



TUGAS AKHIR - TF 181801

PEMODELAN *GAS TURBINE GENERATOR* BERBASIS JARINGAN SARAF TIRUAN

I GUSTI AGUNG KRISNA MANGGALA PUTRA
NRP. 0231154000107

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020



TUGAS AKHIR - TF 181801

PEMODELAN *GAS TURBINE GENERATOR* BERBASIS JARINGAN SARAF TIRUAN

I Gusti Agung Krisna Manggala Putra
NRP. 0231154000107

Dosen Pembimbing :
Dr.Ir. Totok Soehartanto, DEA

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020



Final Project - TF181801

MODELING OF GAS TURBINE GENERATORS BASED ON ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

I Gusti Agung Krisna Manggala Putra
NRP. 02311540000107

Supervisors:
Dr.Ir. Totok Soehartanto, DEA

DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2020

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : I Gusti Agung Krisna Manggala Putra
NRP : 02311540000107
Departemen/ Prodi : Teknik Fisika/ S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri dan Rek. Sistem
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "Pemodelan *Gas Turbine Generator* berbasis Jaringan Saraf Tiruan" adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 23 Januari 2020
Yang membuat pernyataan,



I Gusti Agung Krisna Manggala Putra
NRP. 02311540000107

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

PEMODELAN GAS TURBINE GENERATOR BERBASIS
JARINGAN SARAF TIRUAN

Oleh:

I Gusti Agung Krisna Manggala Putra
NRP. 0231154000107

Surabaya, 23 Januari 2020
Menyetujui,
Pembimbing

Dr. Ir. Totok Sochartanto, DEA
NIPN. 19650309 199002 1 001

Mengetahui,
Departemen
Teknik Fisika FT-ITS



Dr. Sdyanto ST., MT.
NIPN. 19711113 199512 1 002

vii

LEMBAR PENGESAHAN

LEMBAR PENGESAHAN
PEMODELAN GAS TURBINE GENERATOR BERBASIS
JARINGAN SARAF TIRUAN

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

I Gusti Agung Krisna Manggala Putra
NRP. 0231154000090

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA (Pembimbing)
2. Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, MT (Ketua Penguji)
3. Hendra Cordova, ST, MT (Penguji 2)
4. Lizda Johar Mawarani, ST, MT (Penguji 3)
5. Moh. Kamalul Wafi, ST, M.Sc., DIC (Penguji 4)

SURABAYA
23 Januari 2020

PEMODELAN GAS TURBINE GENERATOR BERBASIS JARINGAN SARAF TIRUAN

Nama Mahasiswa : I Gusti Agung Krisna Manggala Putra
NRP : 0231154000107
Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : 1. Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA

ABSTRAK

Gas turbine generator adalah suatu turbin yang dapat merubah energi kalor menjadi energi mekanis. GTG memiliki 3 bagian penting yakni kompresor, ruang bakar, dan turbin. Ketiga bagian ini memiliki variabel input dan output dimana dinamika proses ini sulit dimodelkan dengan menggunakan hukum fisika. Maka dari itu pasangan data yang diambil dari *track record* GTG ini dimodelkan dengan menggunakan jaringan saraf tiruan (JST). Masing-masing bagian GTG memiliki struktur JST tersendiri dimana JST dalam kasus ini menganalisa pola dari pasangan input dan output. Struktur JST dibangun dengan membagi data input dan output ke dalam data training dan validasi. Training dilakukan pada JST untuk mengenali pola input dan output, kemudian validasi dilakukan untuk membuktikan bahwa JST dapat memodelkan dinamika yang terjadi pada output setiap bagian GTG jika terjadi perubahan input. Kinerja dari JST ini dievaluasi berdasarkan nilai RMSE. Pada penelitian ini variabel untuk kompresor yaitu *inlet temperature* dan *pressure*, *inlet guide vane*, *PCD*, sementara pada ruang bakar yaitu *fuel flow rate*, *fuel pressure*, *cc outlet temperature*, kemudian pada turbin yakni *temperature inlet turbine*, *lube pressure*, *bearing temperature*, dan *power output* (beban). Hasil simulasi menunjukkan bahwa untuk *compressor* berada pada struktur JST 3-14-1 (input-hidden node-output) dengan nilai RMSE 0.01854, pada *combustion chamber* didapatkan struktur JST 3-3-1 dengan nilai RMSE 0.03126 dan pada section *turbine* dengan struktur 3-2-1 dengan nilai RMSE 0.0583.

Kata kunci: *gas turbine generator*, jaringan saraf tiruan (JST), *root mean square error*

MODELING OF GAS TURBINE GENERATORS BASED ON ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Name : *I Gusti Agung Krisna Manggala Putra*
NRP : *0231154000107*
Department : *Engineering Physics*
Supervisors : *I. Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA*

ABSTRACT

Gas turbine generator is a turbine that can convert heat energy into mechanical energy. GTG has 3 important parts namely compressor, combustion chamber, and turbine. These three parts have input and output variables where the dynamics of this process are difficult to model using the laws of physics. Therefore the pair of data taken from the GTG track record is modeled using an artificial neural network (ANN). Each of these sections has its own ANN structure, where ANN, in this case, analyzes the pattern of input and output pairs. This structure is built by dividing input and output data into training and validation data. Training is conducted at ANN to recognize input and output patterns. Validation is carried out to prove that ANN can model the dynamics that occur in the output of each GTG section if input changes occur. This ANN performance is evaluated based on the RMSE value. In this study, the variables found for the compressor are inlet temperature and pressure, inlet guide vane, PCD, while in the combustion chamber are fuel flow rate, fuel pressure, cc outlet temperature, then in the turbine namely turbine inlet temperature, lube pressure, bearing temperature, and power output. The simulation results show that the compressor is in the ANN structure 3-14-1 (input-hidden node \rightarrow output) with an RMSE value of 0.01854, the combustion chamber obtained ANN structure 3-3-1 with an RMSE value of 0.03126 and in the turbine section with a structure 3-2-1 with an RMSE value of 0.0583.

Keywords: gas turbine generator, artificial neural networks, root mean square error

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas karunia, dan nikmatNya sehingga penulis diberikan kesehatan dan kelancaran dalam menyelesaikan tugas akhir dengan judul:

PEMODELAN GAS TURBINE GENERATOR BERBASIS JARINGAN SARAF TIRUAN

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini tidak mungkin terwujud tanpa bantuan dari berbagai pihak. Penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Dr. Suyanto, ST, MT selaku Kepala Departemen Teknik Fisika ITS dan segenap bapak/ibu dosen pengajar di Departemen Teknik Fisika - ITS.
2. Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktunya membimbing, memberikan dukungan, motivasi, dan saran selama pengerjaan tugas akhir penulis.
3. Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, MT, Hendra Cordova, ST, MT, Lizda Johar ST, MT, Moh. Kamalul Wafi, ST, M.Sc., DIC selaku penguji pada sidang tugas akhir ini serta telah memberikan saran terhadap tugas akhir penulis.
4. Keluarga penulis yang selalu memberikan dukungan, motivasi, dan do'a dalam kondisi apapun selama mengerjakan tugas akhir penulis.
5. Pak Kusnadi, selaku pembimbing lapangan PT. SIPL yang senantiasa memberikan pengetahuan seputar gas turbin dan membantu banyak dalam proses pengerjaan tugas akhir ini
6. Anak Agung Yuka Taurusia Eny, S.H yang selalu memberi dukungan dimanapun kapanpun dan setia menemani mengerjakan tugas akhir ini.

