

BAB I

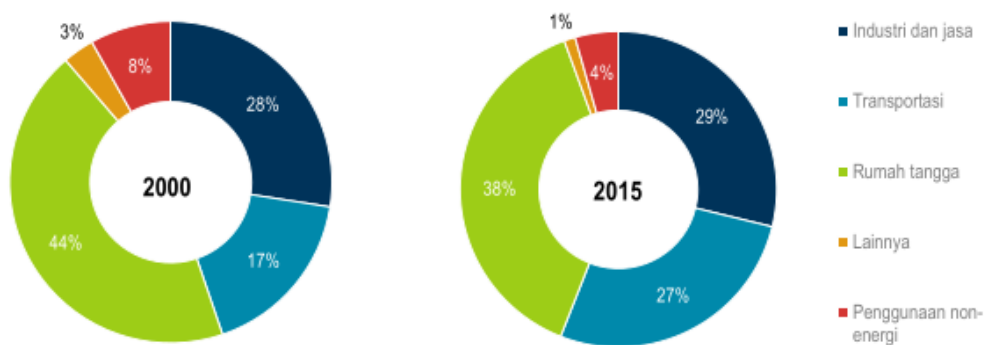
PENDAHULUAN

I.1. Latar Belakang

pernyataan ini
bertaku selama
waktu kapan?

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 ^{peningkatan} kebutuhan energi Indonesia. Pengguna energi terbesar Indonesia tahun 2015 adalah sektor rumah tangga (38%) dan industri dan jasa (29%), diikuti oleh transportasi (27%) (Gambar 1.1). Efisiensi

Gambar 1 Penggunaan energi final per sektor di Indonesia, 2000 dan 2015



Sumber: Diadaptasi dari IEA (2017a), World Energy Balances 2017, www.iea.org/statistics.

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

Harus dan
gambarkan dgn
kode sitasi pd
keterangan gambar

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].

kode
sitasi?

apakah lebih
tepat mema-
hai istilah
'penyejuk'?

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

* Setiap singkatan penting seharusnya disertai kepanjangannya ketika pertama kali disinggung; setelah itu cukup ditulis singkatannya saja

tiga alinea disekitar sini menyinggung istilah "kenyamanan termal,"² namun belum ada satu kalimat yang menyatakan definisi dari istilah ini

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. ^{Dengan demikian} ~~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. ^{oleh karena itu} ~~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

* Pada penelitian ini, ^{dianambil} Penulis mengambil studi kasus ^{diambil} pada *climate chamber* di Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika (DTNTF) ^{Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada (FT-UGM)} 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-

* Untuk menjaga keobjektifan tulisan ilmiah, hindari penyebutan 'penulis' atau 'peneliti' dengan menggunakan bentuk kalimat pasif

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.
 → Judul skripsi ini menyatakan "Sistem Kontrol", mengapa di sini dibatasi pada pengontrol saja tanpa sensor & aktuator?
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*).
 ↑ bukan alasan yg ilmiah, cari alasan lain yg tepat
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.
 } bukan batasan karena JST adalah metode yg dipilih
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 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 divangkum? ringkas? dijabarkan secara lebih rinci pada Tabel 2.1. ← *Jabarkan dulu baru dirangkum*

Variabel lingkungan termal yang mempengaruhi objek penelitian ^{*adalah*} 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 error yang masih dapat diterima, namun de- *pemotongan yg salah* ngan 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 $\pm 2,7^{\circ}\text{C}$.

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/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 mendapatkan 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 (TCC)</i> 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. Jofreche, 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 <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.
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°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°C Td (<i>Dry Bulb Temperature</i>)

Mengapa tinjauan pada II.1 langsung menampilkan rangkuman (tanpa penjabaran yg rinci), sementara tinjauan pada II.2 di dahului dengan penjabaran rinci, baru diakhiri dgn tabel rangkuman? 10

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 dirangkum dengan ringkas 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* (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 panas summer, gugur autumn, dan dingin 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 penyimpangan sebesar 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

* Lavenberg-Marquardt telah menemukan suatu algoritma (baru)
atau algoritmanya bernama algoritma Lavenberg-Marquardt?

