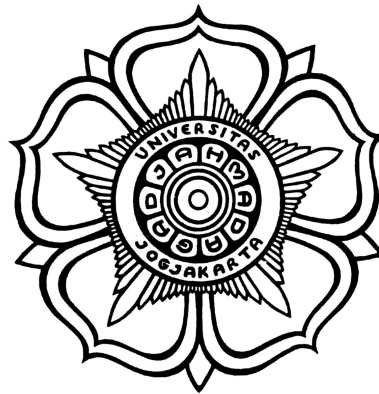


RANCANG BANGUN JARINGAN SARAF TIRUAN UNTUK KENDALI LINGKUNGAN TERMAL *CLIMATE CHAMBER*

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, **15 Januari 2020**
Yang menyatakan,

(Materai Rp. 6000,-)

Ridhan Fadhilah
NIM. 15/384859/TK/43521

HALAMAN PENGESAHAN

SKRIPSI

RANCANG BANGUN JARINGAN SARAF TIRUAN UNTUK KENDALI LINGKUNGAN TERMAL *CLIMATE CHAMBER*

oleh

Ridhan Fadhilah
15/384859/TK/43521

telah dipertahankan di depan Tim Penguji
pada tanggal **20 Januari 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 Fadhilah
NIM	: 15/384859/TK/43521
Pembimbing Utama	: Faridah, S.T., M.Sc.
Pembimbing Pendamping	: Ir. Agus Arif, M.T.
Judul Skripsi	: Rancang Bangun Jaringan Saraf Tiruan untuk Kendali Lingkungan Termal <i>Climate Chamber</i>
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 dekat penulis, yakni Salsabila K. Khansa, M.N. Fathurrahman, M. Faisal Al Bantani, M. Aldan H. A., Irfanda Husni Sahid, dan Cahyarani Paramesti.
8. Tim TA kerabat Lab SSTK yakni Armand, Fathan, Ivan, Yerico, Shaki, Yogi, Didik, Radit, Muna, Tanto, dan Faisal.
9. Rekan-rekan bisnis penulis, yakni Aldan, Irfanda, dan Dimmas.
10. Rekan-rekan startup penulis, yakni Terra, Diko, dan Armand.
11. Teman-teman TF C 2015 yang senantiasa menjadi teman seperjuangan dalam menjalani kuliah selama lebih kurang 4 tahun di UGM.
12. Serta masih banyak lagi berbagai pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

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

Yogyakarta, Januari 2020

Ridhan Fadhilah

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
HALAMAN TUGAS	iv
HALAMAN PERSEMBAHAN	v
HALAMAN MOTTO	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN	xiv
INTISARI	xvi
ABSTRACT	xvii
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 Mengenai <i>Climate Chamber</i>	6

II.2.	Aplikasi Jaringan Saraf Tiruan sebagai Sistem Kendali	9
III.	DASAR TEORI	14
III.1.	Fisika Bangunan	14
III.1.1.	Lingkungan Termal	14
III.1.2.	Kenyamanan Termal	15
III.2.	Sistem Kontrol Otomatis	16
III.2.1.	Dasar-dasar Sistem Kontrol	16
III.2.2.	Kesalahan Keadaan-Ajeg	19
III.3.	Jaringan Saraf Tiruan	23
III.3.1.	Model Matematis Neuron	24
III.3.2.	Jaringan Layar Jamak (MLP)	29
III.3.3.	Kendali Jaringan Saraf Tiruan	32
IV.	PELAKSANAAN PENELITIAN	36
IV.1.	Alat dan Bahan Penelitian	36
IV.2.	Tata Laksana Penelitian	37
IV.2.1.	Studi Literatur	39
IV.2.2.	Pengambilan Data	39
IV.2.3.	Tuntutan Rancangan	40
IV.2.4.	Pemodelan Sistem Kendali	40
IV.3.	Rencana Analisis Hasil Penelitian	40
V.	HASIL DAN PEMBAHASAN	41
V.1.	Hasil Pengambilan Data	41
V.1.1.	Kondisi <i>Climate Chamber</i>	41
V.1.2.	Hasil Rancangan Skenario	41
V.1.3.	Hasil Simulasi IES-VE	41

V.2.	Pembangunan Arsitektur JST	41
V.3.	Analisis Kinerja Arsitektur JST yang terpilih	41
VI.	KESIMPULAN DAN SARAN	42
VI.1.	Kesimpulan	42
VI.2.	Saran	42
LAMPIRAN		
A.	Data Penelitian	46
A.1.	Data <i>Climate Chamber</i>	46
A.2.	Contoh Gambar pada Lampiran	46
A.3.	Contoh Penulisan Tabel pada Lampiran	46
A.4.	Contoh Penulisan Persamaan pada Lampiran	47
B.	Listing Program	49
C.	About L^AT_EX	51
C.1.	Package yang Diperlukan	51
C.2.	File yang diubah isinya oleh penulis	52
C.3.	Menghasilkan file PDF	52

DAFTAR TABEL

2.1. Penelitian mengenai <i>climate chamber</i>	8
2.2. Aplikasi Jaringan Saraf Tiruan sebagai Sistem Kendali	13
3.1. Perbandingan metode kendali	32
4.1. Daftar alat dan bahan	36
4.2. Spesifikasi laptop ASUS N550JX	36
A.1. Contoh penulisan tabel dan peletakkan tabel.	46
A.2. Faktor non- $1/v$	48

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	20
3.2. Error sistem kontrol tertutup: a. Representasi secara umum; b. Representasi untuk sistem umpan balik satuan	21
3.3. Anatomi neuron	24
3.4. Model matematis neuron.	25
3.5. Fungsi-fungsi aktivasi	26
3.6. Jaringan layar tunggal	27
3.7. Jaringan 2 layar	30
3.8. Identifikasi <i>Plant</i>	33
3.9. Model JST <i>Plant</i>	34
3.10. Diagram Blok NN Predictive Control	35
4.1. Diagram Alir Tata Laksana Penelitian	37
4.2. Diagram Alir Perancangan Model JST	37
4.3. Diagram Alir Penelitian Utuh	38
A.1. Contoh penulisan judul gambar dan peletakkan gambar. Gambar harus dilengkapi dengan informasi yang memadai sehingga mudah ditafsirkan tanpa harus membaca isi teks (<i>self-contained</i>).	46

DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN

Lambang Romawi

<i>Lambang</i>	<i>Kuantitas</i>	<i>Satuan</i>
G	laju aliran massa	kg/s
h	entalpi	J/kg
q	fluks kalor	W/m ²

Lambang Yunani

<i>Lambang</i>	<i>Kuantitas</i>	<i>Satuan</i>
ϵ	emisivitas	—
Σ_f	tampang lintang fisi makroskopik	1/cm
Σ_s	tampang lintang fisi hamburan	1/cm

Subskrip

<i>Lambang</i>	<i>Deskripsi</i>
ext	external
in	inlet
out	outlet

Superskrip

<i>Lambang</i>	<i>Deskripsi</i>
F	fuel
j	indeks koordinat

Singkatan

ECCS	Emergency Core Cooling System
HTGR	High Temperature Gas-cooled Reactor
JTF	Jurusan Teknik Fisika
RANS	Reynold-Average Navier-Stokes

RANCANG BANGUN JARINGAN SARAF TIRUAN UNTUK KENDALI LINGKUNGAN TERMAL *CLIMATE CHAMBER*

oleh

Ridhan Fadhilah
15/384859/TK/43521

Diajukan kepada Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika Fakultas Teknik
Universitas Gadjah Mada pada tanggal **20 Januari 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: Jaringan Saraf Tiruan, Kontrol Otomatis, Kontrol Cerdas, Kontrol berbasis Data, Lingkungan Termal, Ruang Iklim, Prediksi Suhu Ruang dan Kelembapan Relatif.

