruan untuk memprediksi kenyamanan termal pada lingkungan dalam ruang dengan parameter sensasi termal dan perilaku penghuni. Bangunan yang digunakan pada penelitian tersebut berupa 10 kantor dan 10 apartemen/rumah. Variabel yang diukur meliputi suhu ruang, kelembapan relatif, insulasi pakaian, laju metabolisme tubuh, sensasi termal, dan perilaku penghuni. Model memprediksi kisaran suhu ruang dengan rentang nilai $20,6^{\circ}\text{C}$ (69°F) - 25°C (77°F) di musim dingin dan $20,6^{\circ}\text{C}$ (69°F) - $25,6^{\circ}\text{C}$ (78°F) di musim panas. Perilaku penghuni mengevaluasi penerimaan lingkungan dalam ruangan dengan cara yang sama seperti sensasi termal [19].

Variabel manipulasi
 Variabel gangguan
 Jadi posisi penelitian ini lebih terlihat

Tabel 2.3. Tinjauan Pustaka Sistem kontrol JST

Tahun	Peneliti	Tipe Bangunan	Variabel kontrol	Sistem kontrol	Hasil Penelitian
2010 [13]	G. Mustafaraj, dkk.	Kantor tapak terbuka pada bangunan komersial modern	Suhu ruang dan kelembapan relatif	Black-box no-linear neural networks: NNARX, NNARMAX, dan NNOE	Semua model memberikan prediksi yang cukup baik, tetapi model NNARX dan NNARMAX mengungguli model NNOE. Nilai R^2 masing-masing bernilai 0.95, 0.9469, dan 0.8586 untuk NNARX, NNARMAX, dan NNOE.
2010 [14]	Jin Woo Moon, dkk.	Rumah, Amerika	Suhu, kelembapan relatif, dan PMV	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
2016 [15]	Jin Woo Moon, dkk.	Bangunan tempat tinggal, Amerika	Suhu dan kenyamanan termal	ANN, <i>Fuzzy Logic</i> , dan ANFIS	ANN dan ANFIS lebih mendekati set point yang ditentukan (21.5°C). ANN dan ANFIS memiliki nilai galat 1.13°C (musim dingin) dengan nilai deviasi 1.19°C untuk ANN (musim panas) dan 1.17°C untuk ANFIS (musim panas).
2017 [16]	Zakia Afroz, dkk.	Bangunan institusi	Suhu ruang	ANN	Lovenberg-Marquardt merupakan algoritma pelatihan yang paling cocok untuk memprediksi suhu ruang dalam hal akurasi prediksi, kemampuan generalisasi dan waktu iterasi untuk melatih algoritma.

Tabel 2.4. Tinjauan Pustaka Sistem kontrol JST (lanjutan)

Tahun	Peneliti	Tipe Bangunan	Variabel kontrol	Sistem kontrol	Hasil Penelitian
2017 [17]	Ján Drgoňa, dkk.	Bangunan residensial 6 zona	Suhu operasional ruang	MPC, PID, RBC, dan TDNN	Kontroler TDNN mampu mempertahankan kenyamanan tinggi dan penghematan energi dengan kehilangan kinerja yang kecil dibandingkan MPC yg orisinil, sementara itu mampu mengurangi kompleksitas solusi secara drastis.
2018 [18]	Hyun-Jung Yoon, dkk.	Zona-zona stadion	Suhu udara ruang, suhu radian rerata, dan insulasi pakaian	ANN	Proses evaluasi lingkungan termal yang diperoleh dalam penelitian ini dapat digunakan untuk mengontrol fasilitas HVAC di setiap zona bangunan ruang besar melalui pembelajaran dengan model JST.
2018 [19]	Zhipeng Deng, dkk.	Kantor (10) dan rumah/apartemen (10)	Sensasi termal dan perilaku penghuni	ANN	Model memprediksi kisaran suhu udara dengan rentang nilai 20,6°C (69°F) - 25°C (77°F) di musim dingin dan 20,6°C (69°F) - 25,6°C (78°F) di musim panas. Perilaku penghuni mengevaluasi penerimaan lingkungan dalam ruangan dengan cara yang sama seperti sensasi termal.
2020	Penelitian ini	<i>Climate Chamber</i> DTNTF	Suhu ruang dan kelembapan relatif	ANN	-

BAB III

DASAR TEORI

Proses termal pada sistem bangunan. Dari sini, akan memerikan gambaran tentang plant.

III.1. Fisika Bangunan

Penjelasan mengapa diambil CV, MV, dan LV

Terdapat beberapa definisi mengenai fisika bangunan. Maka dari itu, penulis mencoba untuk mengambil definisi dari salah satu sumber referensi terpercaya yang berbunyi sebagai berikut: *Building Physics is an applied science that studies the hygrothermal, acoustical and light related properties of building components (roofs, facades, windows, partition walls, etc.), room, building and building assemblies* [20]. Fisika bangunan memiliki hubungan dengan pemenuhan kebutuhan dalam hal kenyamanan dan kesehatan penghuni, di sisi yang lain mempertimbangkan keterbatasan material, arsitektur, ekologi lingkungan, dan ekonomi. Kenyamanan merupakan kondisi kesehatan mental dan fisik makhluk hidup. Hal tersebut dapat tercapai bergantung kepada faktor manusia dan lingkungannya. Dapat disimpulkan bahwa pemenuhan terhadap kenyamanan termal, kenyamanan akustik, dan kenyamanan visual memerlukan kemampuan rekayasa (*engineering*).

III.1.1. Lingkungan Termal

Lingkungan termal dapat didefinisikan sebagai karakteristik lingkungan yang mempengaruhi perpindahan kalor seseorang [2] atau aspek-aspek lingkungan fisik individu atau populasi yang secara langsung mempengaruhi potensi pertukaran panas antara subjek atau populasi dan lingkungannya [21]. Lingkungan yang dimaksud di sini yaitu segala sesuatu yang mengelilingi objek, organisme, ataupun populasi yang diteliti kenyamanannya (kenyamanan termal).

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 [21].

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.2. Sistem Kontrol Otomatis

Sistem kontrol otomatis telah memegang peranan yang sangat penting dalam perkembangan ilmu dan teknologi. Disamping 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 Sistem Kontrol

Sistem adalah kombinasi dari beberapa komponen yang bekerja bersama-sama dan bersinergi untuk mencapai tujuan yang diinginkan. Sistem tidak hanya dibata-

si 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 lup terbuka dan sistem kontrol sistem tertutup. Sistem kontrol lup terbuka adalah sistem kontrol yang keluarannya tidak berpengaruh pada aksi kontrol. Pada sistem ini keluaran tidak dibandingkan dengan *setpoint*. Sehingga untuk setiap *setpoint*, terdapat suatu kondisi operasi yang tetap. Jadi ketelitian sistem tergantung dari kalibrasi sistem. Sistem kontrol lup terbuka ini juga tidak akan bisa bekerja jika ada gangguan internal maupun eksternal pada sistem. Sistem kontrol lup 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 lup tertutup, sangat mungkin diperoleh sistem kontrol yang lebih teliti meskipun menggunakan komponen-komponen yang relatif kurang teliti.

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:

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 bisa langsung mengikuti input yang diberikan, tetapi sistem terlebih dahulu akan berusaha untuk menyesuaikan karakter naturalnya dengan input yang diberikan. Respon inilah yang dinamakan respon transien dan menjadi hal penting untuk dianalisis dalam desain sistem kontrol. Sebagai contoh adalah respon sistem kontrol posisi elevator. Jika respon transien terlalu lambat maka akan membuat penumpang tidak sabar. Tetapi jika respon transien terlalu cepat maka akan membuat penumpang merasa tidak nyaman. Respon transien juga penting untuk alasan struktur. Respon transien yang terlalu cepat bisa juga menyebabkan kerusakan fisik pada peralatan yang dikendalikan.

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 bisa 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.

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. hukum-hukum alam,
2. relasi-relasi empirik, dan
3. sarana berpikir deduktif (matematika) serta
4. sarana berpikir induktif (statistika).

Proses Pengendalian

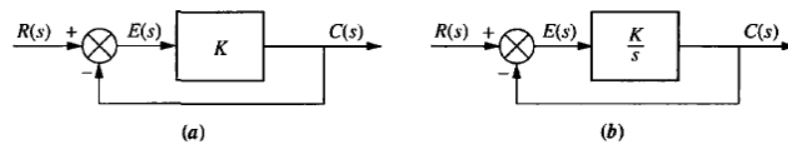
Proses Pengendalian merupakan tugas seorang insinyur kontrol untuk menganalisis sistem yang ada, dan merancang sistem baru untuk memenuhi kebutuhan spesifik. Terkadang sistem baru perlu dirancang, tetapi suatu unit kontroler lebih sering dirancang untuk meningkatkan kinerja sistem yang ada. Ketika perancangan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

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

III.2.2. Kesalahan Keadaan-Ajag

Kesalahan keadaan tunak adalah perbedaan antara input dan output untuk input tes yang ditentukan ketika $t \rightarrow \infty$. Dalam sistem kontrol, kita memperhatikan perbedaan antara input dan output dari sistem kontrol umpan balik setelah mencapai keadaan-ajeg. Sehingga 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 tunak dapat diterapkan secara keliru ke sistem yang tidak stabil. Dengan demikian, insinyur harus memeriksa stabilitas sistem saat melakukan analisis dan perancangan kesalahan keadaan tunak. Sehingga, peneliti mengasumsikan bahwa semua sistem dalam contoh dan masalah dalam bab ini merupakan sistem yang stabil.

Banyak kesalahan keadaan tunak 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 tunak yang dipelajari adalah kesalahan yang muncul dari konfigurasi sistem itu sendiri dan jenis input yang diterapkan.



Gambar 3.1. Sistem dengan **a.** kesalahan keadaan tunak bernilai terbatas untuk input fungsi step; **b.** kesalahan keadaan tunak nol untuk input fungsi step

Contohnya, amati Gambar 3.1(a), dimana $R(s)$ adalah input, $C(s)$ adalah output, dan $E(s) = R(s) - C(s)$ adalah error (kesalahan keadaan tunak). Pada keadaan-ajeg, jika $c(t) = r(t)$, maka $e(t)$ bernilai nol. Tetapi dengan adanya *gain* (pengali), K , error 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 eror. Jika kita sebut $C_{steady-state}$ adalah nilai keadaan tunak suatu output dan $e_{steady-state}$ adalah nilai keadaan tunak suatu eror, maka $C_{steady-state} = K e_{steady-state}$, atau

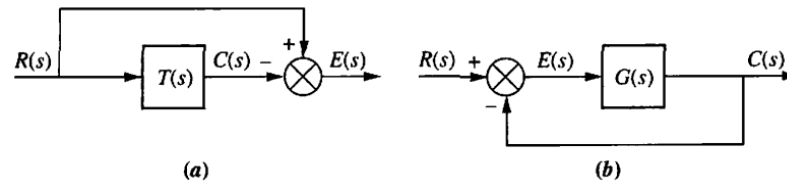
$$e_{steady-state} = \frac{1}{K} C_{steady-state} \quad (3.1)$$

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 tunak untuk input fungsi step. Kesalahan ini berkurang ketika nilai K meningkat.