12

• rumah bertingkat enam atau rumah bertingkat dengan 6 ruang?

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, Lavenberg-Marquardt telah menemukan algoritma* pelatihan yang paling cocok untuk memprediksi suhu ruang ~~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^{apa?} 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. **Ba-**ngunan 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].

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 stadium	Suhu udara ruang, suhu radiasi 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	-

Pada linea disini seharusnya di tulis kan perbedaan penelitian ini dengan penelitian² yg sudah dijabarkan dan dirangkum diatas

BAB III

DASAR TEORI

III.1. Fisika Bangunan

Terdapat beberapa definisi mengenai fisika bangunan. ^{oleh karena} ~~Maka dari itu, penu-~~
~~lis mencoba untuk meng-~~ ^{di-}ambil 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 (ro-*
ofs, facades, windows, partition walls, etc.), room, building and building assemblies ^{Di sisi} [20]. ^f 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 ^{Di sisi} 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 sisi} ini 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 ^{kalang}lup terbuka dan sistem kontrol ^{kalang}lup tertutup. Sistem kontrol lup terbuka adalah sistem kontrol yang keluarannya tidak berpengaruh pada aksi kontrol. Pada sistem ini keluaran tidak dibandingkan dengan *setpoint*. ^{Dengan demikian} 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 ^{mampu}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, ^{terbuka}sehingga, jika dibandingkan dengan sistem kontrol lup ^{tertutup}tertutup, sangat mungkin diperoleh sistem kontrol yang lebih teliti meskipun menggunakan komponen-komponen yang relatif kurang teliti. [..] ^{kada sitasi?}

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 ~~ak-~~an 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 ^{dapat}~~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 ^{dapat}~~bisa~~ juga menyebabkan kerusakan fisik pada peralatan yang dikendalikan. [...]

Pada penulisan ilmiah, istilah 'bisa' berarti racun ular

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, ^{mungkin}~~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).

bagian-bagian
kalimat yg tidak
berkesinambungan ?

Proses Pengendalian

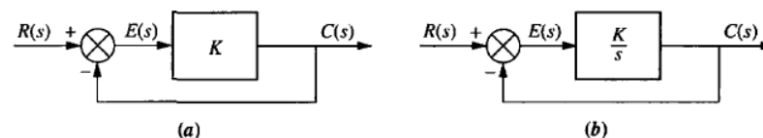
Proses ~~P~~^Pengendalian merupakan tugas seorang insinyur kontrol untuk menganalisis sistem yang ada, dan merancang sistem baru untuk memenuhi kebutuhan spesifik. Terkadang sistem baru perlu dirancang, tetapi suatu unit kontroler lebih sering dirancang untuk meningkatkan kinerja sistem yang ada. Ketika 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 *→ sebelumnya sudah ada sub-bab Respon Keadaan Ajeg apa bedanya?*

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. *Dengan demikian* 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. *Alhasil* Sehingga, peneliti mengasumsikan bahwa semua sistem dalam contoh dan masalah dalam bab ini merupakan sistem yang stabil. *Apakah uraian dasar? kesalahan ajeg relevan utk Bab IV dan V?*

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 eror (kesalahan keadaan tunak). Pada keadaan-ajeg, jika $c(t) = r(t)$, maka $e(t)$ bernilai nol. Tetapi dengan adanya gain (pengali), K , eror 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

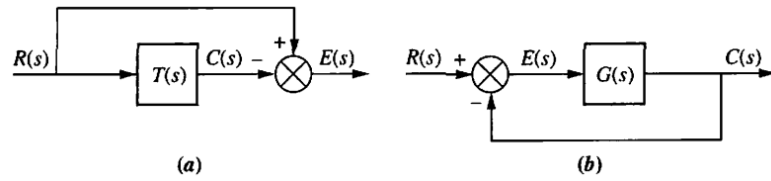
$$e_{steady-state} = \frac{1}{K} c_{steady-state} \quad (3.1)$$

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:

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

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:

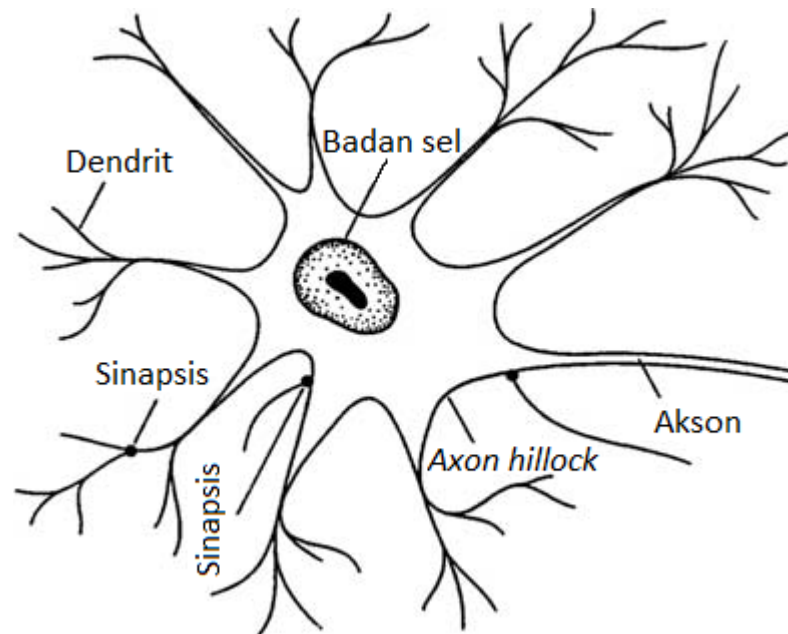
$$e(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{1 + G(s)} \quad (3.10)$$

Periksa lagi: apakah uraian panjang-lebar tentang $e(\infty)$ memang dibutuhkan pd Bab III dan Bab II?

III.3. Jaringan Saraf Tiruan

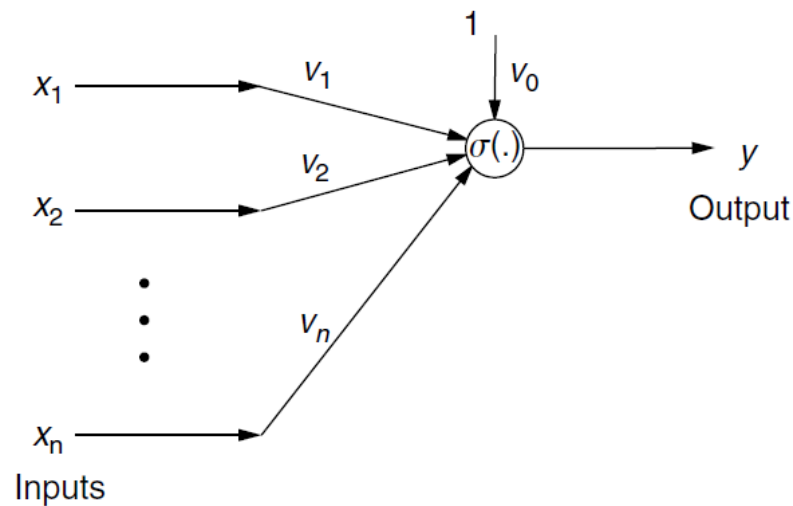
Jaringan Saraf Tiruan (JST) dimodelkan dari proses biologis untuk pemrosesan informasi, termasuk secara khusus sistem saraf dan unit dasarnya, neuron (sel saraf). Sinyal didistribusikan dalam bentuk beda potensial antara bagian dalam dan luar sel. Komponen sel saraf (neuron) ditunjukkan pada Gambar 3.3. 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 ^{pengaktifan} penembakan neuron berikutnya) atau *inhibitory* (kecenderungan dalam ^{pengaktifan} mencegah ^{penembakan} neuron berikutnya) [23].



Gambar 3.4. Model matematis neuron.