Pembimbing Utama: Faridah, S.T., M.Sc.
Pembimbing Pendamping: Ir. Agus Arif, M.T.

DESIGN AND BUILT OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORK FOR THERMAL ENVIRONMENT CONTROL OF CLIMATE CHAMBER

by

Ridhan Fadhilah
15/384859/TK/43521

Submitted to the Department of Nuclear Engineering and Engineering Physics
Faculty of Engineering Universitas Gadjah Mada on Januari 20, 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: Artificial Neural Network, Control System, Intelligent Control, Data-Driven Control, Thermal Environment, Climate Chamber.

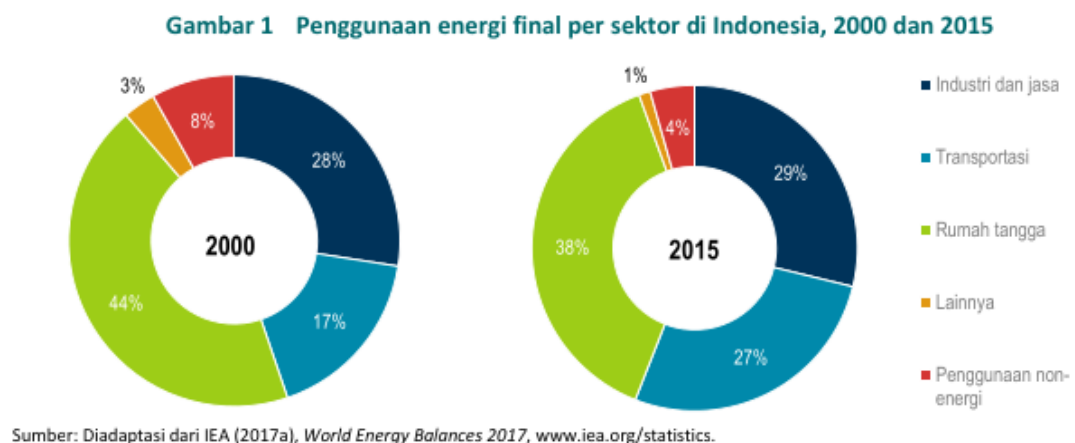
Supervisor: Faridah, S.T., M.Sc.
Co-supervisor: Ir. Agus Arif, M.T.

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.

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 kendali 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 kendali cerdas (*intelligent control system*). Salah satu sistem kendali 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-

gaimana rancang bangun 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 piranti lunak (*software*) kendali 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 untuk mengendalikan lingkungan termal pada *climate chamber* DTNTF UGM.

I.5. Manfaat

Berikut manfaat dari penelitian ini:

1. Penelitian ini diharapkan mampu mengembangkan ilmu pengetahuan dan aplikasinya di bidang fisika bangunan, sistem kendali 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 Mengenai *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], bidang *engineering* [5], bidang biologi [6][7], dan bidang kimia [8]. 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 [5][6][7][8][9], kelembaban udara [8], tekanan [4], ataupun kombinasi dari 2 atau lebih variabel lingkungan termal [8].

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. Dengan kata lain, tuntutan dari penelitian yaitu memastikan nilai variabel lingkungan (suhu dalam kelembaban udara) untuk dapat memenuhi standar SNI dengan nilai standar

suhu udara dijaga pada nilai $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$ dan nilai kelembapan dinyatakan dalam bentuk *relative humidity* (RH), dijaga pada nilai $60\% \pm 10\%$ [10].

Tabel 2.1. Penelitian mengenai *climate chamber*

Peneliti, Tahun	Objek	Variabel kontrol	Fungsi Chamber	Perlakuan Chamber
A. P. Leskinen, dkk. 2007 [4]	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>	Penulis 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.
W. He, dkk. 2014 [5]	Pesawat ulang alik (<i>spacecraft</i>)	Suhu	digunakan sebagai ruang penelitian/pengtesan 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.
A. Huguet, dkk. 2014 [6]	Lumut Sphagnum peat	Suhu	<i>Climate chamber / incubator</i> digunakan sebagai tempat penelitian dan analisa dari perubahan distribusi br GDGT pada lumut	Penulis menginginkan suhu di dalam chamber iklim berada di 12°C dan 15°C.
E. Martinez, dkk. 2016 [7]	Objek biologi, insekta/belalang	Suhu	<i>Walk in style Temperature Controlled Chamber (TCC)</i> digunakan sebagai ruang penelitian dari laju proses-proses metabolisme dari insekta	Penulis 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.
A. Jofreche, dkk. 2018 [8]	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	Penulis menginginkan terjadinya aging pada material post cured VE resin, dengan menggunakan <i>weathering chamber</i> yang di set pada suhu 80°C, kelembaban relatif 90% lalu dilihat pengaruh pada material tersebut pada hari ke 3, 7 dan 14 setelah dimasukkan ke dalam chamber.
A. Srinivasa, dkk. 2019 [9]	Mayat (cadaver)	Suhu	Chamber digunakan sebagai tempat menyimpan sekaligus tempat penelitian mayat yang tersimpan dalam suhu rendah	Penulis menjaga suhu di dalam chamber dijaga pada rentang 2°C - 4°C dengan pengaruh suhu panas di daerah tropis yang kecil.

II.2. Aplikasi Jaringan Saraf Tiruan sebagai Sistem Kendali

Penelitian mengenai aplikasi jaringan saraf tiruan sebagai sistem kendali telah banyak dilakukan oleh peneliti-peneliti sebelumnya. Penelitian yang dilakukan meliputi berbagai tipe bangunan seperti kantor tapak terbuka [11], rumah/tempat tinggal [12][13], bangunan institusi [14], bangunan residensial [15], Stadium [16], dan apartemen [17]. Variabel kontrol dalam sistem kendali merupakan parameter yang mempengaruhi kenyamanan termal. Penelitian-penelitian tersebut dijabarkan secara lebih rinci pada Tabel 2.2.

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 kendali. 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 [11] dan TDNN [15]. Dengan kata lain, penggunaan metode jaringan saraf tiruan untuk sistem kendali 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* (NNARMAX), dan model *neural network-based non-linear output error* (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. 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 kendali HVAC dan dapat digunakan lebih luas pada jenis bangunan lainnya, termasuk rumah sakit, supermarket, bandara, dan sekolah [11].

Pada tahun 2010, Jin Woo Moon dan Jong-Jin Kim melakukan penelitian mengenai model kendali 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 kendali pada variabel suhu (20-23)°C di semua kasus, sedangkan kelembapan (35-60)% hanya memenuhi 98% dari total kasus yang ada [12].

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) [13].

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 ruang 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 ruang dalam ruangan dalam hal akurasi prediksi, kemampuan generalisasi dan waktu iterasi [14].

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 [15].

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 [16].

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 udara, kelembapan relatif, insulasi pakaian, laju metabolisme tubuh, sensasi termal, dan perilaku penghuni. Model memprediksi kisaran suhu udara 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 [17].