Jika penguatan jalur maju digantikan oleh integrator, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.1(b), akan ada nol kesalahan pada kondisi tunak untuk input fungsi step. Alasannya adalah sebagai berikut: Ketika $c(t)$ meningkat, $e(t)$ akan berkurang, karena $e(t) = r(t) - c(t)$. Penurunan ini akan berlanjut hingga tidak ada kesalahan nol, tetapi masih akan ada nilai untuk $c(t)$ karena integrator dapat memiliki output yang konstan tanpa input apa pun. Misalnya, motor dapat direpresentasikan hanya sebagai integrator. Tegangan yang diberikan pada motor akan menyebabkan putaran. Ketika tegangan yang diberikan dilepas, motor akan berhenti dan tetap pada posisi keluaran saat ini. Karena tidak kembali ke posisi semula, kami memiliki output perpindahan sudut tanpa input ke motor. Oleh karena itu, sistem yang mirip dengan Gambar 3.1(b), yang menggunakan motor di jalur maju, dapat memiliki nol kondisi tunak untuk input fungsi step [22].

Pertimbangkan Gambar 3.2(a). Untuk menentukan $E(s)$, kesalahan antara input, $R(s)$, dan output, $C(s)$, ditulis sebagai:

$$E(s) = R(s) - C(s) \quad (3.2)$$



Gambar 3.2. Error sistem kontrol tertutup: a. Representasi secara umum; b. Representasi untuk sistem umpan balik satuan

tetapi,

$$C(s) = R(s)T(s) \quad (3.3)$$

Dengan mensubstitusi Persamaan 3.3 ke 3.2, lalu disederhanakan dan dicari solusi pemecahan untuk $E(s)$, yaitu:

$$E(s) = R(s)(1 - T(s)) \quad (3.4)$$

Meskipun Persamaan 3.4 membantu kita dalam menyelesaikan $e(t)$ di setiap waktu, t , tetapi kita lebih tertarik untuk mengetahui nilai akhir dari error, $e(\infty)$. Dengan mengaplikasikan teorema nilai akhir, yang mana memungkinkan kita untuk menggunakan nilai akhir dari $e(t)$ tanpa mengambil transformasi balik Laplace $E(s)$, dan kemudian membiarkan t mendekati ∞ , didapatkan

$$e(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) \quad (3.5)$$

Substitusi Persamaan 3.4 ke 3.5, didapatkan:

$$e(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sR(s)[1 - T(s)] \quad (3.6)$$

Pertimbangan sistem kontrol umpan balik ditunjukkan pada Gambar 3.2(b). Karena umpan balik, $H(s)$, sama dengan 1, sistem memiliki umpan balik satuan.

Implikasinya adalah bahwa $E(s)$ sebenarnya adalah kesalahan antara input, $R(s)$, dan output, $C(s)$. Jadi, jika kita memecahkan Persamaan untuk $E(s)$, kita akan memiliki ekspresi untuk kesalahan tersebut. Kemudian diterapkan teorema nilai akhir untuk mengevaluasi kesalahan keadaan-ajeg.

Menulis $E(s)$ berdasarkan Gambar 3.2(b), didapatkan

$$E(s) = R(s) - C(s) \quad (3.7)$$

Tetapi,

$$C(s) = E(s)G(s) \quad (3.8)$$

Substitusi Persamaan 3.8 ke 3.7, didapatkan:

$$E(s) = \frac{R(s)}{1 + G(s)} \quad (3.9)$$

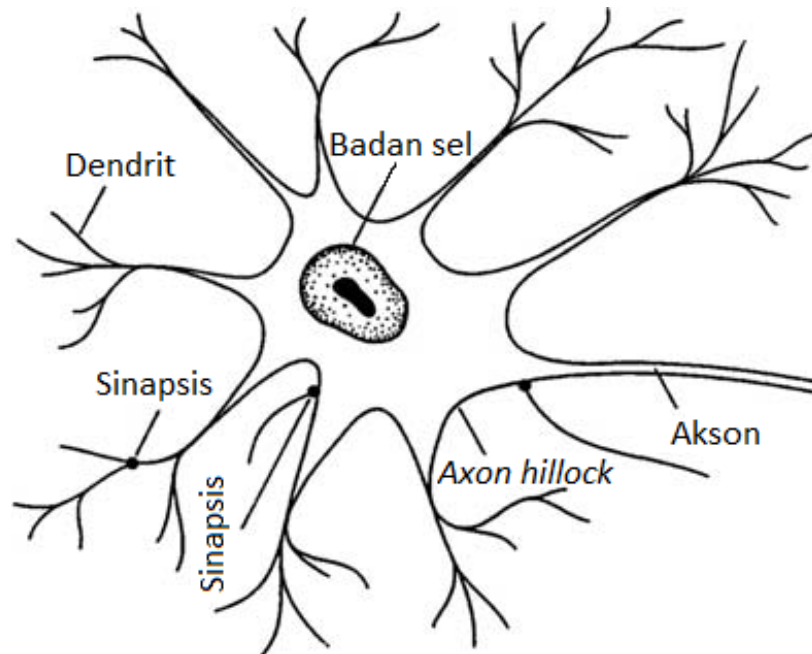
Kemudian diterapkan teorema nilai akhir, 3.5. Pada titik ini dalam perhitungan numerik, kita harus memeriksa apakah sistem loop tertutup stabil, menggunakan, misalnya, kriteria Routh-Hurwitz. Namun, untuk saat ini, asumsikan bahwa sistem loop tertutup adalah stabil dan gantikan Persamaan 3.9 ke Persamaan 3.5, didapatkan:

$$e(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{1 + G(s)} \quad (3.10)$$

III.3. Jaringan Saraf Tiruan

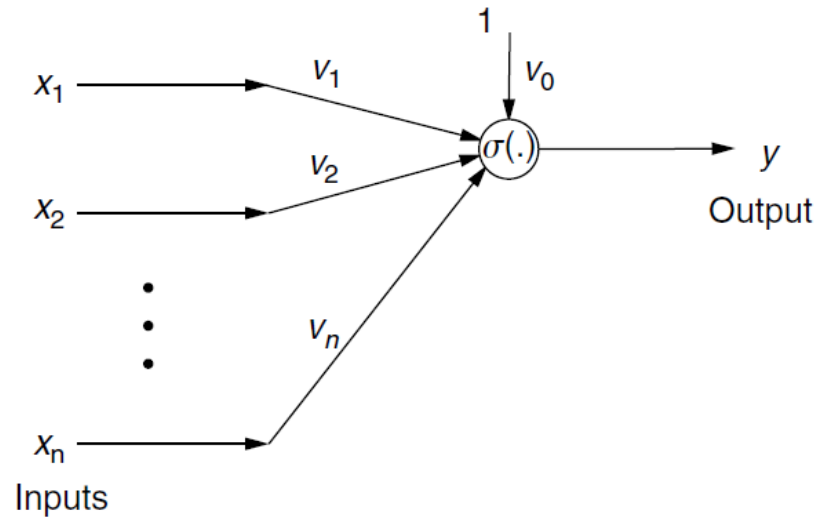
Jaringan Saraf Tiruan (JST) dimodelkan dari proses biologis untuk pemrosesan informasi, termasuk secara khusus sistem saraf dan unit dasarnya, neuron (sel saraf). Sinyal didistribusikan dalam bentuk beda potensial antara bagian dalam dan luar sel. Komponen sel saraf (neuron) ditunjukkan pada Gambar 3.3. Dendrit membawa

sinyal dari neuron lain ke dalam badan sel (soma), kemungkinan dengan memperkalkan setiap sinyal yang masuk dengan koefisien pembobotan pengiriman.



Gambar 3.3. Anatomi neuron

Pada badan sel, kapasitansi sel mengintegrasikan sinyal yang terkumpul di *axon hillock* (bagian khusus dari badan sel neuron yang terhubung dengan akson). Sekalinya sinyal gabungan melebihi ambang batas nilai tertentu, sinyal/impuls ditransmisikan melalui akson. Ketidaklinieran sel menjadikan impuls komposit sebagai fungsi nonlinier dari kombinasi sinyal yang datang. Akson tersebut, melalui sinapsis, terhubung dengan dendrit pada neuron berikutnya. Sinapsis beroperasi melalui pelepasan kimiawi *neurotransmitter* melintasi celah antar sel, dan dapat berupa *excitatory* (kecenderungan dalam penembakan neuron berikutnya) atau *inhibitory* (kecenderungan dalam mencegah penembakan neuron berikutnya) [23].



Gambar 3.4. Model matematis neuron.