7. Rifki Zulkifli selaku partner dalam pengerjaan tugas akhir ini sehingga beban tugas ini dapat sedikit berkurang

Semoga Tuhan Yang Maha Esa senantiasa membalas segala amal dan kebaikan pihak-pihak tersebut. Penulis juga menyadari bahwa pada tugas akhir ini masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, segala kritik dan saran yang membangun akan diterima dengan senang hati. Semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat dan berguna bagi penulis, para pembaca, dan pihak-pihak yang membutuhkan.

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME	v
LEMBAR PENGESAHAN.....	vii
ABSTRAK	x
ABSTRACT	xii
KATA PENGANTAR.....	xiv
DAFTAR ISI.....	xvi
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 <i>Gas Turbine Generator</i>	5
2.2 Blok Diagram GTG	9
2.3 Hubungan Input dan Output sistem GTG.....	11
2.4 Jaringan Saraf Tiruan	15
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1 Identifikasi Variabel pada GTG	22
3.2 Pemrosesan Awal Data Operasional pada GTG.....	23
3.3 Persiapan Data untuk Training dan Validasi	31
3.4 Pemodelan GTG berbasis JST	32
3.5 Validasi Pemodelan JST	35
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	37
4.1 Pengujian Struktur JST Hasil Training.....	37
4.2 Hasil Validasi	42
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	51
5.1 Kesimpulan.....	51
5.2 Saran.....	51
DAFTAR PUSTAKA.....	53

LAMPIRAN	57
LAMPIRAN A. HASIL PEMBAGIAN DATA LATIH.....	57
LAMPIRAN B. HASIL PEMBAGIAN DATA VALIDASI	65
LAMPIRAN C. PROGRAM LATIH JST <i>MATLAB</i>	73
LAMPIRAN D. PROGRAM VALIDASI JST <i>MATLAB</i>	77
LAMPIRAN E. HASIL LATIH <i>MATLAB</i>	79
LAMPIRAN F. HASIL VALIDASI <i>MATLAB</i>	91
BIOGRAFI PENULIS	101

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema <i>gas turbine generator</i>	5
Gambar 2.2 Skema Kompresor	6
Gambar 2.3 Ruang Pembakaran	7
Gambar 2.4 Variabel Turbin	8
Gambar 2.5 Blok diagram GTG.....	10
Gambar 2.6 Hubungan laju udara terkompresi terhadap IGV	11
Gambar 2.7 Hubungan <i>turbine inlet temperature</i> terhadap beban	14
Gambar 2.8 JST backpropagation	16
Gambar 2.9 Fungsi transfer tansig	18
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.....	21
Gambar 3.2 Diagram blok kompresor.....	23
Gambar 3.3 Data <i>air inlet temperature</i>	24
Gambar 3.4 Data <i>air inlet pressure</i>	25
Gambar 3.5 Data variabel IGV	25
Gambar 3.6 Data variabel PCD	26
Gambar 3.7 Diagram blok ruang bakar.....	26
Gambar 3.8 Data variabel <i>CC fuel flow rate</i>	27
Gambar 3.9 Data <i>variabel CC fuel pressure</i>	28
Gambar 3.10 Data <i>variabel CC outlet temperature</i>	28
Gambar 3.11 Diagram blok turbin	28
Gambar 3.12 <i>Data input turbine inlet temperature</i>	29
Gambar 3.13 <i>Data input turbine lube pressure</i>	29
Gambar 3.14 <i>Data input turbine bearing temperature</i>	30
Gambar 3.15 Data variabel beban keluaran	31
Gambar 3.16 Diagram alir program pelatihan JST	33
Gambar 3.17 Diagram alir program pelatihan JST (lanjutan).....	34
Gambar 3.18 Diagram alir program validasi JST	35
Gambar 4.1 Grafik hubungan keluaran JST terhadap target pada kompresor.....	38
Gambar 4.2 Grafik hubungan keluaran JST terhadap target pada ruang bakar.....	40
Gambar 4.3 Grafik hubungan keluaran JST terhadap target pada turbin	41

Gambar 4.4 Hasil validasi JST pada kompresor	43
Gambar 4.5 Hasil validasi model JST pada CC.....	44
Gambar 4.6 Grafik hubungan keluaran JST terhadap target pada validasi turbin	46
Gambar 4.7 Grafik uji JST terhadap input pada kompresor	47
Gambar 4.8 Grafik uji JST terhadap input pada ruang bakar	48
Gambar 4.9 Grafik uji JST terhadap input pada turbin.....	49

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 <i>Range operational</i> variabel GTG.....	22
Tabel 3.2 <i>Range operational</i> variabel GTG (lanjutan).....	23
Tabel 3.3 Parameter Model JST.....	32
Tabel 3.4 Parameter Model JST (lanjutan)	33
Tabel 4.1 Hasil uji training struktur JST pada kompresor	38
Tabel 4.2 Hasil uji training struktur JST pada ruang bakar	39
Tabel 4.3 Hasil uji training struktur JST pada turbin.....	40
Tabel 4.4 Hasil Validasi <i>section</i> kompresor	42
Tabel 4.5 Hasil validasi <i>section</i> ruang bakar	44
Tabel 4.6 Hasil Validasi <i>section</i> turbin.....	45

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Gas turbine generator (GTG) adalah suatu turbin yang memanfaatkan kalor hasil pembakaran dari gas dengan udara bertekanan untuk merubah energi kalor menjadi energi mekanis [1]. Energi mekanis yang dihasilkan ini dapat digunakan untuk menggerakkan beberapa peralatan yang berputar sehingga bisa menghasilkan daya listrik [1]. GTG memiliki 3 bagian utama yaitu kompresor untuk kompresi udara, ruang bakar berfungsi untuk meningkatkan temperatur dari udara bertekanan, dan turbin yang berfungsi untuk proses ekspansi gas hasil pembakaran di ruang bakar [2].

Selama beberapa tahun terakhir, banyak kegiatan yang telah dilakukan terutama di bidang pemodelan dan simulasi GTG. Pemodelan dan simulasi ini dilakukan karena kebutuhan dan penggunaan GTG menjadi lebih jelas dalam industri modern. Membuat model GTG dan sistem kontrolnya yang terkait telah menjadi strategi teknis dan penghematan biaya yang berguna untuk optimalisasi kinerja peralatan sebelum proses desain akhir dan manufaktur. Model dan simulator GTG dapat digunakan untuk prediksi kinerja *equipment*, evaluasi emisi, dan sistem kontrol mesin [2]. Pemodelan matematika dianggap sebagai metodologi umum untuk pemodelan sistem. Banyak pemodelan dalam hal untuk mendiagnosa permasalahan dalam gas turbin, seperti diagnosa dan monitoring dari kondisi operasi steam-turbin blades [3]. Penelitian ini menunjukkan diagnosa dan monitoring daripada sudu-sudu putaran turbin menggunakan metode *discrete-phase*. Penelitian lain juga menunjukkan diagnosis kegagalan gas turbin yang dianalisis melalui kecepatan getaran berdasarkan jaringan saraf tiruan (JST) [4], akan tetapi analisa yang dilakukan terhadap kecepatan getaran kurang akurat karena banyak faktor yang mempengaruhi diagnosis kegagalan gas turbin.