Tabel 2.2. Aplikasi Jaringan Saraf Tiruan sebagai Sistem Kendali

Peneliti, Tahun	Tipe Bangunan	Variabel kontrol	Sistem Kendali	Hasil Penelitian
G. Mustafaraj, dkk. 2010 [11]	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.
Jin Woo Moon, dkk. 2010 [12]	Rumah, Amerika	Suhu, kelembapan relatif, dan PMV	ANN	ANN mampu memenuhi tuntutan kendali pada variabel suhu (20-23) $^{\circ}\text{C}$ di semua kasus, sedangkan kelembapan (35-60)% hanya memenuhi 98% dari total kasus yang ada
Jin Woo Moon, dkk. 2016 [13]	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 $^{\circ}\text{C}$). ANN dan ANFIS memiliki nilai galat 1.13 $^{\circ}\text{C}$ (musim dingin) dengan nilai deviasi 1.19 $^{\circ}\text{C}$ untuk ANN (musim panas) dan 1.17 $^{\circ}\text{C}$ untuk ANFIS (musim panas).
Zakia Afroz, dkk. 2017 [14]	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.
Ján Drgoňa, dkk. 2017 [15]	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 orisinal, sementara itu mampu mengurangi kompleksitas solusi secara drastis.
Hyun-Jung Yoon, dkk. 2018 [16]	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.
Zhipeng Deng, dkk. 2018 [17]	Kantor (10) dan rumah/apartemen (10)	Sensasi termal dan perilaku penghuni	ANN	Model memprediksi kisaran suhu udara dengan rentang nilai 20,6 $^{\circ}\text{C}$ (69 $^{\circ}\text{F}$) - 25 $^{\circ}\text{C}$ (77 $^{\circ}\text{F}$) di musim dingin dan 20,6 $^{\circ}\text{C}$ (69 $^{\circ}\text{F}$) - 25,6 $^{\circ}\text{C}$ (78 $^{\circ}\text{F}$) di musim panas. Perilaku penghuni mengevaluasi penerimaan lingkungan dalam ruangan dengan cara yang sama seperti sensasi termal.

BAB III

DASAR TEORI

III.1. Fisika Bangunan

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* [18]. 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 [19]. 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 [19].

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

III.1.2. Kenyamanan Termal

Kenyamanan termal adalah suatu kondisi pikiran yang mengekspresikan kepuasan dengan lingkungan termal, baik secara fisiologis maupun psikologis, dan dinilai dengan evaluasi subyektif oleh penghuni itu sendiri [2]. Kenyamanan termal penting untuk kesehatan dan kebugaran tubuh manusia. Hal tersebut berpengaruh terhadap produktivitas manusia dalam melakukan kegiatan. Kurangnya kenyamanan termal dapat mengakibatkan kondisi stres bagi penghuni bangunan. Apabila kondisi bangunan terlalu panas, maka penghuni akan merasa lelah. Apabila kondisi bangunan terlalu dingin, maka penghuni akan merasa gelisah dan bimbang. Dalam hal sensasi, kenyamanan termal digambarkan sebagai sensasi termal dalam bentuk *too warm* atau *too cold*, yang ditentukan oleh skala tujuh poin sensasi termal berdasarkan ASHRAE

sebagai berikut:

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

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

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 dibatasi hanya untuk sistem fisik saja. Konsep sistem dapat digunakan pada gejala yang abstrak dan dinamis lainnya seperti sistem ekonomi, biologi, organisasi, dan lain se-

bagainya. 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-Ajag

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:

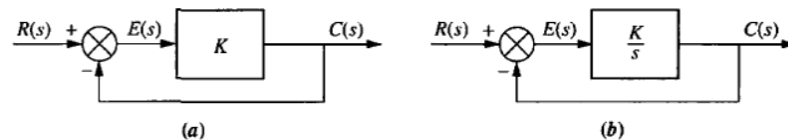
1. Pemodelan sistem
2. Analisis sistem
3. Perancangan kontroler
4. Penerapan kontroler dan pengujian

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 kendali, 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

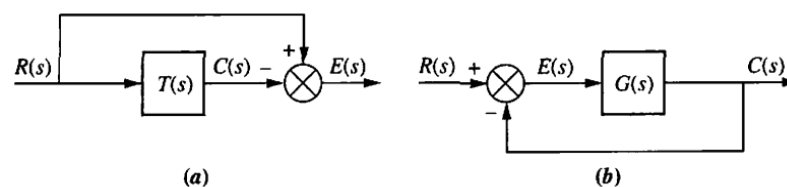
Contohnya, amati Gambar 3.1(a), dimana $R(s)$ adalah input, $C(s)$ adalah output, dan $E(s) = R(s) - C(s)$ adalah error (kesalahan keadaan tunak). Pada keadaan-ajeg, jika $c(t) = r(t)$, maka $e(t)$ bernilai nol. Tetapi dengan adanya *gain* (pengali), K , error tersebut, $e(t)$, tidak dapat bernilai nol jika $c(t)$ bernilai terbatas dan tak nol. Sehingga, keutamaan dari konfigurasi sistem (*gain* murni K pada umpan maju), haruslah memiliki nilai error. Jika kita sebut $c_{steady-state}$ adalah nilai keadaan tunak suatu output dan $e_{steady-state}$ adalah nilai keadaan tunak suatu error, 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 [20].



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

Pertimbangkan Gambar 3.2(a). Untuk menentukan $E(s)$, kesalahan antara

input, $R(s)$, dan output, $C(s)$, ditulis sebagai:

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

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 eror, $e(\infty)$. 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:

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

Pertimbangkan 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:

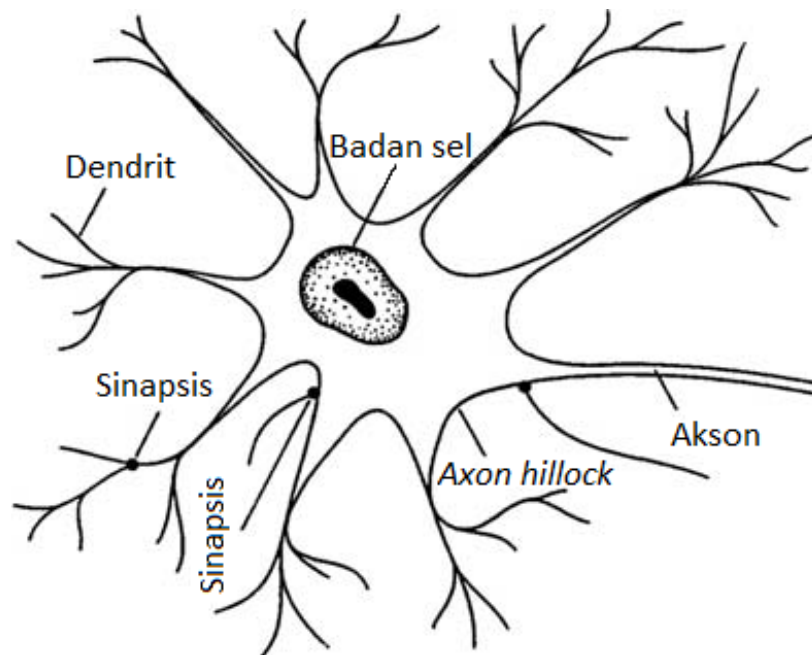
$$E(s) = \frac{R(s)}{1 + G(s)} \quad (3.9)$$

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 memperkalikan setiap sinyal yang masuk dengan koefisien pembobotan pengiriman.

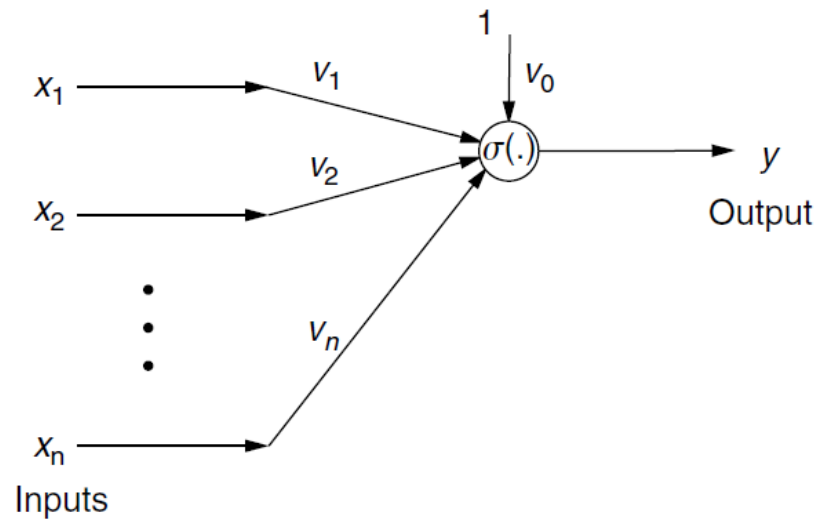


Gambar 3.3. Anatomi neuron

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) [21].