III.3.1. Model Matematis Neuron

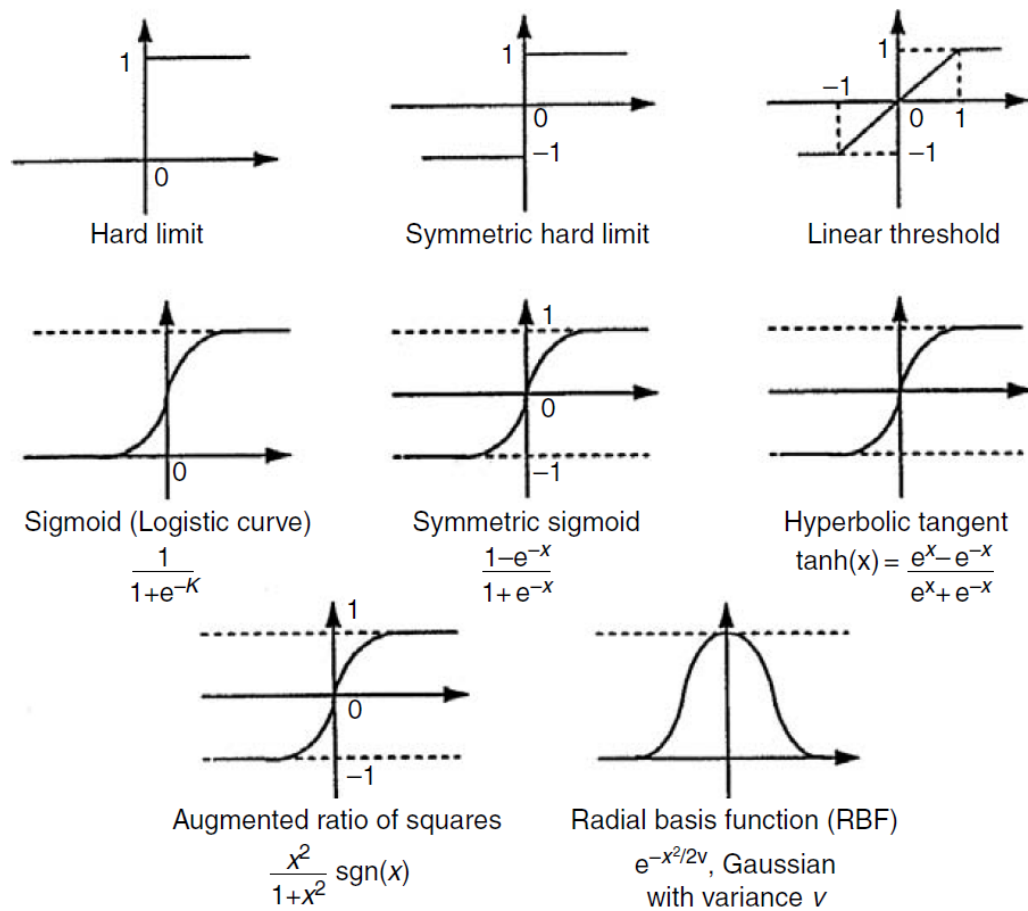
Model matematis dari suatu neuron dilukiskan oleh Gambar 3.4, yang mana menunjukkan pembobotan dendrit v_j , nilai ambang batas penembakan v_0 (disebut juga sebagai bias), penjumlahan dari sinyal masuk yang diberi bobot, dan fungsi nonlinier $\sigma(\cdot)$. Sel input adalah sinyal ke- n pada waktu instan $kx_1(k), kx_2(k), kx_3(k), \dots, x_n(k)$ dan outputnya adalah nilai skalar $y(k)$, yang dapat dinyatakan sebagai

$$y(k) = \sigma \left(\sum_{j=1}^n v_j x_j(k) + v_0 \right) \quad (3.11)$$

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 (Haykin 1994).

Fungsi sel nonlinear dikenal sebagai fungsi aktivasi. Fungsi aktivasi dipilih secara khusus untuk aplikasi-aplikasi meskipun beberapa pilihan yg umum diilustrasikan pada Gambar 3.5 Intensi pada fungsi aktivasi adalah untuk memodelkan perilaku nonlinier suatu sel dimana tidak terdapat output dibawah nilai tertentu suatu

argumen. Fungsi sigmoid adalah sebuah kelas umum dari fungsi yang tidak meningkat secara monoton dengan mengambil nilai-nilai yang dibatasi antara nilai $-\infty$ dan $+\infty$. Perlu dicatat bahwa ketika nilai ambang batas atau bias v_0 berubah, fungsi



Gambar 3.5. Fungsi-fungsi aktivasi

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 terdiferensiasi.

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

$$\bar{x}(k) = [x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_n]^T, \quad \bar{v}(k) = [v_1 \ v_2 \ \cdots \ v_n]^T \quad (3.12)$$

Kemudian, ini memungkinkan untuk ditulis dalam notasi matriks

$$y = \sigma(\bar{v}^T \bar{x}) + v_0 \quad (3.13)$$

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

$$\begin{aligned} x(k) &= [1 \ \bar{x}^T]^T = [1 \ x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_n]^T \\ v(k) &= [v_0 \ \bar{v}^T]^T = [v_0 \ v_1 \ v_2 \ \cdots \ v_n]^T \end{aligned} \quad (3.14)$$

bisa juga ditulis sebagai

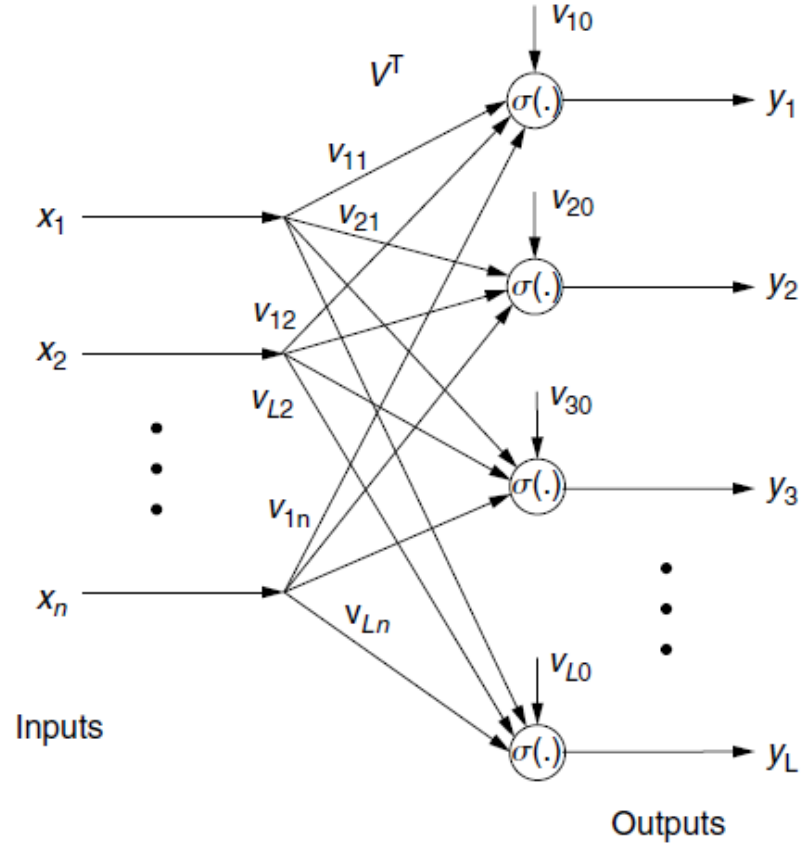
$$y = \sigma(v^T x) \quad (3.15)$$

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 kita dengan bebas dapat mengatakan bahwa $x(k)$ dan v adalah elemen \mathbb{R}^n .

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

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

$$y_l(k) = \sigma \left(\sum_{j=1}^n v_{lj} x_j(k) + v_{l0} \right); \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (3.16)$$



Gambar 3.6. Jaringan layar tunggal

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

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

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

$$y = \bar{\sigma}(\bar{V}^T \bar{x} + b_v) \quad (3.18)$$

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

$$\bar{\sigma}(w) \equiv [\bar{\sigma}(w)_1 \bar{\sigma}(w)_2 \cdots \bar{\sigma}(w)_L]^T \quad (3.19)$$

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

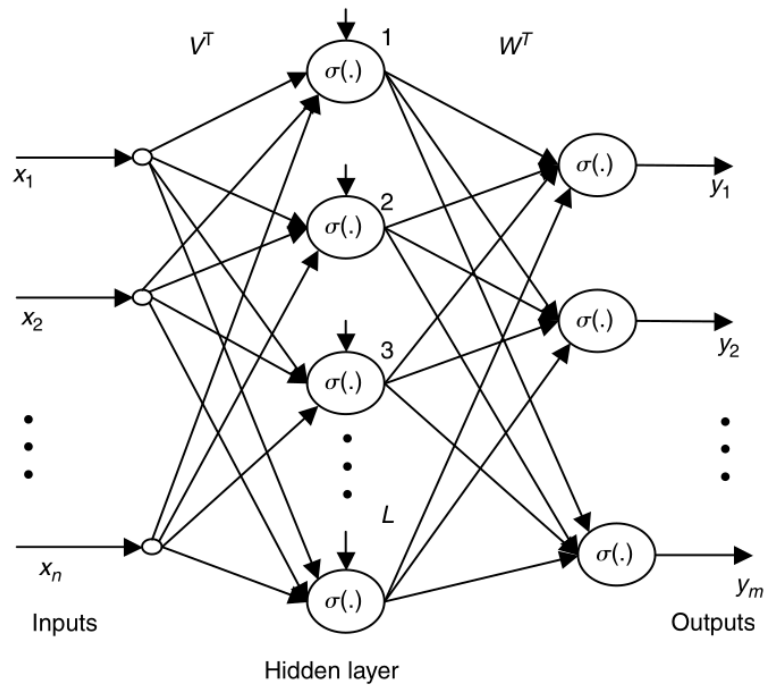
$$V^T \equiv \begin{bmatrix} v_{10} & v_{11} & \cdots & v_{1n} \\ v_{20} & v_{21} & \cdots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{L0} & v_{L1} & \cdots & v_{Ln} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

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

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

III.3.2. Jaringan Layer Jamak (MLP)

Jaringan layer jamak (*Multilayer Perceptron*) merupakan perluasan dari jaringan layer tunggal (*perceptron*). Sebuah JST 2 layer memiliki dua lapisan neuron dengan satu layer memiliki L buah neuron yang memberikan umpan kepada lapisan kedua yang memiliki m buah neuron, digambarkan pada Gambar 3.7. Lapisan pertama dikenal sebagai lapisan tersembunyi, dengan L sebagai jumlah neuron pada lapisan tersembunyi tersebut. Lapisan kedua dikenal sebagai lapisan output. Jaringan saraf tiruan yang terdiri dari banyak lapisan disebut sebagai *multilayer perceptron*. Daya komputasi untuk lapisan ini perlu ditingkatkan secara signifikan dibandingkan jaringan layer tunggal. Dengan jaringan layer tunggal, dimungkinkan untuk menerapkan operasi digital seperti AND, OR, dan COMPLEMENT. Namun, penelitian mengenai JST telah dihentikan bertahun-tahun yang lalu ketika ditunjukkan bahwa jaringan layer tunggal tidak mampu melakukan operasi EXCLUSIVE OR (X-OR),



Gambar 3.7. Jaringan 2 layar

yang merupakan masalah dasar dalam perancangan sistem logika digital. Kemudian telah ditunjukkan bahwa jaringan 2 layar 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 layar ditunjukkan oleh Persamaan *recall* berikut

$$y_i = \sigma \left(\sum_{l=1}^L w_{il} \sigma \left(\sum_{j=1}^n v_{lj} x_j + v_{l0} \right) + w_{i0} \right); \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3.22)$$

Menentukan output jaringan tersembunyi z_1 dapat ditulis sebagai berikut

$$\begin{aligned} z_l &= \sigma \left(\sum_{j=1}^n v_{lj} x_j + v_{l0} \right); & l = 1, 2, \dots, L \\ y_i &= \sigma \left(\sum_{l=1}^L w_{il} z_l + w_{i0} \right); & l = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (3.23)$$