Proses yang terjadi cukup sulit untuk dimodelkan dengan hukum fisika yang ada, maka dari itu pemodelan GTG ini akan dilakukan dengan jaringan saraf tiruan (JST). Variabel tiap *section* GTG bisa didapatkan di *control room* untuk selanjutnya dimodelkan dengan JST. Variabel ini dapat dilihat pada *track record data operational* dari masing-masing subsistem saat overhaul untuk dianalisa dengan maksud mengetahui kinerja kondisi operasional menggunakan JST berdasarkan *input* yang diberikan. Variabel ini juga menjadi pasangan data *input* dan *output* tiap *section* pada GTG yang nantinya akan diproses untuk memisahkan data variabel tersebut menjadi data training dan data validasi. Namun, sebelum itu data ini perlu dilakukan analisa bagaimana korelasi dari setiap input dan output tiap *section* [5].

Kompresor, ruang bakar, dan turbin memiliki kapasitas sebagai subsistem yang besar dan penting. Subsistem ini memiliki variabel yang mempengaruhi performa dan nilai efisiensi dari daya yang dihasilkan. Ketika variabel terkait mengalami ketidaksatabilan, maka performa dan efisiensi akan terpengaruh [6]. Kemampuan JST dalam memahami dinamika proses ini diharapkan dapat menjadi masukan bagi teknisi dan operator dengan maksud untuk menjaga stabilitas operasional GTG, dengan menggunakan *nntool* sebagai *toolbox* yang digunakan pada *Matlab* yang khusus digunakan untuk membuat struktur JST pada pemodelan kondisi operasi GTG. Output dari tugas akhir ini adalah struktur model pada *Matlab* yang mampu menghasilkan kondisi keluaran pada tiap *section* GTG.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan dalam penelitian tugas akhir ini adalah:

- a. Bagaimana cara mengidentifikasi variabel pada tiap bagian GTG?
- b. Bagaimana cara menganalisa variabel tiap bagian GTG untuk mendapatkan hubungan *input* dan *output*?
- c. Bagaimana cara memodelkan GTG dalam bentuk jaringan saraf tiruan?

1.3 Tujuan

Berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah, maka tujuan penelitian yang akan dicapai dalam pelaksanaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

- a. Mengidentifikasi variabel pada tiap bagian GTG.
- b. Menganalisa variabel pada tiap bagian GTG untuk mendapatkan hubungan *input* dan *output*.
- c. Menyusun model GTG dalam bentuk jaringan saraf tiruan.

1.4 Batasan Masalah

Lingkup dari tugas akhir ini adalah:

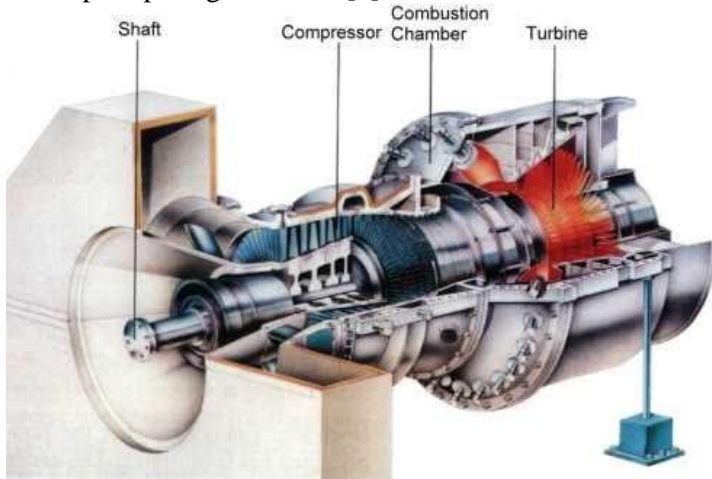
- a. GTG yang akan dimodelkan adalah GTG yang ada di PT. Saka Indonesia Pangkah Limited.
- b. Data variabel didapatkan dari *track record* GTG.
- c. Program yang dipergunakan untuk simulasi adalah *MATLAB* dan dilakukan secara *offline*.

“halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Gas Turbine Generator*

Gas Turbine Generator (GTG) adalah suatu alat yang memanfaatkan kalor dari hasil pembakaran internal yang dapat merubah energi kimia menjadi energi mekanis, dimana energi mekanis ini dapat memutar roda turbin melalui udara bertekanan. Sistem GTG yang paling sederhana terdiri dari tiga komponen yaitu kompresor, ruang udara, dan turbin. GTG pada memiliki 3 *section* penting yakni *compressor*, *combustion chamber*, dan *expansion* serta 1 masukan dan 1 keluaran yaitu *air inlet* dan *exhaust* seperti pada gambar 2.1 [7].



Gambar 2.1 Komponen utama GTG

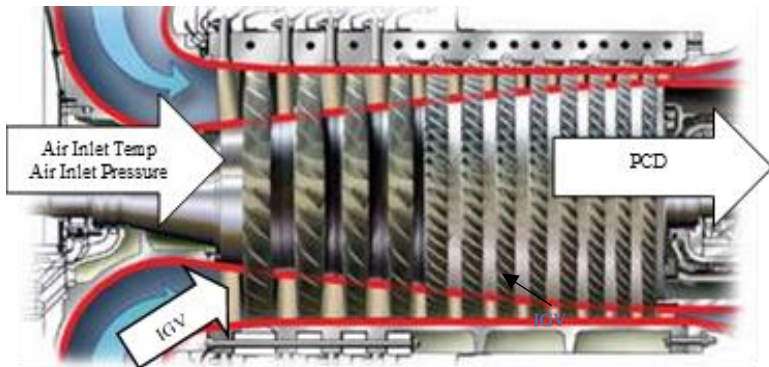
Kompresor bekerja dengan cara menekan udara sedemikian rupa sampai mencapai *set point*. Kemudian bahan bakar dicampur dengan udara yang dipadatkan sehingga menghasilkan gas panas dengan temperatur dan tekanan tinggi. Gas panas tersebut berekspansi pada bagian turbin agar menghasilkan torsi putaran pada sudu-sudu turbin. Gas panas ini dimanfaatkan sebagian besar energinya ke bagian turbin. Sisa-sisa gas tersebut kemudian dibuang ke atmosfer [7]. Proses tersebut bernama siklus *Brayton*

dimana terjadi proses terus menerus. Langkah kompresi, pembakaran, ekspansi, pembuangan gas dan menghasilkan tenaga output mekanis berputar yang dihasilkan terjadi secara serentak dan secara terus menerus. GTG hanya menggunakan sekitar seperempat dari jumlah total udara yang dipadatkannya untuk pembakaran [8]. Udara yang tersisa digunakan untuk mendinginkan komponen-komponen kritis pada bagian yang panas, menutupi *bearing* mesin dan kemudian bercampur dengan gas dari ruang pembakaran, yang mengalir secara bersama-sama, melewati bagian turbin dengan kecepatan tinggi untuk menghasilkan tenaga rotasional (tenaga putaran) [8].

2.1.1 Komponen Utama *Gas Turbine Generator*

- Kompresor

Kompresor berfungsi untuk menghisap udara atmosfer dan mengkompresikannya sehingga pada tekanan tertentu. Jenis kompresor pada turbin dibedakan tergantung pada arah alirannya [9].