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 nonli-



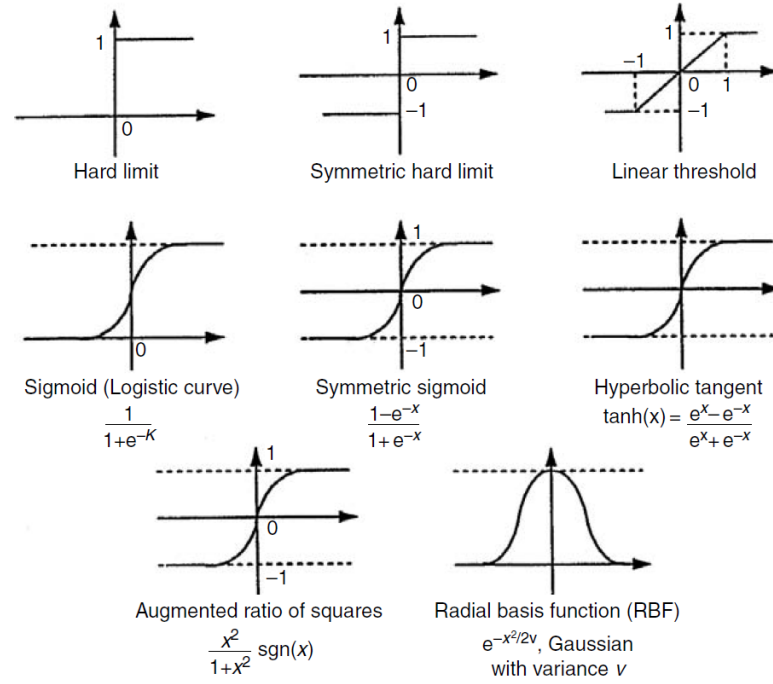
Gambar 3.4. Model matematis neuron.

near $\sigma(\cdot)$. 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 antaran nilai $-\infty$ dan $+\infty$. Perlu dicatat bahwa ketika nilai ambang batas atau bias v_0 berubah, fungsi aktivasi bergeser ke kiri atau ke kanan. Untuk kebanyakan algoritma pelatihan JST



Gambar 3.5. Fungsi-fungsi aktivasi

(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

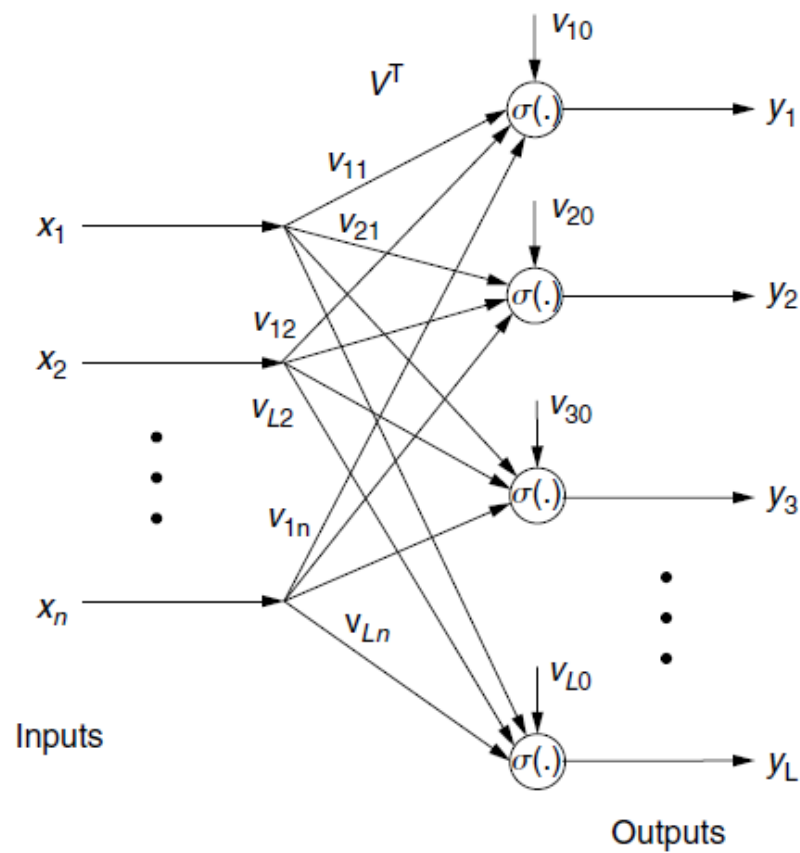
$$y = \sigma(\bar{v}^T \bar{x}) + v_0 \quad (3.13)$$

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

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

bisa juga ditulis sebagai

$$y = \sigma(v^T x) \tag{3.15}$$



Gambar 3.6. Jaringan layer tunggal

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 pena-

rikan 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

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

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

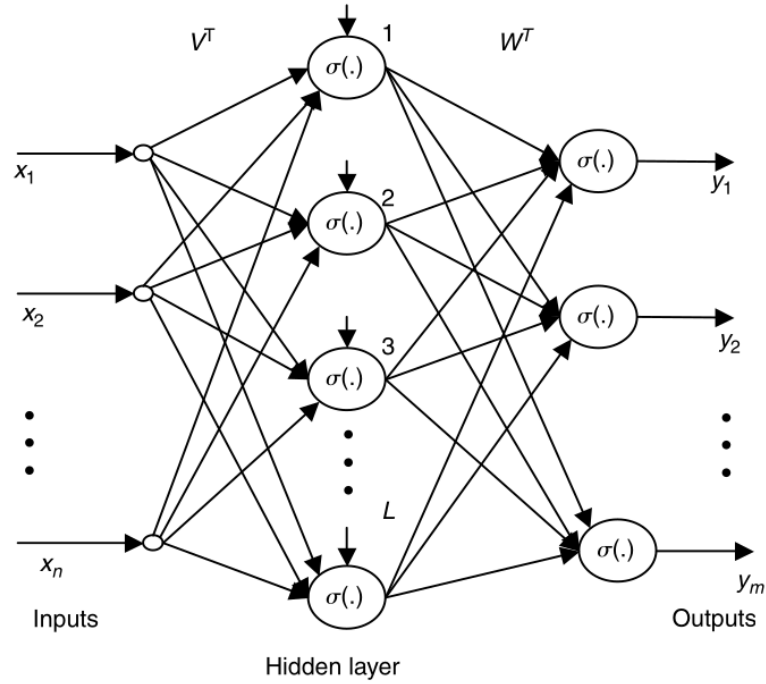
$$V^T \equiv \begin{bmatrix} v_{10} & v_{11} & \cdots & v_{1n} \\ v_{20} & v_{21} & \cdots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{L0} & v_{L1} & \cdots & v_{Ln} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

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 Layar Jamak (MLP)

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



Gambar 3.7. Jaringan 2 layar

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

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

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

sebagai berikut

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

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

Output JST dapat ditulis sebagai berikut

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

atau

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

Pada Persamaan ini, notasi $\overline{\sigma}$ berarti bahwa vektor ditentukan sesuai dengan Persamaan (3.19). Dalam (3.27) perlu menggunakan vektor *augmented*

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

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

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

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

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

III.3.3. Kendali Jaringan Saraf Tiruan

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

Tabel 3.1. Perbandingan metode kendali

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

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 [22].