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

$$\bar{W}^T \equiv \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1n} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{L1} & w_{L2} & \cdots & w_{Ln} \end{bmatrix}, \quad b_w = \begin{bmatrix} w_{10} \\ w_{20} \\ \vdots \\ w_{L0} \end{bmatrix}, \quad (3.24)$$

$$W^T \equiv \begin{bmatrix} w_{10} & w_{11} & \cdots & w_{1n} \\ w_{20} & w_{21} & \cdots & w_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{L0} & w_{L1} & \cdots & w_{Ln} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Output JST dapat ditulis sebagai berikut

$$y = \bar{\sigma} \left(\bar{W}^T \bar{\sigma}(\bar{V}^T \bar{x} + b_v) + b_w \right), \quad (3.26)$$

atau

$$y = \bar{\sigma} \left(W^T \sigma(V^T x) \right). \quad (3.27)$$

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

maan (3.19). Dalam (3.27) perlu menggunakan vektor *augmented*

$$\sigma(w) \equiv [1 \quad \bar{\sigma}(w)^T]^T = [1 \quad \sigma(w_1) \sigma(w_2) \dots \sigma(w_L)]^T, \quad (3.28)$$

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

$$\bar{z} = \sigma(V^T x), \quad (3.29)$$

$$y = \sigma(W^T z). \quad (3.30)$$

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

III.4. Sistem Kontrol Jaringan Saraf Tiruan

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

Tabel 3.1. Perbandingan metode kontrol

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

Kelemahan utama dari metode klasik adalah, bahwa mereka hanya dapat digunakan untuk mengendalikan sistem *single-input single-output* (SISO), dengan persyaratan pada model sistem untuk menjadi *linear time-invariant* (LTI). Metode klasik memberikan hasil yang memuaskan hanya dalam mengendalikan proses sederhana, tetapi hasil yang tidak memuaskan dalam kontrol sistem yang lebih kompleks [24].

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

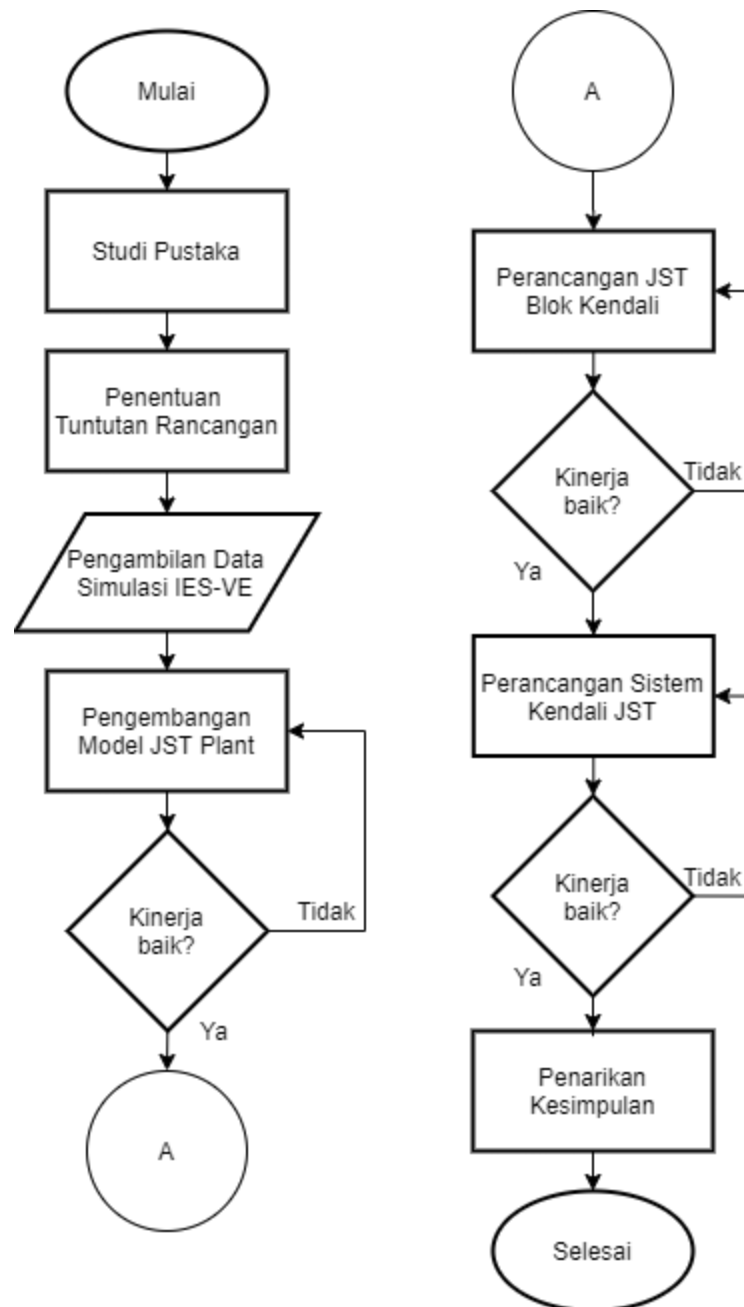
No.	Nama alat/bahan	Fungsi
1	ASUS N550JX	Perangkat komputer
2	IES-VE 2019	Perangkat lunak untuk pengambilan data lingkungan termal <i>climate chamber</i> dan variasi gangguan
3	MS Excel 365	Perangkat lunak pengolahan data tabular
4	MATLAB R2018a	Perangkat lunak pemrograman dalam merancang jaringan saraf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

Penulis dituntut untuk mampu membangun sistem kendali yang mampu mengendalikan *plant* sesuai dengan *setpoint* yang diinginkan mengikuti skema pengujian pada penggunaan *climate chamber*.

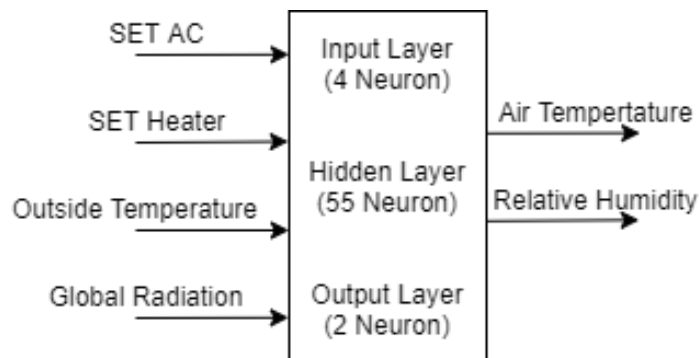
IV.2.3. Pengambilan Data Simulasi IES-VE

Penelitian ini menggunakan data yang sama dengan data yang digunakan oleh penelitian Tanto [25] 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 [3]. 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 udara 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 [3]. 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

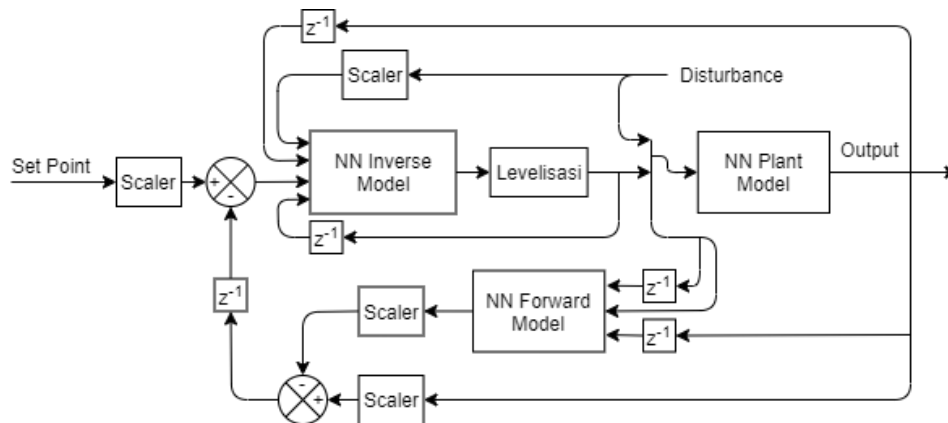
Penelitian ini menggunakan model *plant* yang telah dirancang dari penelitian sebelumnya berjudul "Pemodelan Lingkungan Termal Sistem *Climate Chamber* dengan Metode Jaringan Saraf Tiruan" yang diteliti oleh Tri Hartanto [25]. Model tersebut merupakan hasil perancangan pada piranti lunak MATLAB. Model *plant* tersebut memiliki nilai MAE perhitungan antara target dan prediksi sebesar $0,59^{\circ}\text{C}$ untuk suhu udara ruang dan $5,44\%$ untuk kelembapan relatif. Akurasi JST sebesar $96,23\%$ untuk suhu udara ruang dan $68,90\%$ untuk kelembapan relatif [25]. Model *plant* ini akan digunakan oleh penulis dalam melakukan perancangan sistem kontrol berbasis jaringan saraf tiruan. Arsitektur Model Plant JST dijabarkan oleh Gambar 4.2 di bawah ini.



Gambar 4.2. Arsitektur Model Plant JST

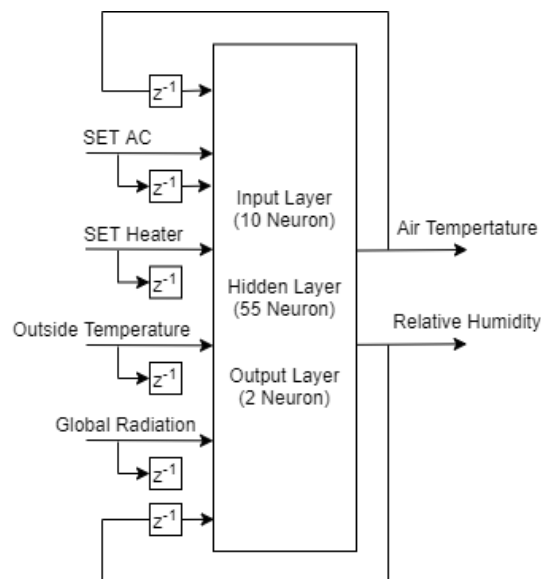
IV.2.5. Perancangan Sistem kontrol JST

Perancangan sistem kontrol JST untuk lingkungan termal *climate chamber* menggunakan diagram blok *Neural Network Internal Model Control* (NN-IMC). Diagram blok tersebut dijabarkan pada Gambar 4.3 dibawah ini:

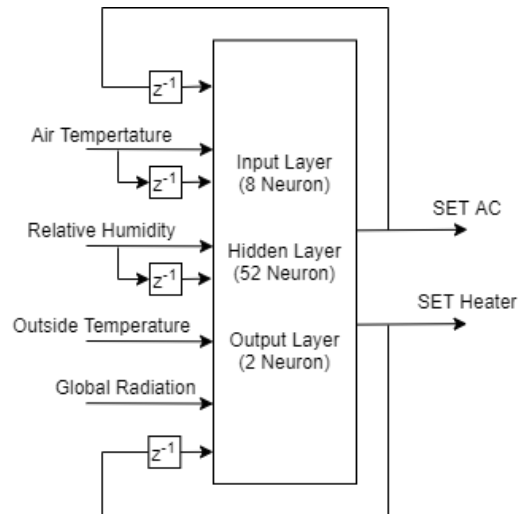


Gambar 4.3. Blok Diagram Sistem Kendali JST

Pada Gambar diatas, Penulis menggunakan Model Invers JST (NN Inverse Model) dari Plant sebagai kontroler dan Model Umpan JST (NN Forward Model)



Gambar 4.4. Arsitektur NN Forward Model



Gambar 4.5. Arsitektur NN Inverse Model

sebagai emulator.