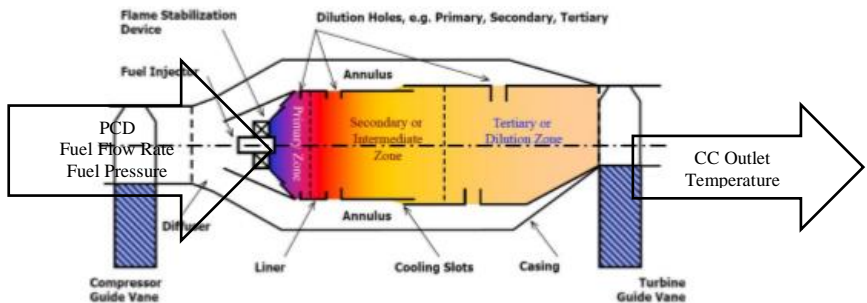
Gambar 2.2 Kompresor tipe *axial* [9]

Gambar 2.2 menunjukkan kompresor tipe *axial* dengan berbagai variabel untuk memahami informasi variabel proses pada bagian ini. Variabel input pada kompresor adalah tekanan dan temperatur, sedangkan variabel proses dan variabel kontrol

berturut-turun PCD (*pressure compressor discharge*) dan IGV. Nilai PCD yang terukur merupakan variabel yang perlu dijaga nilainya agar tetap berada pada *range operational* karena perubahan tekanan yang berada diluar *range* tersebut bisa mengakibatkan turunnya efisiensi dan beban [9].

- Ruang Bakar (*Combustion chamber*)

Udara bertekanan dari kompresor akan masuk menuju ruang bakar yang biasa disebut *combustion chamber* atau *combustor*. Oksigen dalam udara akan bereaksi dengan bahan bakar sehingga menghasilkan panas di dalam ruang bakar. Panas tersebut diserap oleh komponen udara sisa seperti nitrogen sehingga udara hasil pembakaran mengalami semacam pemuaiian secara cepat [10].



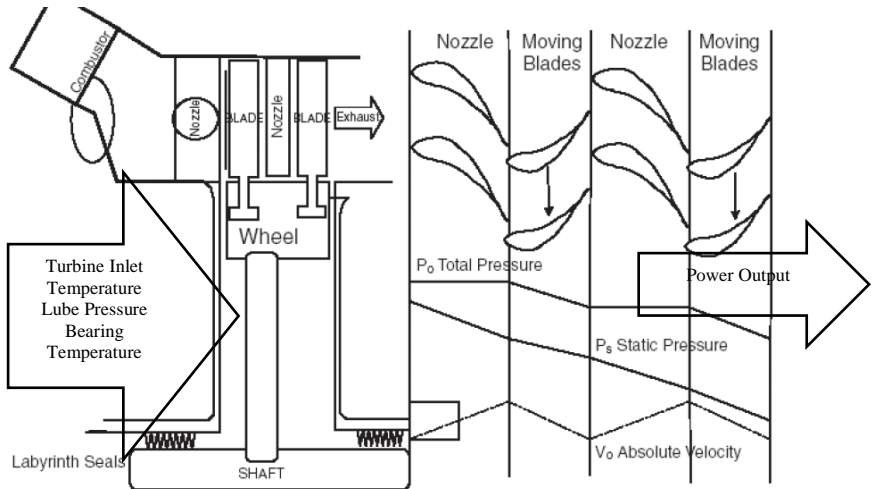
Gambar 2.3 Ruang bakar [10]

GTG yang dimiliki PT. Saka Indonesia Pangkah Ltd, PCD atau *pressure, compressor discharge* dimanfaatkan sebagai variabel CC juga. Selain itu *fuel flow rate* dan *fuel pressure* juga merupakan variabel terkait dan menghasilkan *CC outlet temperature* sebagai variabel *output* seperti pada gambar 2.5.

- Turbin

Turbin merupakan tempat terjadinya konversi energi kinetik menjadi energi mekanik yang digunakan sebagai penggerak kompresor dan perlengkapan lainnya. Daya turbin yang dihasilkan kira-kira 60% digunakan untuk memutar kompresornya sendiri, dan sisanya digunakan untuk kerja yang dibutuhkan. Turbin reaksi

ini, sudu rotor dan stator didesain sebagai *nozzle*, Sehingga perubahan energi panas di dalam udara menjadi energi kinetik, terjadi pada setiap tingkatan sudu. Turbin yang paling sederhana terdiri dari sebuah bagian yang berputar disebut rotor, yang terdiri atas sebuah poros/*shaft* dengan sudu-sudu atau *blade* yang terpasang pada poros tersebut. Rotor tersebut berputar karena tumbukan aliran fluida atau berputar sebagai reaksi dari aliran fluida tersebut [10]. Gambar 2.4 menampilkan skema gas turbin dan juga menunjukkan variabel input dan output berturut-turut *turbine inlet temperature*, *lube pressure*, *bearing temperature*, dan *power* atau beban.



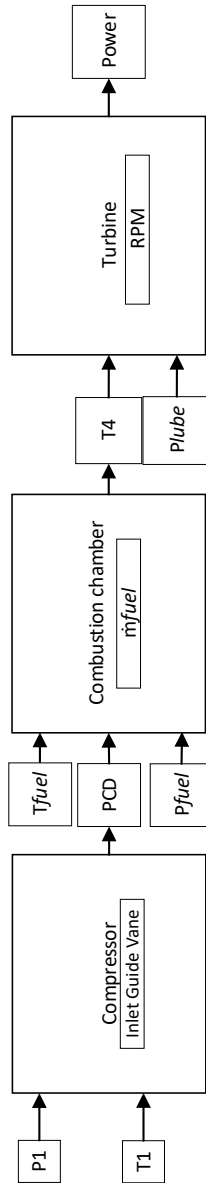
Gambar 2.4 Variabel Turbin [10]

Beban adalah variabel proses yang perlu dijaga nilainya karena memiliki peran untuk membangkitkan listrik serta menggerakkan kompresor. Variabel beban pada bagian turbin ini memiliki rentang nilai operasional sebagai indikator kinerja GTG.

2.2 Blok Diagram GTG

Blok diagram adalah diagram dari sebuah sistem, di mana bagian utama atau fungsi yang diwakili oleh blok dihubungkan dengan garis, yang menunjukkan hubungan dari blok. Blok diagram pada GTG menunjukkan variabel input dari setiap *section* yang dihubungkan oleh sebuah proses dalam kasus ini adalah JST dan kemudian didapatkan nilai output, karena JST merepresentasikan proses yang terjadi di dalam sebuah sistem akibat dari sulitnya pemodelan matematis [11]. Maka dari itu model pada kasus ini berupa *black-box model* karena pemodelan ini dilakukan berdasarkan variabel fisis yang terkandung pada GTG kemudian diketahui hubungan input dan output yang terlebih dahulu ditunjukkan dengan blok diagram pada gambar 2.5. Gambar tersebut menunjukkan keterkaitan tiap variabel untuk tiap bagian [11].

Kompresor memiliki 2 input yaitu P1 (*air inlet pressure*) dan T1 (*air inlet temperature*), variabel kontrol yakni *inlet guide vane*, dan variabel proses berupa PCD (*pressure control discharge*) atau nilai tekanan yang keluar dari kompresor. Sementara pada ruang bakar nilai PCD digunakan sebagai input diikuti oleh *fuel pressure* dan *fuel temperature*, *fuel flow rate* atau *mfuel* sebagai variabel kontrol, dan T4 (*cc outlet temperature*) sebagai output. Adapun pada turbin, RPM digunakan sebagai variabel kontrol, dimana T4 (*turbine inlet temperature*) menjadi input bagi turbin, diikuti oleh *bearing temperature* serta *lube pressure*. Variabel proses pada bagian ini adalah beban atau *power* [12]. Dari gambar 2.5 diketahui bahwa variabel GTG untuk tiap bagian memiliki keterkaitan satu sama lain, yang artinya perubahan nilai variabel pada bagian kompresor bisa mempengaruhi nilai beban keluaran pada turbin. Berdasarkan diagram blok tersebut, JST dapat memodelkan dinamika proses yang terjadi untuk tiap bagian, dimana JST ini dapat menggantikan pemodelan fisika khususnya fungsi transfer untuk mengetahui perubahan nilai output terhadap input yang diberikan.