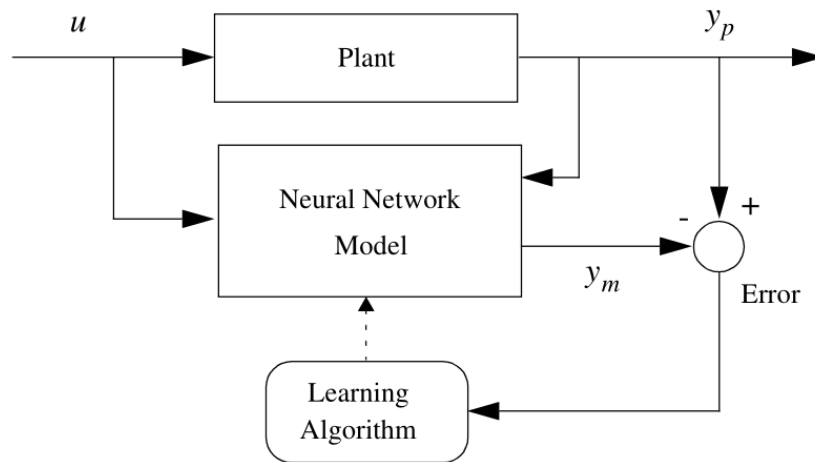
Neural Network Predictive Control

Neural Network Predictive Control menggunakan model JST (*Neural Network*) dari sistem nonlinier *plant* untuk memprediksi kinerja *plant* di masa depan.

Kontroler tersebut kemudian menghitung nilai input kendali yang akan mengoptimisasi kinerja *plant* atas horison waktu yang ditentukan di masa depan. Langkah awal dalam *model predictive control* adalah dengan menentukan model JST *plant* (identifikasi sistem). Kemudian, model *plant* digunakan oleh kontroler untuk memprediksi kinerja di masa depan.

Identifikasi Sistem

Tahap awal dalam membangun *model predictive control* adalah dengan melatih suatu JST yang merepresentasikan dinamika sistem dari suatu *plant*. Nilai galat antara keluaran *plant* dan keluaran JST akan digunakan sebagai sinyal pelatihan JST. Proses tersebut digambarkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8. Identifikasi *Plant*

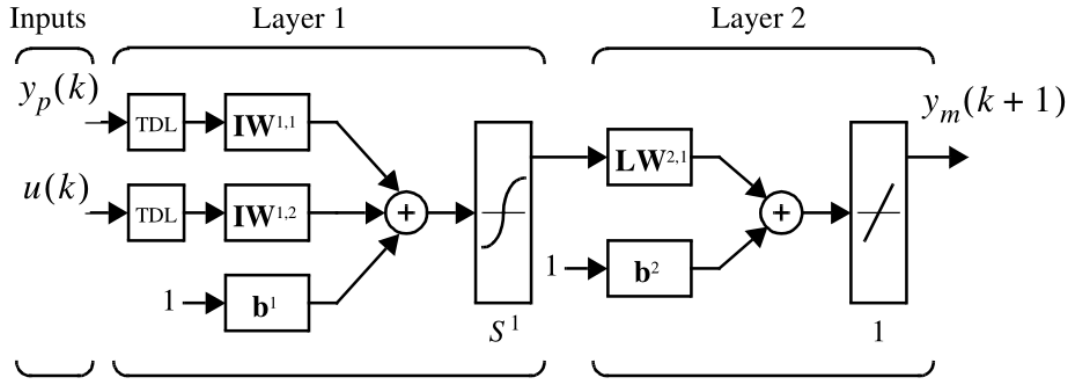
NARMA (*Nonlinear Autoregressive-Moving Average*) digunakan sebagai salah satu model standar untuk identifikasi sistem nonlinier, dengan Persamaan sebagai berikut:

$$y(k+d) = h[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k), u(k-1), \dots, u(k-m+1)] \quad (3.31)$$

dimana $u(k)$ merupakan input sistem, $y(k)$ merupakan output sistem dan d merupakan *delay* sistem. Untuk fase identifikasi sistem, penulis melakukan pelatihan JST untuk aproksimasi fungsi nonlinier h . Struktur model JST *plant* ditunjukkan oleh Gambar 3.9, dimana blok yang berlabel TDL merupakan *tapped delay lines* yang berfungsi untuk memberikan nilai sebelumnya dari sinyal input. Persamaan model *plant* ditunjukkan sebagai berikut:

$$y_m(k+1) = \hat{h}[y_p(k), \dots, y_p(k-n+1), u(k), \dots, u(k-m+1); \mathbf{x}], \quad (3.32)$$

dimana $\hat{h}[\cdot, \mathbf{x}]$ merupakan fungsi implementasi JST, dan \mathbf{x} merupakan vektor yang berisi semua bobot dan bias jaringan.



Gambar 3.9. Model JST *Plant*

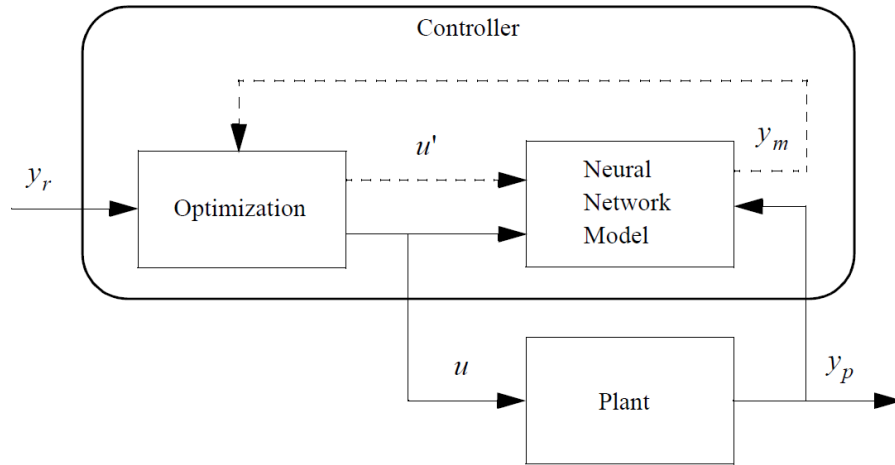
Desain *Predictive Control* menggunakan Optimisasi

Metode *model predictive control* didasarkan pada teknik horison mundur [23]. Model JST memprediksi tanggapan *plant* atas horison waktu yang ditentukan. Hasil prediksi digunakan oleh program optimisasi numerik untuk menentukan sinyal ken-

dali dalam meminimalkan kriteria kinerja berikut atas horison yang ditentukan.

$$J = \sum_{j=N_1}^{N_2} (y_r(k+j) - y_m(k+j))^2 + \rho \sum_{j=1}^{N_u} (u'(k+j-1) - u'(k+j-2))^2 \quad (3.33)$$

dimana N_1 , N_2 dan N_u menentukan horison di mana kesalahan pelacakan dan peningkatan kontrol dievaluasi. Variabel u' merupakan sinyal kendali tentatif, y_r merupakan respons yang diinginkan dan y_m merupakan respon model JST. Nilai ρ menentukan kontribusi yang dimiliki jumlah kuadrat dari kenaikan kontrol pada indeks kinerja.



Gambar 3.10. Diagram Blok NN Predictive Control

Diagram blok diatas mengilustrasikan proses *model predictive control*. Kontroler terdiri dari model JST *plant* dan blok optimisasi. Blok optimisasi menentukan nilai u' yang meminimalkan nilai J , dan kemudian nilai u optimal masuk ke dalam *plant*. Blok optimisasi yang digunakan adalah Algoritma BFGS quasi-Newton, dengan algoritma pencarian *backtracking line search* [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 pada Tabel 4.1, dan Tabel 4.2.