III.3.1. Model Matematis Neuron

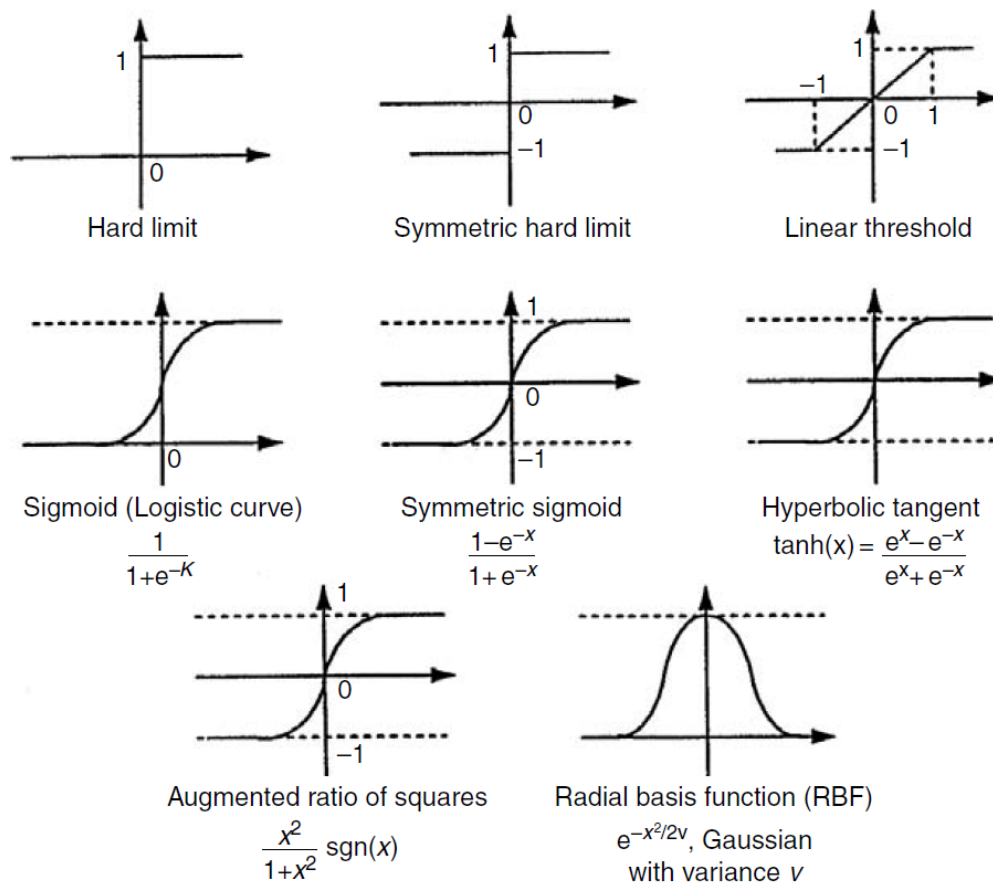
Model matematis dari suatu neuron dilukiskan oleh Gambar 3.4, yang mana menunjukkan pembobotan dendrit v_j , nilai ambang batas ~~penembakan~~ v_0 (disebut juga sebagai bias), penjumlahan dari sinyal masuk yang diberi bobot/ dan fungsi nonlinear $\sigma(\cdot)$. Sel input adalah sinyal ke- n pada waktu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

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

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). *tulis ini sebagai kode citasi [...]*

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 di bawah nilai tertentu suatu

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



Gambar 3.5. Fungsi-fungsi aktivasi

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

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

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

apa?