Perancangan JST untuk kontroler menggunakan output plant, disturbance, delay umpan balik dan delay output plant sebagai input sebagai untuk pelatihan JST. NN Inverse Model dijelaskan pada Gambar 4.5 dan NN Forward Model dijelaskan pada Gambar 4.4.

IV.2.6. Penarikan Kesimpulan

Penarikan kesimpulan didapatkan berdasarkan hasil model terbaik yang terpilih dari beberapa percobaan variasi penentuan jumlah *hidden layer* dan/atau jumlah neuron untuk kontroler JST serta berbagai percobaan diagram blok sistem kontrol. Kesimpulan menggambarkan bagaimana parameter model yang terpilih dan rancangan diagram blok sistem kontrol sehingga dapat digunakan sebagai sistem kontrol lingkungan termal pada *climate chamber* DTNTF FT UGM.

IV.3. Rencana Analisis Hasil Penelitian

Terdapat 3 objek yang akan dianalisis oleh penulis, yaitu model plant JST, kontroler JST, dan Sistem Kontrol JST. Kinerja dari model plant JST akan dievaluasi berdasarkan nilai MAE (*Mean Absolute Error*) dan R (koefisien korelasi) dibandingkan dengan rancangan penelitian sebelumnya. Kinerja dari kontroler JST akan dievaluasi berdasarkan nilai MSE (*Mean Squared Error*) dan R (koefisien korelasi) dari rancangan JST tersebut. Kinerja dari sistem kontrol akan dievaluasi berdasarkan nilai Kesalahan Keadaan Ajeg.

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bangunan yang dijadikan objek penelitian adalah *climate chamber* DTNTF FT UGM. Dalam bab ini, akan dibahas mengenai hasil perancangan sistem kontrol sesuai dengan langkah-langkah yang dijelaskan pada Bab IV dengan memvariasikan berbagai macam masukan, kemudian mengetahui keluarannya. Variasi masukan dan keluaran akan dimodelkan dengan model jaringan saraf tiruan untuk mendapatkan parameter-parameter model yang dapat mengendalikan sistem bangunan.

V.1. Hasil Pengembangan Model Plant JST

Penulis menggunakan model JST yang telah dibangun oleh Tri Hartanto[25] sebagai model acuan dalam penelitian ini. Model tersebut kemudian penulis kembangkan kembali untuk meningkatkan kinerjanya sebagai model *plant*. *Hyperparameter* yang digunakan Tri Hartanto pada pembangunan model plant JST ini dijelaskan pada Tabel 5.1.

Tabel 5.1. Tabel Rancangan Model Plant JST ~~Tri Hartanto~~ Ref

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

Bab ii (cerita
metode dan
hasil
penelitian
sebelumnya.

Berdasarkan Tabel 5.1, ~~penulis melihat~~ kinerja model yang lebih baik yang digambarkan dengan nilai MAE dari model tersebut. MAE untuk model yang telah disesuaikan bernilai lebih kecil dari model yang dikembangkan Tri Hartanto. Bahkan kinerja model cukup signifikan terhadap variabel kelembapan relatif.

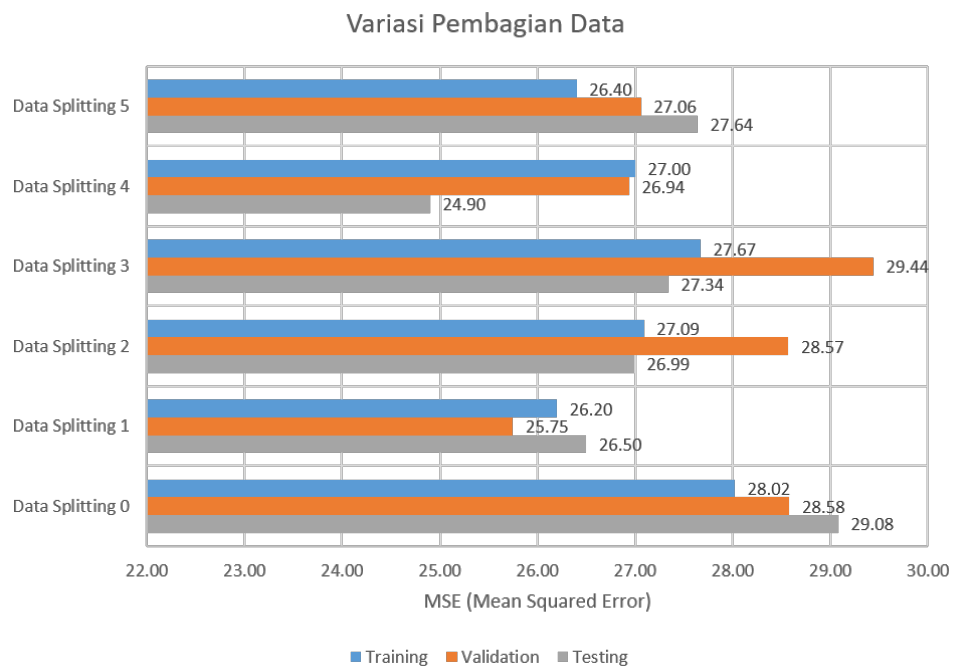
Hasil Variasi Pembagian Data

Dalam menentukan variasi pembagian data, penulis melakukan perbandingan dengan beberapa variasi pembagian data ke dalam 5 variasi. Kemudian, penulis membandingkan kinerja dari setiap pembagian data dengan menggunakan model JST dengan konfigurasi *hyperparameter* sesuai rancangan penelitian sebelumnya[25].

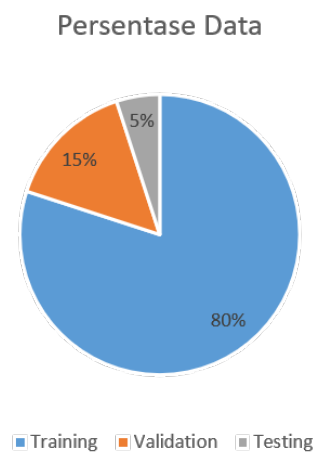
Tabel 5.2. Daftar variasi pembagian data

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 5.2, "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. Sehingga didapatkan rancangan terbaik penulis yang dirangkum pada Tabel 5.3.



Gambar 5.1. Hasil Variasi Pembagian Data



Gambar 5.2. Pembagian Data yang digunakan

Dari pengembangan model plant JST ini, penulis mendapatkan rancangan yang lebih baik lagi dari hasil kinerja rancangan sebelumnya. Dengan mengubah pembagian data dari 50% 25% 25% ke 80% 15% 5%, nilai MAE model untuk kelembapan raltif pun berubah menjadi sebesar 0,62°C untuk suhu ruang dan 5,45%

Tabel 5.3. Tabel Rancangan Model Plant JST **Penulis**

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)	Td: 0,62°C ; RH: 5,45%
Mean Squared Error (MSE)	Td: 0,82°C ; RH: 54,45%
Koefisien Korelasi (R)	Td: 93,09% ; RH: 71,44%

untuk kelembapan relatif.

V.2. Hasil Perancangan Sistem Kontrol JST

Berdasarkan diagram blok sistem kontrol pada Gambar 4.3, penulis menggunakan Internal Model Control sebagai Sistem Kontrol JST dengan komponen emulator JST (*NN Forward Model*) dan kontroler JST (*NN Inverse Model*) di dalamnya. Pada sub-bab ini penulis juga akan menjabarkan hasil kinerja dari sistem kontrol pada simulasi simulink.

V.2.1. Kinerja Emulator JST

Penulis menggunakan *NN Forward Model* sebagai emulator pada sistem kontrol. Model ini mirip seperti rancangan model plant JST yang dijelaskan pada sub-bab sebelumnya. Perbedaannya berada pada masukan dan keluaran dari arsitektur JST yang digambarkan pada Gambar 4.4. Hasil kinerja emulator JST ini dijabarkan pada Tabel 5.4

Tabel 5.4. 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)	Td: 0,51°C ; RH: 1,43%
Mean Squared Error (MSE)	Td: 0,49°C ; RH: 5,91%
Koefisien Korelasi (R)	Td: 96,38% ; RH: 97,79%

V.2.2. Kinerja Kontroler JST

Penulis menggunakan *NN Inverse Model* sebagai kontroler pada sistem kontrol. Pada proses pelatihan JST, penulis melakukan 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 dan besar satuan dari setiap variabel. 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:

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

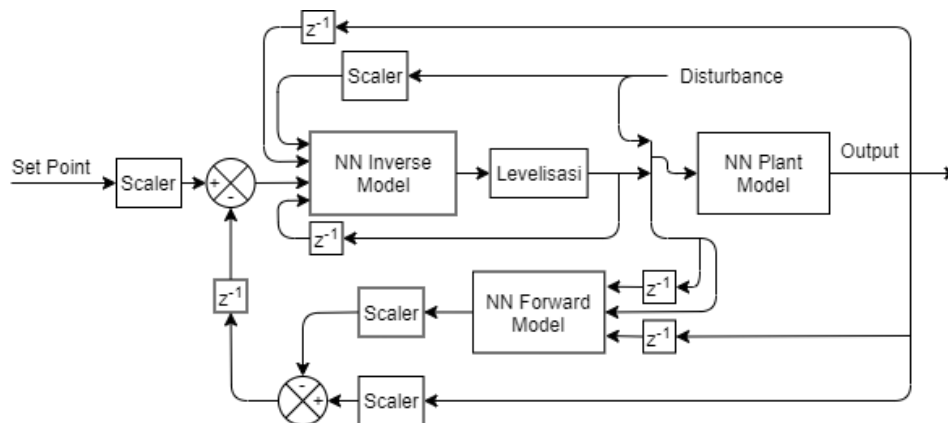
Rancangan kontroler JST mirip dengan rancangan model plant JST. Perbedaannya hanyalah pada jumlah neuron pada *hidden layer* yang berjumlah 52 neuron. Hasil kinerja dari kontroler JST ini dapat dilihat pada Tabel 5.5.