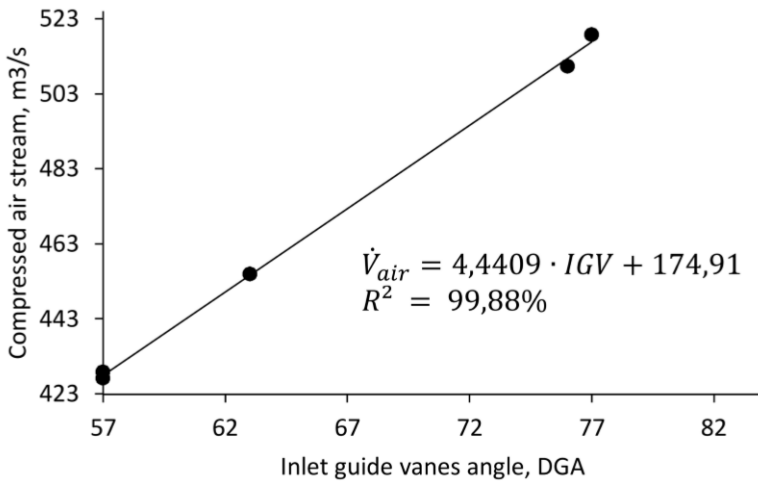
Gambar 2. 5 Blok diagram GTG [12]

2.3 Hubungan Input dan Output sistem GTG

Sistem GTG yang terbagi menjadi 3 *section* memiliki input dan output di masing-masing *section*. Input dan output ini pasti memiliki korelasi satu dengan lainnya. Hubungan input dan output dari setiap *section* didefinisikan berdasarkan teori-teori hasil publikasi atau melihat *track record* yang didapat.

- Kompresor

Menurut Marcin Plis [13], perubahan *inlet guide vane* berbanding lurus terhadap tekanan yang keluar pada kompresor. Persentase posisi IGV yang besar akan mengakibatkan bukaan IGV yang besar dan meningkatkan *air mass flow rate* dari udara luar ke dalam kompresor seperti pada gambar 2.6



Gambar 2.6 Hubungan lajur udara terkompresi terhadap IGV [13]

Berdasarkan hukum mekanika fluida dimana setiap terjadi kenaikan laju udara maka terjadi kenaikan tekanan [14]. Maka dari itu pengaruh kenaikan IGV mengakibatkan kenaikan tekanan yang dikompresi. Kemudian hubungan *compressed air flow* terhadap tekanan juga dijelaskan pada persamaan berikut [14].

$$qf = Pr \times qc \quad (2.1)$$

Dimana:

qf = laju aliran udara (m^3/s)

P_r = rasio tekanan

qc = laju aliran udara terkompresi *Rate* (m^3/s)

Pressure Ratio (Pr). *Pressure Ratio* adalah perbandingan antara tekanan pada *outlet* kompresor dengan tekanan pada *inlet* Kompresor. Nilainya menyesuaikan dengan desain dari Kompresor itu sendiri. dihitung dengan cara berikut: [14]

$$Pr = \frac{p_2}{p_1} \quad (2.2)$$

Dimana:

P_r = rasio tekanan

P_2 = tekanan keluaran kompresor / PCD (kPa)

P_1 = tekanan masukan kompresor (kPa)

Adapun nilai *pressure inlet compressor* saling berhubungan terhadap *temperature inlet compressor* berdasarkan pendekatan Hukum Gas Kombinasi Boyle-Charles-Gay Lussac [15] mengenai sifat dari suatu Gas Ideal yang mengemukakan hubungan antara tekanan, temperatur, dan volume gas untuk massa gas tetap sebagai berikut:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} = \text{constant} \quad (2.3)$$

Dimana:

P_1 = Tekanan masukan kompresor (kPa)

P_2 = Tekanan keluaran kompresor (kPa)

V_1 = Volume masukan kompresor (m^3)

V_2 = Volume keluaran kompresor (m^3)

T_1 = Temperatur masukan kompresor (K)

T_2 = Temperatur keluaran kompresor (K)

Konsekuensi dari hukum ini akan menyebabkan densitas dari udara akan berubah – ubah sesuai dengan tekanan dan temperatur yang dikenakan pada udara tersebut, sehingga akan mempengaruhi nilai dari *Compressor Air Mass Flow Rate*.

- Ruang bakar

Udara bertekanan yang keluar dari kompresor dimanfaatkan untuk mencampur dengan bahan bakar agar udara bertekanan tersebut mencapai temperatur tertentu sehingga bisa memutar sudu-sudu turbin. Nilai tekanan pada PCD ini kemudian menjadi input bagi ruang bakar dengan mengatur nilai laju aliran bahan bakar agar menghasilkan udara bertekanan sesuai *range operational* yang ditetapkan. Campuran yang baik terhadap PCD dan laju aliran bahan bakar menyebabkan temperatur kalor yang baik juga. Menurut Omar Khudair dkk. [16], beban keluaran dapat diturunkan dari udara yang bertekanan keluar dari ruang bakar dengan persamaan berikut [16]:

$$P_{out} = \Delta P \times Q \quad (2.4)$$

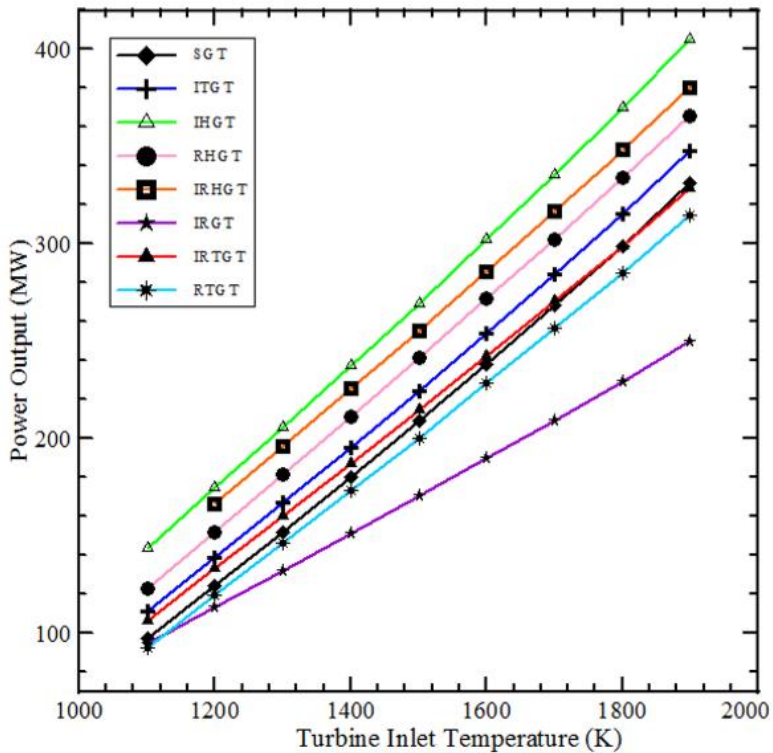
Dimana:

P_{out} : beban keluaran

ΔP : Perbedaan tekanan masukan dengan keluaran pada kompresor

Q: laju aliran bahan bakar

Penelitian lain menunjukkan jika terjadi hubungan linier antara temperatur yang keluar dari ruang bakar terhadap daya yang dihasilkan dimana setiap terjadi kenaikan temperatur maka terjadi kenaikan daya yang dihasilkan seperti gambar 2.7 [17].