✓ 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

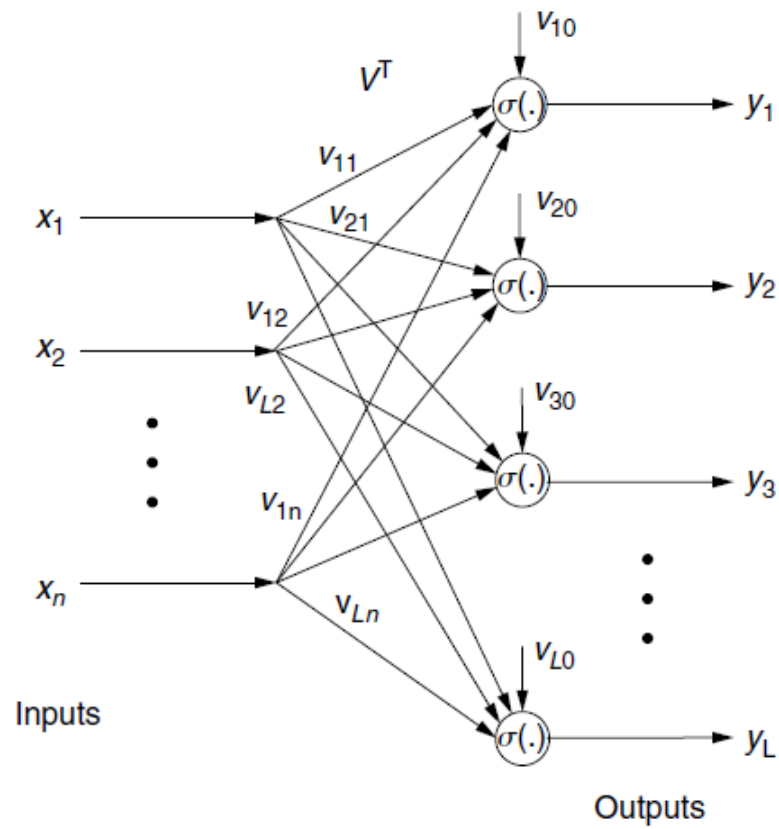
$$y = \sigma(v^T x) \quad (3.15)$$

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~~ ^{Siapa?} 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

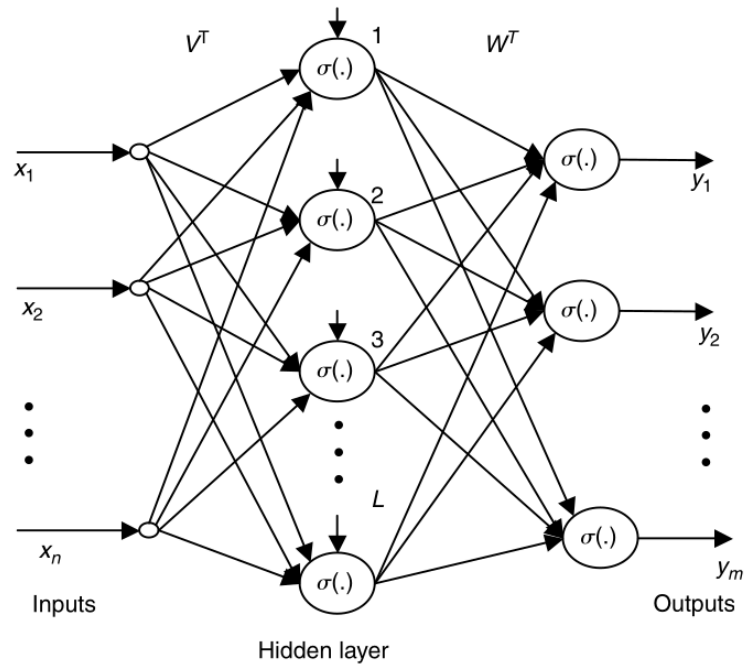
$$V^T \equiv \begin{bmatrix} v_{10} & v_{11} & \cdots & v_{1n} \\ v_{20} & v_{21} & \cdots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{L0} & v_{L1} & \cdots & v_{Ln} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

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 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),



Gambar 3.7. Jaringan 2 layer

yang merupakan masalah dasar dalam perancangan sistem logika digital. Kemudian telah ditunjukkan bahwa jaringan 2 layer dapat menerapkan operasi EXCLUSIVE OR (X-OR) dan ini kembali mempercepat penelitian JST di awal 1980-an. Beberapa peneliti (Hush dan Horne 1993) mempresentasikan solusi untuk operasi X-OR dengan menggunakan fungsi aktivasi sigmoid.

Output jaringan 2 layer ditunjukkan oleh Persamaan *recall* berikut

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

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~~ ^{Dengan demikian}, 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
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

Sebaiknya disini dituliskan uraian yg menjelaskan Tabel 3.1

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].

Uraian sub bab ini belum lengkap dan belum sampai pada sistem kontrol JTS
Apakah sistem kontrol JTS termasuk sistem kontrol modern?