Tabel 5.5. 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.2.3. Kinerja Sistem Kontrol JST

Sistem kontrol yang dijalankan penulis menghasilkan kinerja yang cukup baik untuk mengendalikan suhu ruang dan kelembapan relatif.

**Gambar 5.3.** Blok Diagram Sistem Kendali JST

V.2.3.3. SET POINT Konstan SP1

Kombinasi SET Point dapat dilihat pada Tabel 5.6. Hasil dari simulasi simulink dapat dilihat pada Gambar 5.4 dan Gambar 5.5. Pada Gambar 5.4 dan Gambar 5.5 dapat dilihat bahwa nilai *error steady-state* sistem kontrol cukup kecil. Nilai *Error*

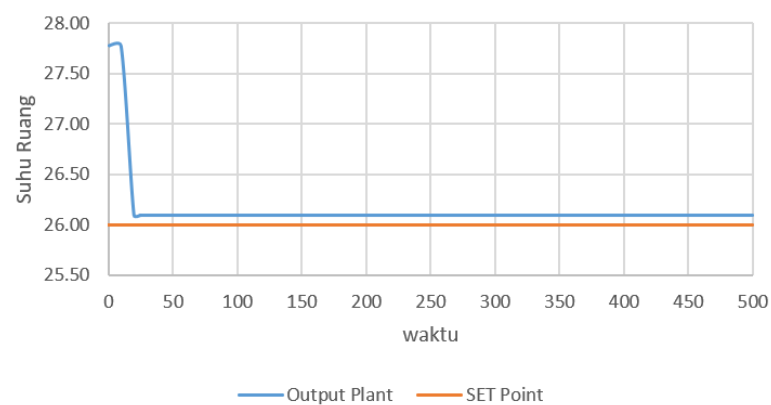
Steady-State dari simulasi ini dapat dilihat pada Tabel 5.7. Grafik dari hasil simulasi dapat dilihat pada Gambar 5.4 untuk Suhu Ruang dan Gambar 5.5 untuk Kelembapan Relatif. Kontroler mengeluarkan nilai *Manipulated Variable* yang ditunjukkan oleh Gambar 5.6 dan Gambar 5.7.

Tabel 5.6. Nilai Kombinasi SET POINT SP1

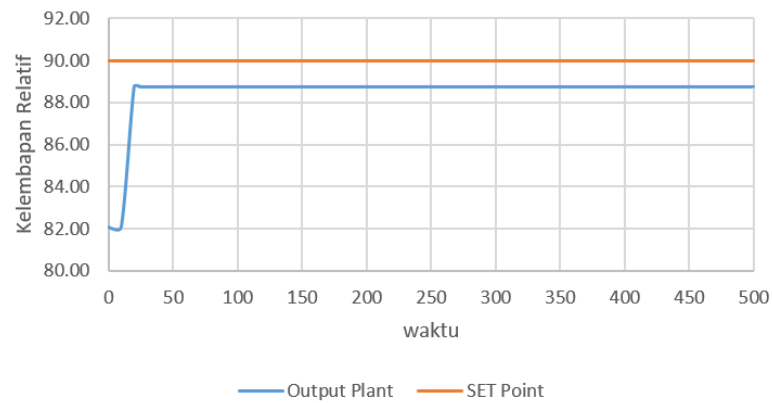
Variabel	SET Point
Suhu Ruang (Td)	26°C
Kelembapan Relatif (RH)	90%
Suhu Luar (To)	27°C
Radiasi Matahari (RD)	400 W/m ²

Tabel 5.7. Hasil Simulasi Sistem Kontrol SP1

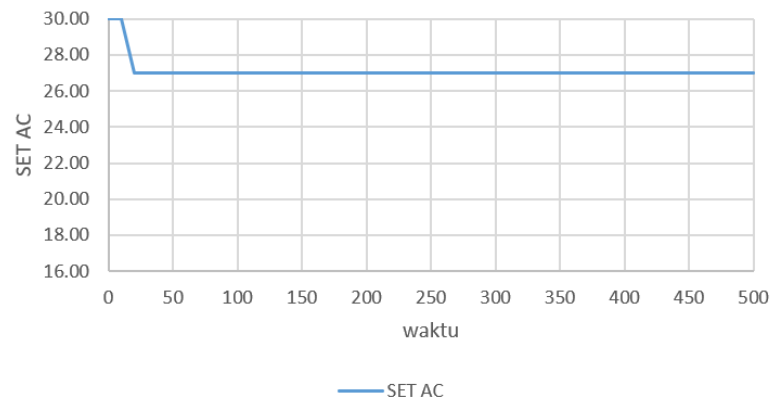
Variabel	SET Point	Output Plant	Error Steady-State
Suhu Ruang (Td)	26°C	26,09°C	0,09°C
Kelembapan Relatif (RH)	90%	88,76%	1,24%



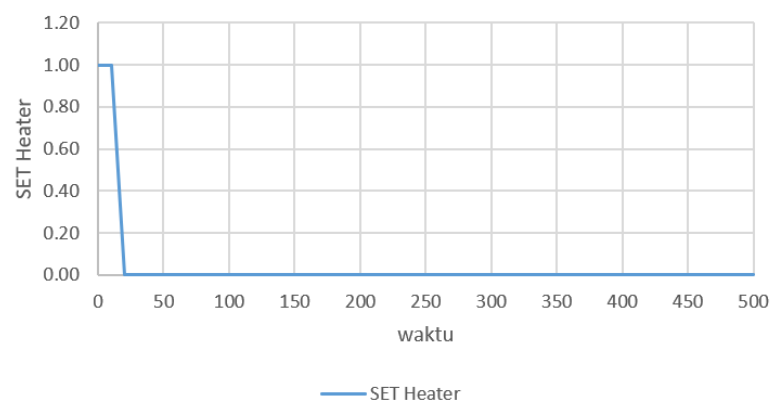
Gambar 5.4. Hasil Simulasi Sistem Kontrol untuk Suhu Ruang SP1



Gambar 5.5. Hasil Simulasi Sistem Kontrol untuk Kelembapan Relatif SP1



Gambar 5.6. Nilai MV SET AC SP1



Gambar 5.7. Nilai MV SET Heater SP1

V.2.3.3. SET POINT Konstan SP2

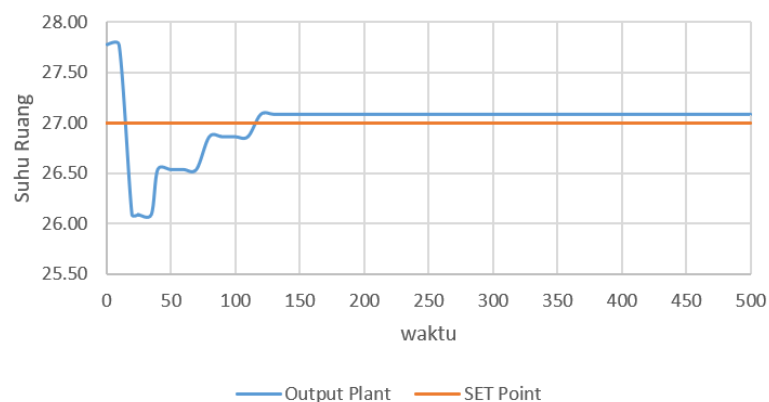
Kombinasi SET Point dapat dilihat pada Tabel 5.8. Hasil dari simulasi simulink dapat dilihat pada Gambar 5.8 dan Gambar 5.9. Pada Gambar 5.8 dan Gambar 5.9 dapat dilihat bahwa nilai *error steady-state* sistem kontrol cukup kecil. Nilai *Error Steady-State* dari simulasi ini dapat dilihat pada Tabel 5.9. Grafik dari hasil simulasi dapat dilihat pada Gambar 5.8 untuk Suhu Ruang dan Gambar 5.9 untuk Kelembapan Relatif. Kontroler mengeluarkan nilai *Manipulated Variable* yang ditunjukkan oleh Gambar 5.10 dan Gambar 5.11.

Tabel 5.8. Nilai Kombinasi SET POINT SP2

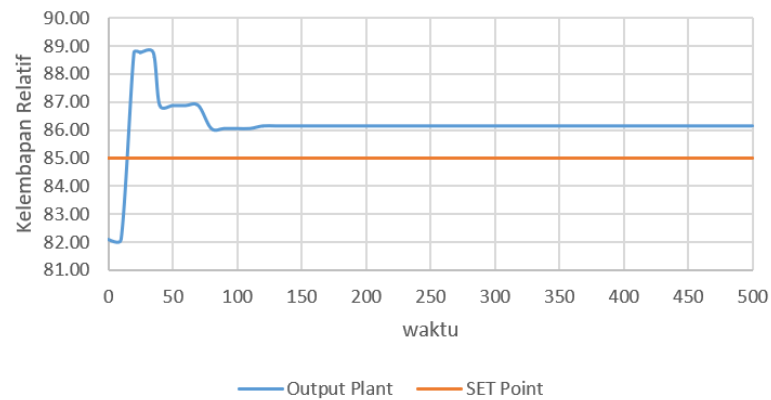
Variabel	SET Point
Suhu Ruang (Td)	27°C
Kelembapan Relatif (RH)	85%
Suhu Luar (To)	27°C
Radiasi Matahari (RD)	400 W/m ²

Tabel 5.9. Hasil Simulasi Sistem Kontrol SP2

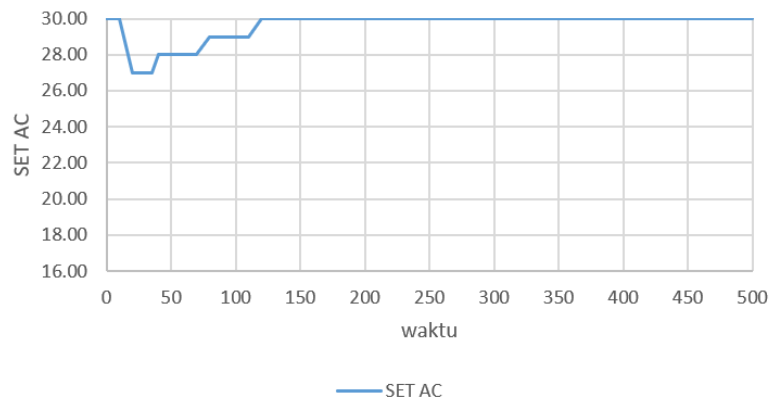
Variabel	SET Point	Output Plant	Error Steady-State
Suhu Ruang (Td)	27°C	27,09°C	0,09°C
Kelembapan Relatif (RH)	85%	86,14%	1,14%