Tabel 4.1. Daftar alat dan bahan

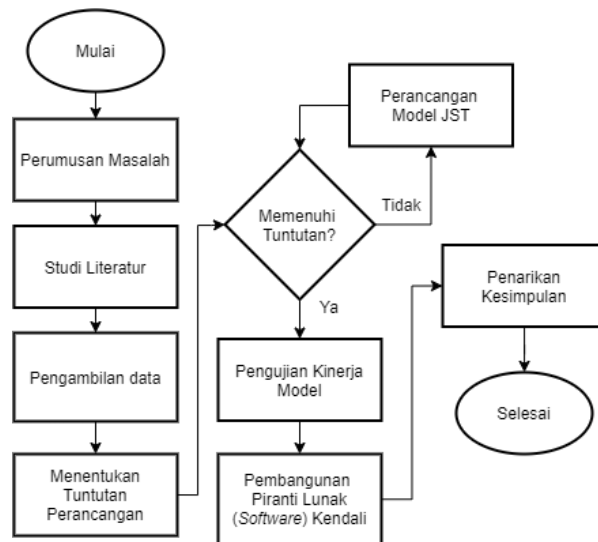
No.	Nama alat/bahan	Fungsi
1	Laptop ASUS N550JX	Perangkat komputer perancangan jaringan saraf tiruan.
2	Python versi 3.7	Bahasa pemrograman.
3	Visual Studio Code versi 1.38	Aplikasi penulisan dan penyuntingan kode sumber.
4	Jupyter Notebook 1.0	Aplikasi web untuk menulis kode program, teks, persamaan, dan visualisasi.
5	Scikit-Learn versi 0.21	Pustaka pembangunan jaringan saraf tiruan.

Tabel 4.2. Spesifikasi laptop ASUS N550JX

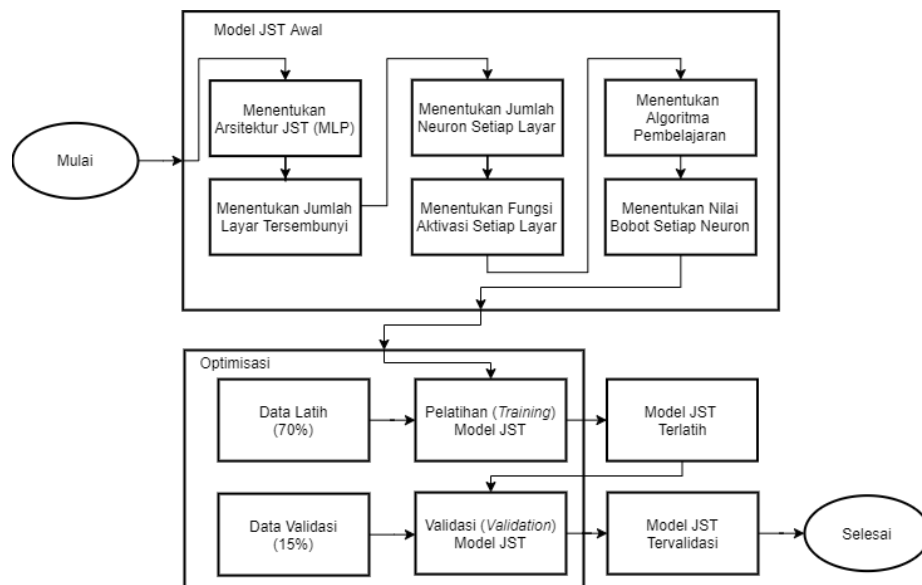
No.	Komponen	Spesifikasi
1	Processor	Intel Core i7-4720HQ CPU @ 2.60GHz x 8
2	Graphics	Intel Haswell Mobile
3	RAM	8 GB
4	Tipe sistem operasi	64-bit
5	Sistem operasi	Manjaro Linux

IV.2. Tata Laksana Penelitian

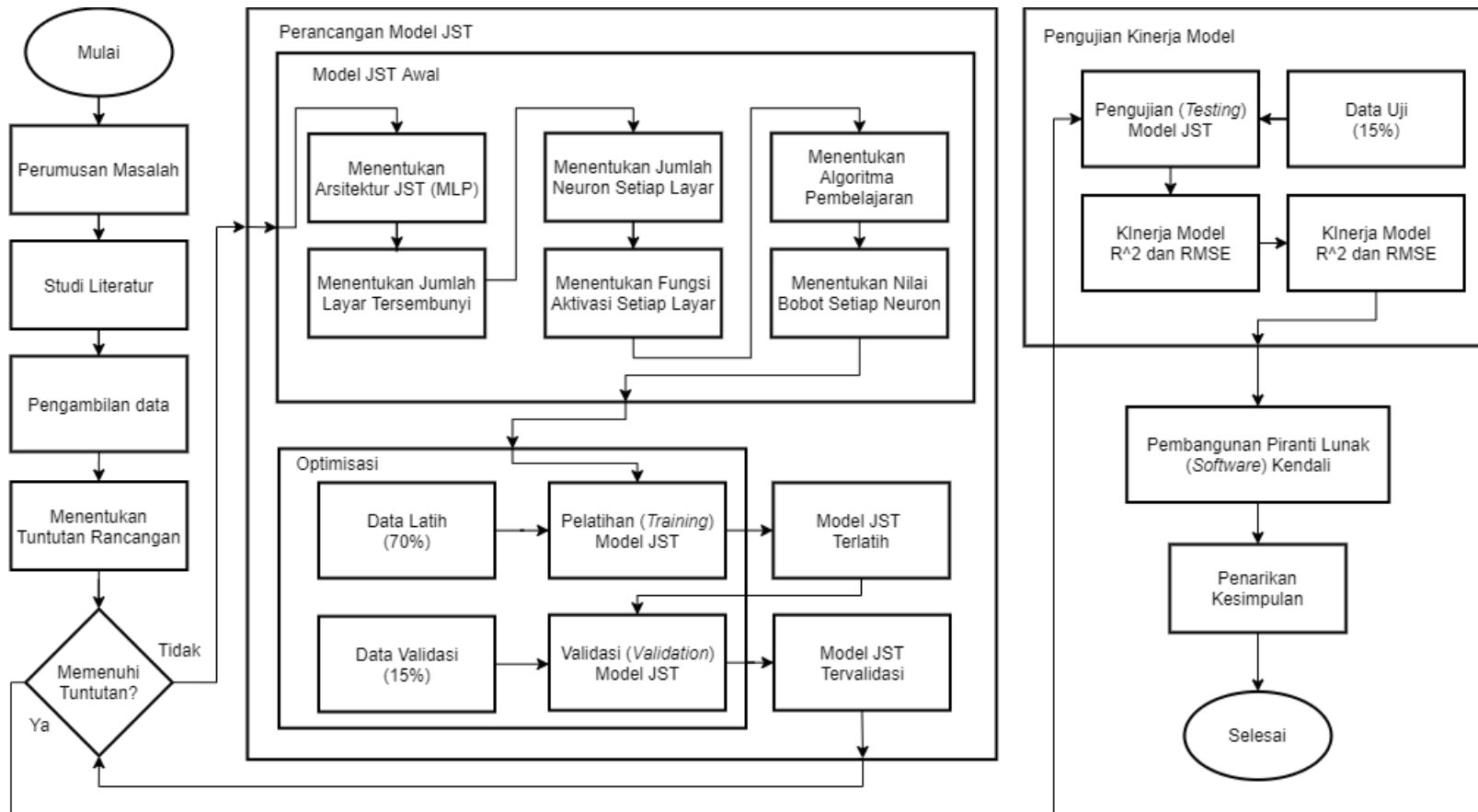
Alur penelitian yang digunakan penulis dalam mencapai tujuan dapat dilihat pada Gambar 4.1, Gambar 4.2, dan Gambar 4.3 berikut.