Gambar 2.7 Hubungan temperatur masukan turbin terhadap beban keluaran [17]

Gambar 2.7 menunjukkan hubungan temperatur masukan turbin terhadap beban keluaran untuk beberapa jenis turbin gas, dimana pada gambar tersebut menunjukkan kurva hubungan ketika ada kenaikan temperatur masukan turbin, maka beban keluaran dipastikan meningkat.

- Turbin

Hubungan input dan output pada turbin paling nyata juga ditunjukkan pada gambar 2.7 karena input pada bagian ini adalah temperature masukan turbin. Temperatur ini adalah variabel paling penting untuk menjaga efisiensi serta beban yang dihasilkan karena

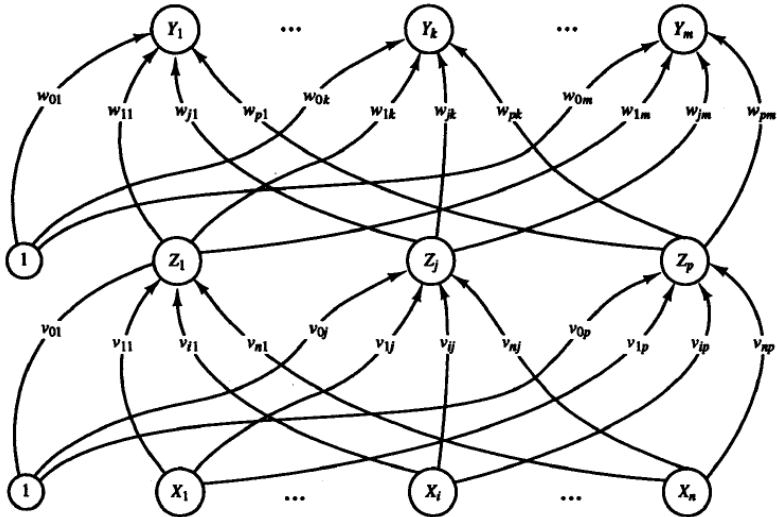
udara bertekanan harus mencapai temperatur tertentu agar dapat memutar sudu-sudu turbin dengan baik. Meskipun demikian, temperatur ini memiliki kondisi operasi yang perlu dijaga nilai rentang operasionalnya agar tidak merusak komponen mekanik turbin. Dengan demikian, langkah lain agar komponen mekanik seperti pada shaft atau sudu-sudu turbin tidak rusak dan mendapat efisiensi baik adalah menjaga kondisi RPM turbin dengan baik pada putaran rotasi shaft turbin. Cara menjaga kondisi RPM agar beban yang dihasilkan tetap baik adalah dengan menjaga kondisi *bearing temperature* yang kemudian dilapisi oleh pelumas pada temperatur dan tekanan tertentu. Pengaruh ini pada dasarnya tidak terlalu signifikan seperti temperatur masukan turbin namun menurut standar API 617 [18], temperatur bearing perlu dijaga diantara 70-90°C sementara pada tekanan dijaga pada range 200-400 kPa. Perubahan yang melebihi atau kurang dari range tersebut akan mengakibatkan turunnya efisiensi dan beban yang dihasilkan karena gesekan pada shaft turbin yang besar hingga *trip*.

2.4 Jaringan Saraf Tiruan

Jaringan syaraf tiruan adalah alah satu representasi buatan dari otak manusia yang selalu mencoba untuk mensimulasikan proses pembelajaran pada otak manusia tersebut. Istilah buatan disini digunakan karena jaringan syaraf ini diimplementasikan dengan menggunakan program komputer yang mampu menyelesaikan sejumlah proses perhitungan selama proses pembelajaran [19].

Salah satu model JST yang paling banyak digunakan adalah JST *backpropagation*. JST ini banyak diaplikasikan pada penyelesaian suatu masalah berkaitan identifikasi, prediksi, dan pengenalan pola. Mekanisme dari algoritma ini adalah jaringan diberikan pola input sebagai pola pelatihan, maka pola tersebut menuju ke unit-unit pada lapisan *hidden* untuk diteruskan ke unit-unit lapisan output [19]. Kemudian unit-unit lapisan output memberikan tanggapan yang disebut sebagai output jaringan. Saat *output* jaringan tidak sama dengan *output* yang diharapkan maka

output akan menyebar mundur (*backward*) pada lapisan *hidden* diteruskan ke unit pada lapisan input.



Gambar 2.8 JST backpropagation [19]

Gambar 2.8 menunjukkan arsitektur JST backpropagation, dimana X_i merupakan neuron input dengan jumlah input tak terbatas dan bias yang dilambangkan dengan angka 1, pembobotan untuk masing-masing neuron input ($v_{01}, v_{11}, v_{\dots}$) menuju *hidden layer* dimana pada *layer* ini terjadi proses komputasi dari pembobotan dan pengenalan pola sebelum menuju output. Output layer (y_i) menerima informasi berdasarkan pembobotan dari input melalui proses fungsi aktivasi dengan pembobotan ($w_{01}, w_{11}, w_{\dots}$) dan bias (1) [19].

Seluruh proses training dan validasi dilakukan menggunakan *nntool* yang merupakan *toolbox* pada *Matlab*. *Toolbox* ini berguna untuk melakukan proses pemodelan JST berdasarkan pasangan data *input* dan *output*. Pasangan data *input* dan *output* ini nantinya akan dimasukkan ke dalam *toolbox* dimana *input* menjadi data *input* dan *output* menjadi target yang ditetapkan selama proses training dan validasi.

2.3.1 Jumlah *hidden layers* dan *neurons*

Penentuan jumlah hidden layer dan neuron di setiap layer sangat penting dalam pelatihan JST. Penentuan ini tidak berdasarkan bahwa semakin banyak jumlah neurons menandakan lebih baik. Terkadang semakin banyak neuron bisa mempengaruhi akurasi dan *generalizability* [20].

2.3.2 Algoritma *training*

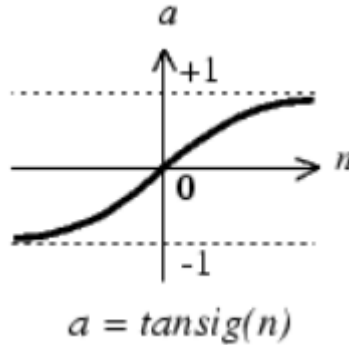
Terdapat beberapa algoritma *training* yang digunakan dalam JST yang terdapat pada toolbox Matlab, diantaranya adalah [21]:

- *Trainlm*: Levenberg-Marquardt
- *Trainbr*: Bayesian Regularization
- *Trainbfg*: BFGS Quasi-Newton
- *Trainnrp*: Resilient Backpropagation
- *Trainscg*: scaled Conjugate Gradient
- *Traincgb*: Conjugate Gradient with Powell
- *Traincgf*: Fletcher-Powell Conjugate Gradient
- *Traingdx*: Variable learning rate gradient descent

Untuk tugas akhir ini, *trainlm* akan digunakan sebagai algoritma pelatihan yang dilakukan di *Matlab*.

2.3.3 Fungsi Aktivasi

Fungsi aktivasi berfungsi untuk mentransformasikan level dari sebuah unit (neuron) menuju output sinyal [21]. Terdapat berbagai fungsi aktivasi yang bisa diperoleh dari *Matlab*. aktivasi yang paling banyak digunakan adalah *Log-sigmoid* dan *Tan-sigmoid*. Namun berdasarkan penelitian, fungsi aktivasi *tansig* adalah yang terbaik untuk *backpropagation* [21].