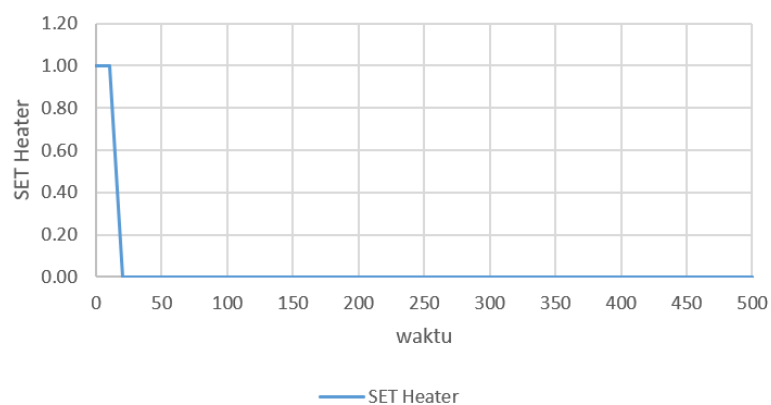
Gambar 5.8. Hasil Simulasi Sistem Kontrol untuk Suhu Ruang SP2



Gambar 5.9. Hasil Simulasi Sistem Kontrol untuk Kelembapan Relatif SP2



Gambar 5.10. Nilai MV SET AC SP2



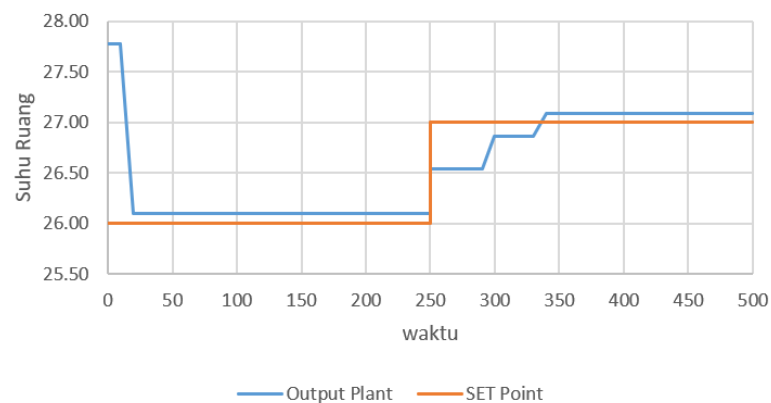
Gambar 5.11. Nilai MV SET Heater SP2

V.2.3.3. SET POINT Fungsi Step SP3

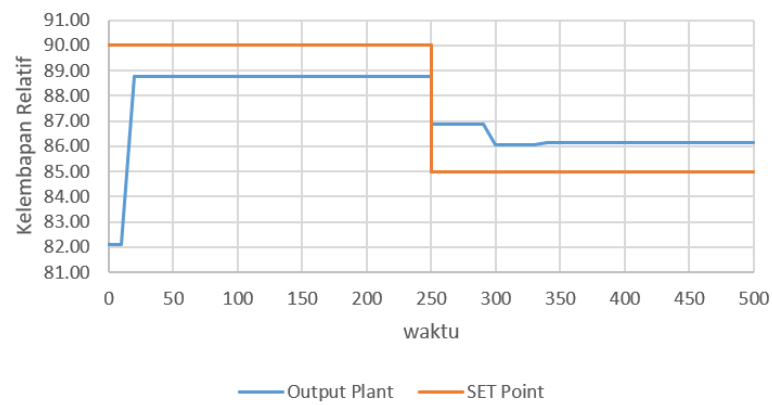
Kombinasi SET Point dapat dilihat pada Tabel 5.10. Hasil dari simulasi simulink dapat dilihat pada Gambar 5.12 dan Gambar 5.13. Pada Gambar 5.12 dan Gambar 5.13 dapat dilihat bahwa nilai *error steady-state* sistem kontrol cukup kecil. Nilai *Error Steady-State* dari simulasi ini dapat dilihat pada Tabel ???. Grafik dari hasil simulasi dapat dilihat pada Gambar 5.12 untuk Suhu Ruang dan Gambar 5.13 untuk Kelembapan Relatif. Kontroler mengeluarkan nilai *Manipulated Variable* yang ditunjukkan oleh Gambar 5.14 dan Gambar 5.15.

Tabel 5.10. Nilai Kombinasi SET POINT SP3

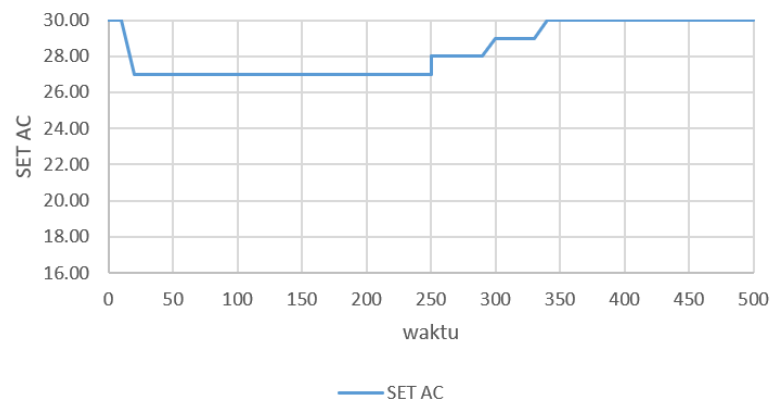
Variabel	SET Point
Suhu Ruang (Td)	Step 26°C -> 27°C
Kelembapan Relatif (RH)	Step 90% -> 85%
Suhu Luar (To)	27°C
Radiasi Matahari (RD)	400 W/m ²



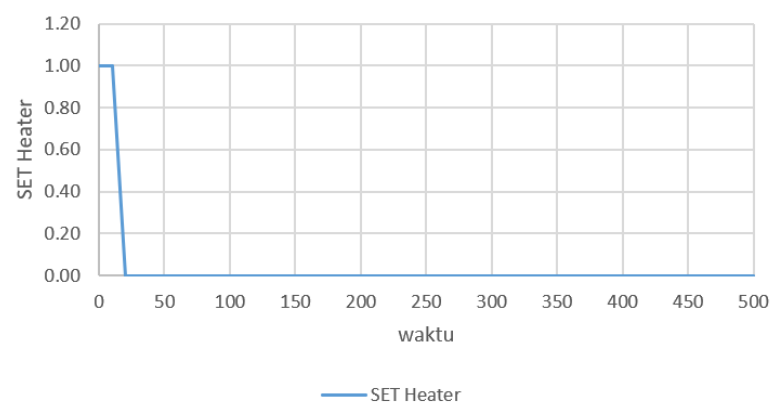
Gambar 5.12. Hasil Simulasi Sistem Kontrol untuk Suhu Ruang SP3



Gambar 5.13. Hasil Simulasi Sistem Kontrol untuk Kelembapan Relatif SP3



Gambar 5.14. Nilai MV SET AC SP3



Gambar 5.15. Nilai MV SET Heater SP3

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

VI.1. Kesimpulan

Setelah penulis merancang dan menganalisis hasil dari penelitian ini, penulis mendapatkan beberapa kesimpulan dari pengerjaan tugas akhir ini. Sistem kontrol berhasil dirancang menggunakan *Internal Model Control* berbasis Jaringan Saraf Tiruan dengan nilai *error steady-state* sebesar $0,09^{\circ}\text{C}$ untuk suhu ruang dan sebesar 1,24% untuk kelembapan relatif. Kontroler berbasis jaringan saraf tiruan yang dihasilkan dibangun dengan pembagian data 80% data latih, 15% data validasi, dan 5% data uji. Kontroler memiliki arsitektur jaringan dengan 1 lapisan tersembunyi (*hidden layer*) dan 52 neuron pada lapisan tersembunyi (*hidden layer*) tersebut. JST kontroler menggunakan fungsi aktivasi *hyperbolic tangent* dengan algoritma pembelajaran Levenberg-Marquardt.

VI.2. Saran

Penelitian ini jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, penulis memberikan beberapa saran dalam rangka penyempurnaan untuk pengembangan sistem kontrol ini pada penelitian-penelitian berikutnya. Diantaranya adalah sebagai berikut:

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 selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IEA. *ENERGY EFFICIENCY 2017 Laporan Khusus: Efisiensi Energi di Indonesia*. International Energy Agency, Indonesia, 2017.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] H. Feriadi dan N. Hien. "Thermal comfort for naturally ventilated houses in Indonesia". *Journal of Building Environment, Elsevier Ltd.*, 109:208–223, 2004.
- [5] E. Arens, H. Zhang dan C. Huizenga. "Partial- and whole-body thermal sensation and comfort - Part I: Uniform environmental conditions". *Journal of Thermal Biology, Elsevier Ltd.*, 31:53–59, 2006.
- [6] A. P. Leskinen, J. K. Jokiniemi dan K. E. J. Lehtinen. "Characterization of Aging Wood Chip Combustion Aerosol in an Environmental Chamber". *Elsevier Ltd.*, 41:3713–3721, 2007.
- [7] W. He, G. Xu dan R. Shen. "Control of Temperature Uniformity in the Temperature Chamber With Centrifugal Acceleration". *Journal of Process Control, Elsevier Ltd.*, 24:1–6, 2014.
- [8] A. Huguet, A. Francez, M. Dung, C. Fosse dan S. Derenne. "A Climatic Chamber Experiment to Test the Short Term Effect of Increasing Temperature on Branched GDGT Distribution in Sphagnum Peat". *Journal of Organic Geochemistry, Elsevier Ltd.*, 73:109–112, 2014.
- [9] E. Martinez dan S. J. Agosta. "Budget-Limited Thermal Biology: Design, Construction and Performance of a Large, Walk-in Style Temperature-Controlled Chamber". *Journal of Thermal Biology, Elsevier Ltd.*, 58:29–34, 2016.
- [10] Jose A. Jofre-reche, J. C. Su dan C. Alia. "Characterization of the Chemical Structure of Vinyl Ester Resin in a Climate Chamber Under Different Conditions of Degradation". *Polymer Degradation and Stability, Elsevier Ltd.*, 153:88–99, 2018.
- [11] A. Srinivasa, S. Das, H. Kottiyen, V. Ashok dan P. Shankarrao. "The Effect of Cold Chamber Temperature on the Cadaver's Electrolyte Changes in Vitreous Humor and Plasma". *Journal of Forensic and Legal Medicine, Elsevier Ltd.*, 62:87–91, 2019.