Gambar 4.1. Diagram Alir Tata Laksana Penelitian



Gambar 4.2. Diagram Alir Perancangan Model JST



Gambar 4.3. Diagram Alir Penelitian Utuh

IV.2.1. Studi Literatur

Studi literatur bertujuan untuk mendapatkan pemahaman dalam penyelesaian masalah yang diangkat dalam penelitian ini. Studi literatur juga membantu menegaskan tujuan penelitian sehingga penulis mampu mengetahui perbedaan penelitian ini dengan penelitian terkait yang telah dilakukan sebelumnya. Dari studi literatur 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 kendali lingkungan termal dan/atau jaringan saraf tiruan.

IV.2.2. Pengambilan Data

Penelitian ini menggunakan data dari model pada penelitian sebelumnya terkait karakterisasi lingkungan termal *climate chamber* yang dilakukan oleh Ichfan Kurniawan. Data tersebut merupakan hasil simulasi pada *software* IES-VE dengan menerapkan beberapa variasi kondisi lingkungan pada model *climate chamber*.

Data yang digunakan adalah data dari model sistem di penelitian sebelumnya terkait **pemodelan lingkungan termal sistem Climate Chamber** menggunakan aplikasi IES-VE. Data yang digunakan tersusun dari beberapa variasi variabel. Variasi tersebut yaitu kondisi batas lingkungan (radiasi matahari dan suhu bola kering luar / *drybulb 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*.

Data yang sudah terkumpul disajikan dalam bentuk tabular yang kemudian diolah dalam program komputer yang dibuat oleh penulis.

IV.2.3. Tuntutan Rancangan

Tuntutan pada rancangan ini merujuk pada standar SNI dengan nilai standar suhu udara dijaga pada nilai $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$ dan nilai kelembapan dinyatakan dalam bentuk *relative humidity* (RH), dijaga pada nilai $60\% \pm 10\%$. Sehingga dapat dikatakan bahwa *setpoint* untuk suhu udara bernilai 25°C dan untuk kelembapan udara (RH) sebesar 60% dengan kesalahan keadaan tunak tidak melebihi 1°C (suhu udara) dan 10% (kelembapan relatif) [10]. Nilai tersebut akan digunakan sebagai acuan untuk menganalisis perbedaan suhu udara dan kelembapan relatif antara aktual dan prediksi.

IV.2.4. Pemodelan Sistem Kendali

Pada langkah ini penulis menjabarkan variabel apa saja yang terlibat dalam *plant* terkait sistem kendali yang akan dibuat. Dalam suatu sistem kendali perlu diketahui variabel apa saja yang termasuk dalam kategori *controlled variables*, *manipulated variables*, dan *disturbance variables*. *Controlled variables* adalah variabel akan dikendalikan dalam suatu sistem kendali. *Manipulated variables* adalah variabel yang akan mempengaruhi nilai *controlled variables* melalui *manipulator/actuator*. Sementara, *disturbance variables* adalah variabel yang mempengaruhi sistem tetapi perancang tidak memiliki kuasa dalam mengatur nilainya. Hasil dari identifikasi sistem berbentuk diagram blok fungsional.

IV.3. Rencana Analisis Hasil Penelitian

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

V.1. Hasil Pengambilan Data

Hasil-hasil yang disajikan bukan data mentah, melainkan data yang telah diolah dengan proses sebagaimana tercantum dalam pasal “Rencana analisis hasil” Bab IV tentang “Pelaksanaan Penelitian”.

V.1.1. Kondisi *Climate Chamber*

V.1.2. Hasil Rancangan Skenario

V.1.3. Hasil Simulasi IES-VE

V.2. Pembangunan Arsitektur JST

Data dibagi menjadi 3 bagian, yakni 70% data pelatihan, 15% data validasi, dan 15% data pengujian. Model JST menggunakan arsitektur *multilayer perceptron* dengan jumlah neuron sebanyak x_1 di lapisan tersembunyi 1, x_2 di lapisan tersembunyi 2, dan x_3 di lapisan tersembunyi 3.

V.3. Analisis Kinerja Arsitektur JST yang terpilih

Persamaan ditulis rata tengah dan nomor persamaan ditulis rata kanan. Nomor persamaan diurutkan dengan format (nomor_bab.nomor_persamaan). Contoh dapat dilihat pada Persamaan (5.1).

$$\frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{uu} \quad (5.1)$$

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

VI.1. Kesimpulan

Kesimpulan merupakan **rekapitulasi atau rangkuman** dari butir-butir pemikiran utama peneliti. Kesimpulan mencerminkan:

1. Variabel kelembapan relatif memang sulit untuk dilakukan. Terutama apabila sistem tidak memiliki manipulator/aktuator yang mampu mengkondisikan nilai kelembapan relatif ruang secara langsung,
2. nilai dari penelitian yang dilakukan (sebagai wujud sumbangan orisinal peneliti), dan
3. pemahaman peneliti tentang apa yang ditulis.

VI.2. Saran

Dalam bagian ini juga bisa disampaikan **evaluasi** terhadap butir-butir pemikiran utama, misalnya terkait dengan kelemahan metode penelitian yang telah digunakan disertai dengan saran-saran untuk penyempurnaan.

1. *Climate chamber* dipasang oleh semacam manipulator/aktuator untuk memanipulasi kelembapan relatif ruang. Contohnya berupa *humidifier*,
2. nilai dari penelitian yang dilakukan (sebagai wujud sumbangan orisinal peneliti), dan
3. pemahaman peneliti tentang apa yang ditulis.

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] 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.
- [5] 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.
- [6] A. Huguet, A. Francez, C. Fosse M. Dung 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] BSN. *SNI 03-6390-2000: Konservasi Energi Sistem Tata Udara pada Bangunan Gedung*. Badan Standardisasi Nasional, 2000.
- [11] G. Mustafaraj, J. Chen dan G. Lowry. "Thermal Behaviour Prediction Utilizing Artificial Neural Networks for an Open Office". *Elsevier Ltd.*, 2010.

- [12] Jin Woo Moon dan Jong-Jin Kim. “ANN-Based Thermal Control Models for Residential Buildings”. *Elsevier Ltd.*, 2010.
- [13] Jin Woo Moon, Sung Kwon Jung, Youngchul Kim dan Seung-Hoon Han. “Comparative Study of Artificial Intelligence-Based Building Thermal Control Methods E Application of Fuzzy, Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, and Artificial Neural Network”. *Elsevier Ltd.*, 2011.
- [14] Zakia Afroz, GM Shafiullah, Tania Urmee dan Gary Higgins. “Prediction of Indoor Temperature in an Institutional Building”. *Elsevier Ltd.*, 2017.
- [15] Ján Drgoňa, Damien Picard, Michal Kvasnica dan Lieve Helsen. “Approximate Model Predictive Building Control via Machine Learning”. *Elsevier Ltd.*, 2018.
- [16] 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.
- [17] Zhipeng Deng dan Qingyan Chen. “Artificial Neural Network Models Using Thermal Sensations and Occupants’ Behavior for Predicting Thermal Comfort”. *Elsevier Ltd.*, 2018.
- [18] Hugo Hens. *Building Physics - Heat, Air and Moisture: Fundamentals and Engineering Methods with Examples and Exercises*. Ernst and Sohn, Berlin, Germany, 2007.
- [19] 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.
- [20] Norman S. Nise. *Control System Engineering*. John Wiley and Sons, Inc., United State of America, 2011.
- [21] Jagannathan Sarangapani. *Neural Network Control of Nonlinear Discrete-Time Systems*. Taylor and Francis Group, LLC, United State of America, 2006.
- [22] 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.
- [23] D. Soloway dan P. J. Haley. “Neural Generalized Predictive Control”. *Proceedings of the 1996 IEEE International Symposium on Intelligent Control*, hal. 277–282, 1996.
- [24] John E. Dennis Jr. dan Robert B. Schnabel. “Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations”. *Journal of the American Statistical Association*, 80:247–248, 1983.