Gambar 2.9 Fungsi aktivasi *tansig* [21]

Fungsi *sigmoid tangen* merupakan fungsi aktivasi dengan rentang keluaran dari -1 hingga 1 seperti gambar 2.9. Fungsi ini biasa disebut sebagai *bipolar sigmoid*. Persamaan fungsi ini dan turunannya adalah sebagai berikut.

$$f(x) = \frac{2}{1 + e^{-\sigma x}} - 1 \quad (2.5)$$

$$f'(x) = \frac{\sigma}{2} [1 + f(x)][1 - f(x)] \quad (2.6)$$

2.3.4 Nilai bobot

Sebelum melatih struktur JST, nilai bobot awal dan bias harus ditentukan. Inisiasi bobot dan bias bisa dilakukan secara otomatis pada *toolbox Matlab* dengan menggunakan algoritma pemrograman *trainlm* atau menulis pada *running codes* di *Matlab*. Nilai bobot ini nantinya akan dimutakhir secara otomatis seiring meningkatnya *epoch* saat proses *training*

2.3.5 Kriteria error

Tujuan dari *training* pada JST adalah untuk mengurangi eror sebanyak mungkin. Meminimalkan eror berarti meningkatkan performa dari *training* dan mendapatkan model yang akurat. Biasanya digunakan *mean square error (MSE)* dan *root mean*

square error (RMSE) saat melakukan *training* JST. MSE dan RMSE didefinisikan berdasarkan persamaan 2.7 dan 2.8 dimana y_m adalah data yang terukur, y adalah prediksi model dan n_d adalah jumlah dari data sets. Untuk meminimalkan eror bisa didapat dari mengubah bobot dan *training algorithms*.

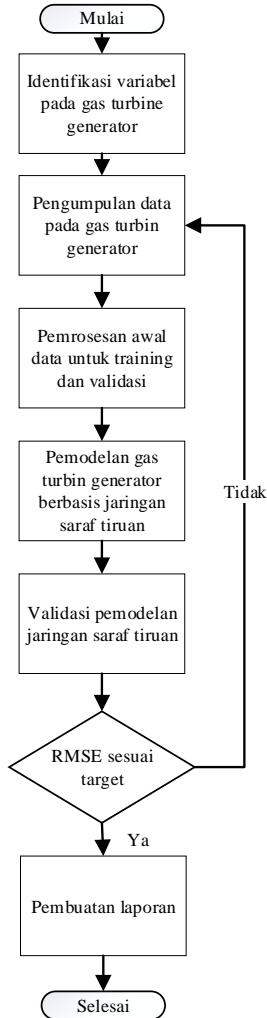
$$MSE = \frac{1}{n_d} \sum_{i=1}^{n_d} \left(\frac{y_{mi} - y_i}{y_{mi}} \right)^2 \quad (2.7)$$

$$MSE = \sqrt{\frac{1}{n_d} \sum_{i=1}^{n_d} \left(\frac{y_{mi} - y_i}{y_{mi}} \right)^2} \quad (2.8)$$

“halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Metode penelitian ditunjukkan dalam bentuk diagram alir pada Gambar 3.1 di bawah ini.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.1. Identifikasi Variabel pada GTG

Identifikasi variabel didapatkan dengan melakukan diskusi langsung dengan karyawan dari PT Saka Indonesia Pangkah Limited (PT. SIPL), serta mengadopsi dari referensi yang telah ada. Identifikasi variabel ini juga menentukan *range operational* tiap input dan output berdasarkan spesifikasi GTG yang terdapat di PT. SIPL dan standar untuk variabel tertentu.

Tabel 3.1 *Range operational* variabel GTG

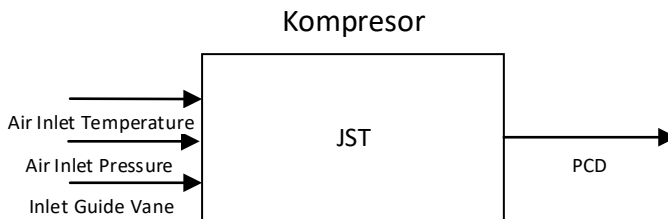
<i>Section</i>	I/O	Variabel	Range Operational
Kompresor	Input	Air Inlet Temperature	25-35°C
		Air Inlet Pressure	0.98-1 kPa
		<i>Inlet guide vane</i>	85-99.9%
	Output	Pressure, Compressor Discharge	800-900 kPa
Ruang bakar	Input	Pressure, Compressor Discharge	800-900 kPa
		Fuel Flow Rate	0,2-0,53 kg/s
		Fuel Pressure	1730 – 1841 kPa
	Output	CC Outlet Temperature	350 – 513°C

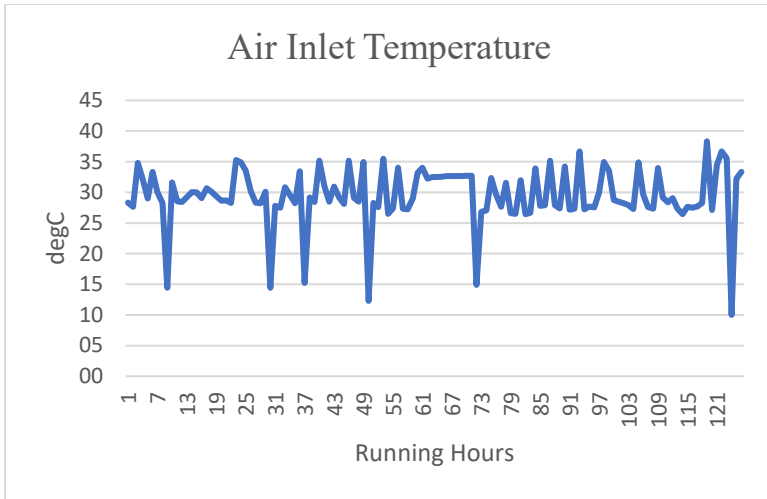
Tabel 3.2 Range operational variabel GTG (lanjutan)

Section	I/O	Variabel	Range Operational
Turbin	Input	Turbine Inlet Temp	350 – 513°C
		Bearing Temperature	70-90°C
		Lube Pressure	200-400 kPa
	Output	Beban keluaran	2000-2500 kW

3.2. Pengumpulan Data Operasional pada GTG

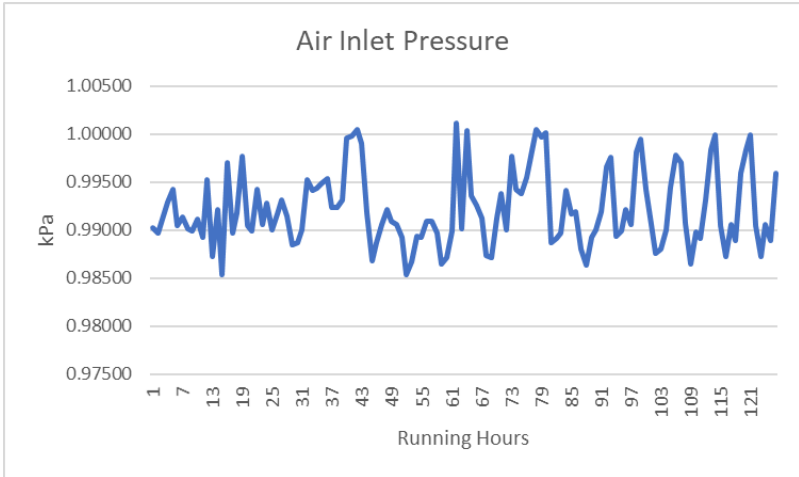
Data yang dikumpulkan tidak melalui pengukuran secara langsung melainkan pemberian dari pegawai PT.SIPL . Sehingga data yang dipergunakan penelitian merupakan data sekunder. Proses pengambilan data didasarkan berdasarkan variabel-variabel pada tiap bagian GTG, dimana untuk kompresor ditunjukkan pada gambar 3.2 Proses data yang diambil tentunya diperlukan data yang variatif, tidak hanya data saat kondisi normal namun diperlukan data saat kondisi tidak stabil. Data ini ditampilkan dalam bentuk grafik, kemudian untuk data aslinya terdapat pada lampiran.