- [12] Nur Muna Nadiya. *Analisis Pengaruh Perubahan Lingkungan Termal terhadap Perubahan Level Sensasi Termal*. Skripsi, Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2020.
- [13] G. Mustafaraj, J. Chen dan G. Lowry. “Thermal Behaviour Prediction Utilizing Artificial Neural Networks for an Open Office”. *Elsevier Ltd.*, 2010.
- [14] Jin Woo Moon dan Jong-Jin Kim. “ANN-Based Thermal Control Models for Residential Buildings”. *Elsevier Ltd.*, 2010.
- [15] Jin Woo Moon, Sung Kwon Jung, Youngchul Kim dan Seung-Hoon Han. “Comparative Study of Artificial Intelligence-Based Building Thermal Control Methods E Application of Fuzzy, Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, and Artificial Neural Network”. *Elsevier Ltd.*, 2011.
- [16] Zakia Afroz, GM Shafiullah, Tania Urmee dan Gary Higgins. “Prediction of Indoor Temperature in an Institutional Building”. *Elsevier Ltd.*, 2017.
- [17] Ján Drgoňa, Damien Picard, Michal Kvasnica dan Lieve Helsen. “Approximate Model Predictive Building Control via Machine Learning”. *Elsevier Ltd.*, 2018.
- [18] Hyun-Jung Yoon, Dong-Seok Lee, Hyun Cho dan Jae-Hun Jo. “Prediction of Thermal Environment in a Large Space Using Artificial Neural Network”. *MD-PI*, 2018.
- [19] Zhipeng Deng dan Qingyan Chen. “Artificial Neural Network Models Using Thermal Sensations and Occupants’ Behavior for Predicting Thermal Comfort”. *Elsevier Ltd.*, 2018.
- [20] Hugo Hens. *Building Physics - Heat, Air and Moisture: Fundamentals and Engineering Methods with Examples and Exercises*. Ernst and Sohn, Berlin, Germany, 2007.
- [21] 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.
- [22] Norman S. Nise. *Control System Engineering*. John Wiley and Sons, Inc., United State of America, 2011.
- [23] Jagannathan Sarangapani. *Neural Network Control of Nonlinear Discrete-Time Systems*. Taylor and Francis Group, LLC, United State of America, 2006.
- [24] 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.

- [25] 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.

LAMPIRAN

LAMPIRAN A

DATA PENELITIAN

A.1. Data *Climate Chamber*

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

A.2. Kinerja Model Plant JST

Tabel A.1. Tabel Rancangan Model Plant JST Penulis

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)	Td: 0,62°C ; RH: 5,45%
Mean Squared Error (MSE)	Td: 0,82°C ; RH: 54,45%
Koefisien Korelasi (R)	Td: 93,09% ; RH: 71,44%

A.3. Kinerja Emulator JST

Tabel A.2. 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)	Td: 0,51°C ; RH: 1,43%
Mean Squared Error (MSE)	Td: 0,49°C ; RH: 5,91%
Koefisien Korelasi (R)	Td: 96,38% ; RH: 97,79%

A.4. Kinerja Kontroler JST

Tabel A.3. 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%

A.5. Hasil Simulasi Simulink SP1

Tabel A.4. Hasil Simulasi Sistem Kontrol SP1

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

A.6. Hasil Simulasi Simulink SP2

Tabel A.5. Hasil Simulasi Sistem Kontrol SP2

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

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 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 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 Luar

```

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

```

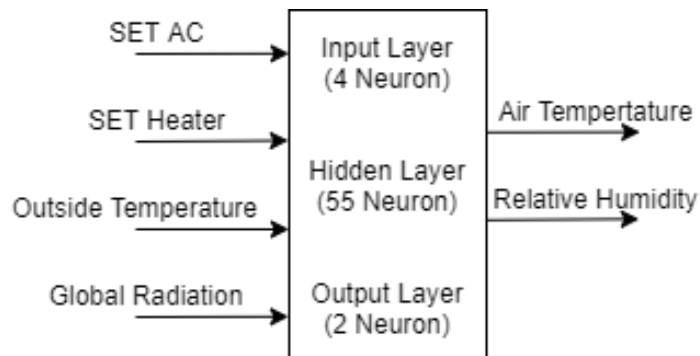
1 function y = ScalerRD(u)
2     maxRD = 845.418;
3     minRD = 0;
4 y = ( u - minRD ) ./ ( maxRD - minRD );

```


LAMPIRAN C

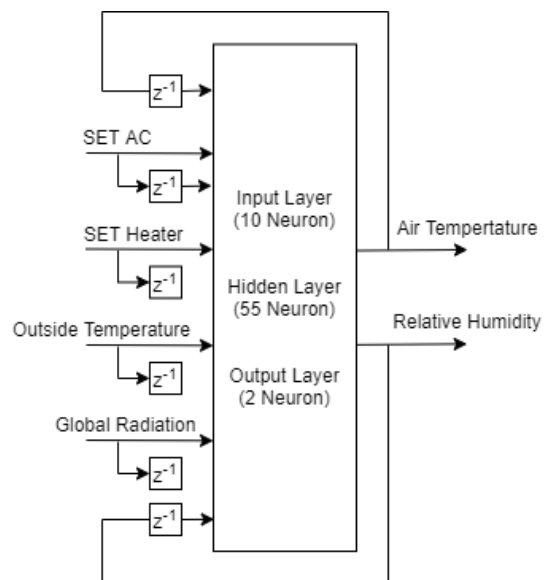
DIAGRAM BLOK

C.1. Diagram Blok Model Plant JST



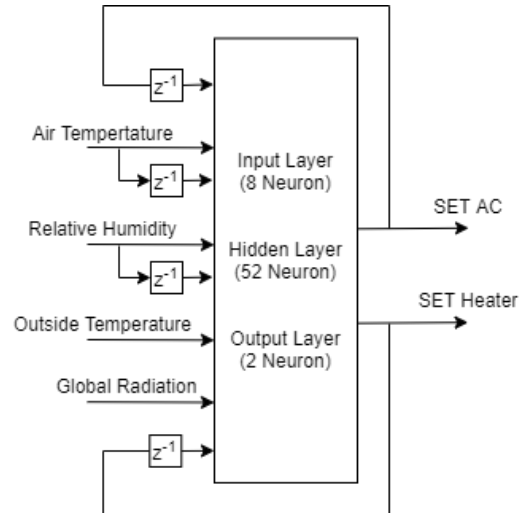
Gambar C.1. Arsitektur Model Plant JST

C.2. Diagram Blok Emulator JST



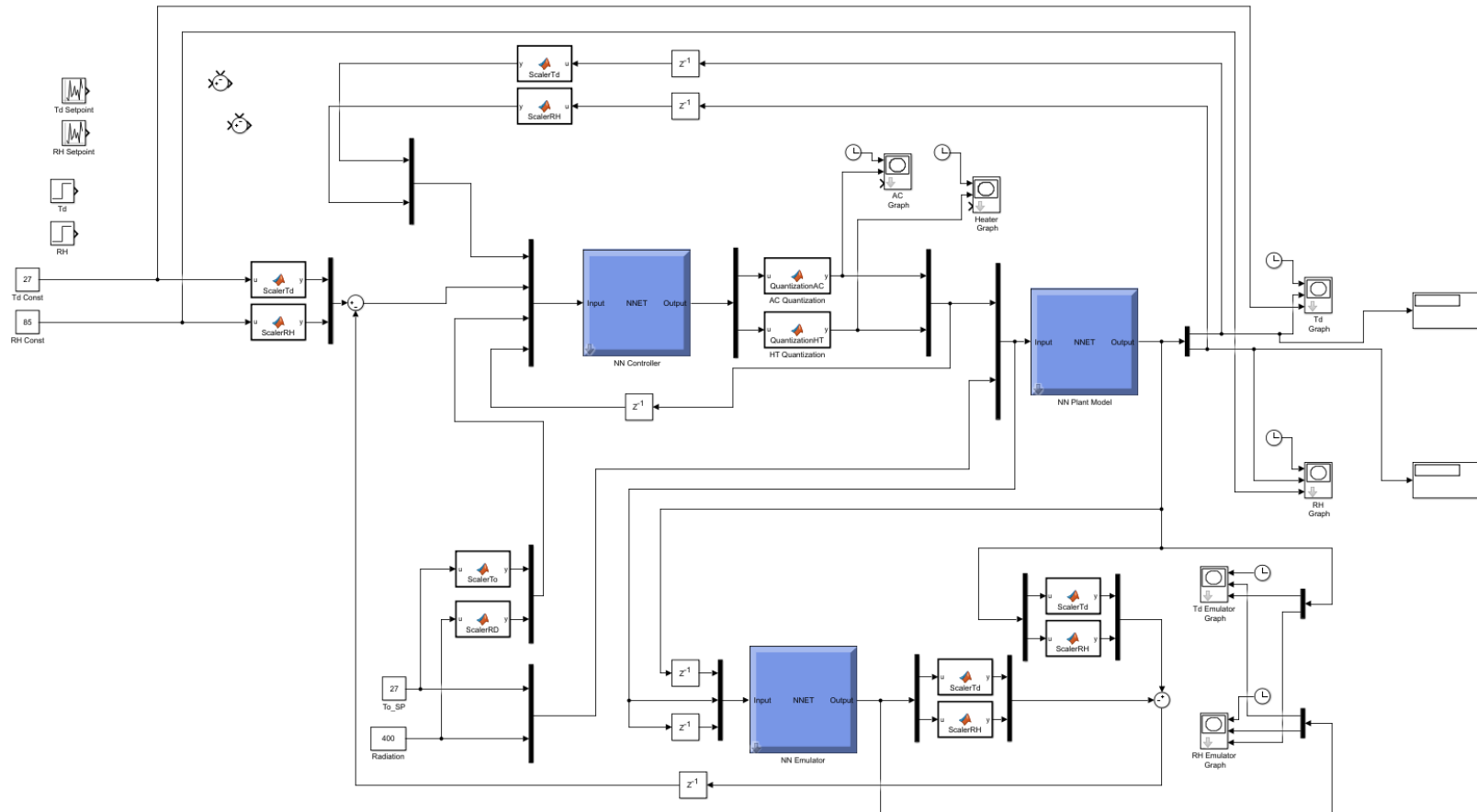
Gambar C.2. Arsitektur NN Forward Model

C.3. Diagram Blok Kontroler JST



Gambar C.3. Arsitektur NN Inverse Model

C.4. Diagram Blok Sistem Kontrol Simulink



Gambar C.4. Blok Diagram Sistem Kontrol Simulink