LAMPIRAN

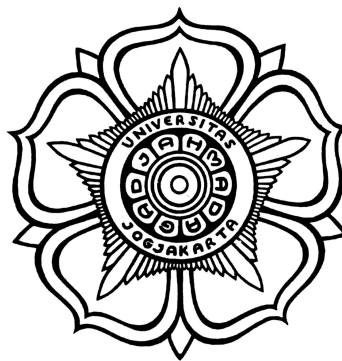
LAMPIRAN A

DATA PENELITIAN

A.1. Data *Climate Chamber*

A.2. Contoh Gambar pada Lampiran

Gambar dan judul gambar diletakkan simetris kiri-kanan. Judul gambar ditulis di bawah gambar. Contoh dapat dilihat pada Gambar A.1.



Gambar A.1. Contoh penulisan judul gambar dan peletakkan gambar. Gambar harus dilengkapi dengan informasi yang memadai sehingga mudah ditafsirkan tanpa harus membaca isi teks (*self-contained*).

A.3. Contoh Penulisan Tabel pada Lampiran

Tabel dan judul tabel diletakkan simetris kiri-kanan. Judul tabel ditulis di atas gambar. Contoh dapat dilihat pada Tabel A.1.

Tabel A.1. Contoh penulisan tabel dan peletakkan tabel.

Header 1	Header 2	Header 3
Isi	Isi	Isi
Isi	Isi	Isi

Jika tabel yang lebarnya melebihi batas pengetikan, tabel diketik memanjang kertas (*landscape*) seperti dicontohkan pada Tabel A.2.

A.4. Contoh Penulisan Persamaan pada Lampiran

Persamaan ditulis rata tengah dan nomor persamaan ditulis rata kanan. Nomor persamaan diurutkan dengan format (nomor_lampiran.nomor_persamaan). Contoh dapat dilihat pada Persamaan (A.1).

$$\frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{uu} \quad (\text{A.1})$$

Tabel A.2. Faktor non-1/ v

$T, ^\circ\text{C}$	Cd	In	Xe-135	Sm-149	U-233		U-235		U-238	Pu-239	
	g_a	g_a	g_a	g_a	g_a	g_f	g_a	g_f	g_a	g_a	g_f
20	1,3203	1,0192	1,1581	1,6170	0,9983	1,0003	0,9780	0,9759	1,0017	1,0723	1,0487
100	1,5990	1,0350	1,2103	1,8874	0,9972	1,0011	0,9610	0,9581	1,0031	1,1611	1,1150
200	1,9631	1,0558	1,2360	2,0903	0,9973	1,0025	0,9457	0,9411	1,0049	1,3388	1,2528
400	2,5589	1,1011	1,1864	2,1854	1,0010	1,0068	0,9294	0,9208	1,0085	1,8905	1,6904
600	2,9031	1,1522	1,0914	2,0852	1,0072	1,0128	0,9229	0,9108	1,0122	2,5321	2,2037
800	3,0455	1,2123	0,9887	1,9246	1,0146	1,0201	0,9182	0,9036	1,0159	3,1006	2,6595
1000	3,0599	1,2915	0,8858	1,7568	1,0226	1,0284	0,9118	0,8956	1,0198	3,5353	3,0079

LAMPIRAN B

LISTING PROGRAM

```
1  program HEAT

3  use f90_kind
4  use physconst
5  use sharevars
6  implicit none

8  ! locals
9  integer :: timestep , i , j , ikmax, jkmax, inner_iter , p, q, modval
10 real(dp) :: start_time , end_time, lambda_g, Nul, Nur, kmax

13 call cpu_time( start_time )
14 call read_input
15 call allocate
16 call init
17 call make_grid

19 call map_nodes

21 if ( restart ) call readdata

23 do timestep=1,No_timesteps
24   do inner_iter =1,No_inner_iter

26     call calc_tau_drag
27     call calc_muturb
28     call calc_mfluxes
29     call calc_xs
30     call calc_weight
31     call calc_alpham
32     call calc_rad
33     call calc_T
34     call calc_rhog
35     call calc_u
36     call calc_v
37     call calc_corr
38     call calc_mfluxes
39     call calc_Pk
40     call calc_Gk
41     call calc_kturb
42     call calc_eps

44   enddo
```

```

46  call relchanges
47  call timecopy
48  time = time + dt

50  modval = mod(timestep, savint)
51  if (modval .eq. 0) then
52    if (nbr2 == 58) then
53      nbr2 = 48
54      nbr1 = nbr1 + 1
55    endif

57    call writeplotmtv
58    call writevarplot
59    call writedata
60    br2 = nbr2+1
61  endif

63  enddo

65  call cpu_time(end_time)
66  print *, '#STATISTICS'
67  print *, '#Runtime:_', end_time—start_time

69  end program HEAT

```

LAMPIRAN C

ABOUT L^AT_EX

C.1. Package yang Diperlukan

Pastikan packages berikut ini telah terinstall pada sistem L^AT_EX Anda.

1. indentfirst
2. setspace
3. times
4. graphicx
5. latexsym
6. supertabular
7. multirow
8. rotating
9. appendix
10. ifthen
11. nomenc1
12. tocloft
13. enumitem
14. caption
15. color
16. listings
17. subfigure
18. url
19. science.sty (scientificpaper)
20. abstract

Sebagian besar dari package tersebut telah terinstall secara default. Apabila ternyata belum terinstall, bisa diunduh dari CTAN.

C.2. File yang diubah isinya oleh penulis

File-file berikut ini diubah oleh penulis sesuai dengan tugas akhir yang dikerjakan

1. `data_skripsi.tex`
berisi data mengenai skripsi, misal judul, nama penguji, nama pembimbing, tanggal ujian, dan sebagainya.
2. `persembahan.tex`
berisi kepada siapa skripsi ini dipersembahkan (*dedicated*). Halaman persembahan boleh tidak ada. Jika demikian, beri comment pada file `muka_skripsi.tex`.
3. `motto.tex`
berisi moto penulis. Halaman moto boleh tidak ada. Jika demikian, beri comment pada file `muka_skripsi.tex`.
4. `prakata.tex`
berisi kata pengantar.
5. `lambang.tex`
berisi input untuk menyusun daftar lambang.
6. `abstrakind.tex`
berisi abstrak dalam bahasa Indonesia.
7. `abstrakeng.tex`
berisi abstrak dalam bahasa Inggris.
8. `Bab1.tex`, `Bab2.tex`, ..., `Bab6.tex`
isi dari masing-masing bab.
9. `app1.tex`, `app2.tex`, ...
isi dari lampiran. Beri comment pada file `skripsi.tex` jika tidak terdapat lampiran.
10. `pustaka.bib`
isi dengan pustaka atau acuan yang digunakan.

C.3. Menghasilkan file PDF

Template ini dibuat secara langsung menggunakan PDF_Latex. Jika Anda menggunakan jalur “biasa”, maka alur yang digunakan adalah:

$$\textit{latex} \longrightarrow \textit{dvips} \longrightarrow \textit{pstopdf}$$

Untuk menghasilkan Daftar Lambang, gunakan perintah berikut:

```
makeindex skripsi.nlo -s nomenclist -o skripsi.nls
```

Jangan lupa untuk me-run latex sekali lagi. Jadi urutan perintahnya adalah

1. latex
2. latex
3. makeindex
4. latex

Jika Anda tidak mengubah Daftar Lambang (dengan mengubah file “lam-bang.tex”), maka perintah `makeindex` tidak perlu dilakukan.