**Gambar 3.2** Diagram blok kompresor

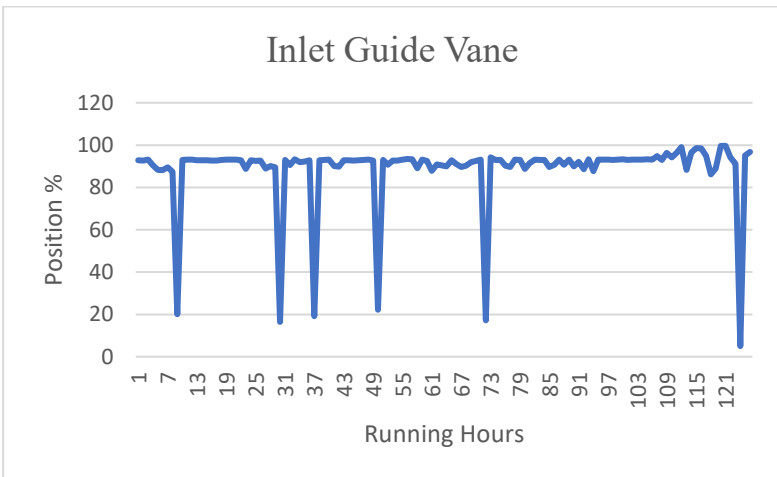


Gambar 3.3 Data *air inlet temperature*

Gambar 3.3 menunjukkan data *Air inlet temperature*. Variabel ini merupakan udara dari luar yang masuk menuju kompresor untuk dikompres dengan tujuan mencapai tekanan tertentu agar bisa menjadi bahan pembakaran serta memutar sudu turbin. Selama GTG berjalan, temperatur udara yang masuk ke kompresor berada di kisaran 10 hingga 38°C. selain untuk pembakaran, udara ini juga berguna untuk pendinginan komponen-komponen di dalam gas turbin seperti bearing. Adapun variabel lain sebagai masukan untuk kompresor adalah *Air inlet pressure* dimana variabel ini adalah tekanan udara atmosfer. Biasanya, tekanan udara pada lokasi tropis untuk pabrik dengan GTG berada di kisaran 0.9 hingga 1 kPa. Kondisi ini berfluktuasi tergantung temperatur ambien. *Air inlet pressure* merupakan input dari kompresor yang nantinya akan dilakukan pemodelan kondisi operasi. Variabel *air inlet pressure* ditunjukkan pada gambar 3.4



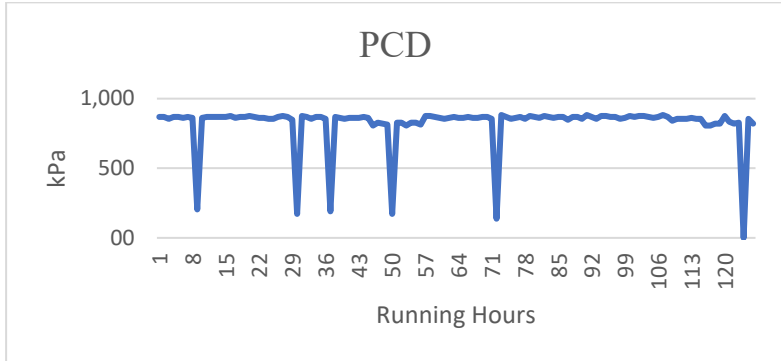
Gambar 3.4 Data *air inlet pressure*



Gambar 3.5 Data variabel IGV

Gambar 3.5 merupakan variabel *inlet guide vane* yang juga merupakan masukan untuk kompresor. Variabel ini menunjukkan korelasi yang sangat signifikan terhadap keluaran kompresor yakni

PCD, hal ini karena IGV merupakan *manipulated variable* untuk bagian kompresor.



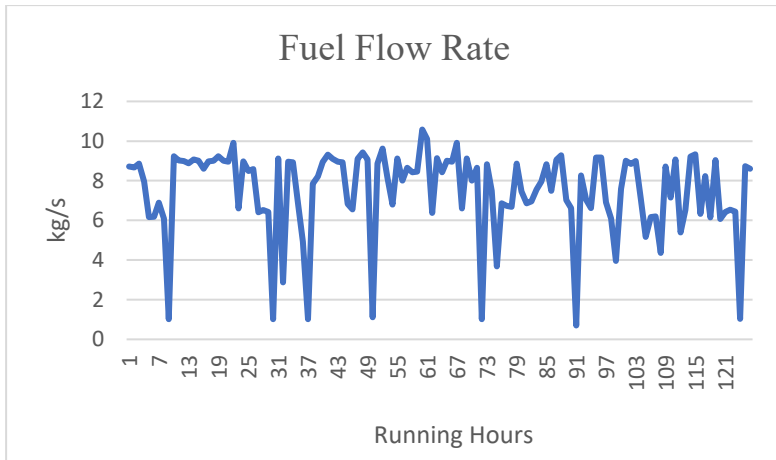
Gambar 3.6 Data variabel PCD

Gambar 3.6 menunjukkan variabel output PCD. Variabel PCD yang merupakan tekanan menunjukkan korelasi berdasarkan input dari kompresor, dimana terjadi hubungan berbanding lurus terhadap perubahan *air inlet pressure* dan IGV dan berbanding terbalik terhadap *air inlet temperature* sesuai kajian teori di bab 2. Adapun untuk pengambilan data pada ruang bakar ini juga mengacu pada diagram blok ruang bakar seperti pada gambar 3.7.



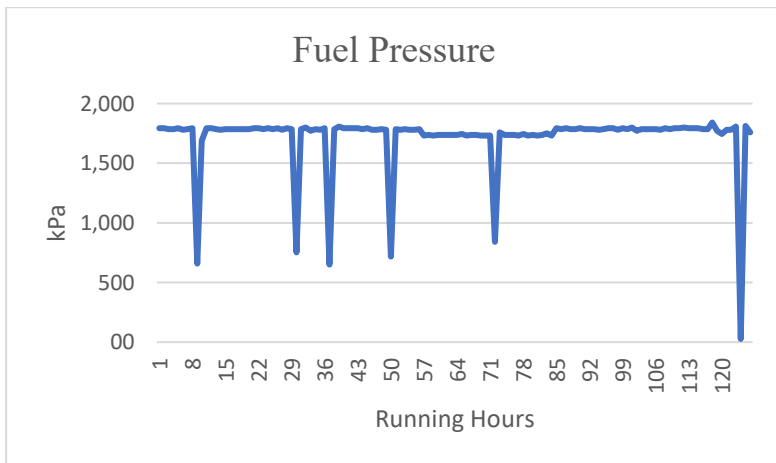
Gambar 3.7 Diagram blok ruang bakar

Berdasarkan gambar 3.7, data PCD ini kemudian digunakan kembali sebagai variabel input untuk ruang bakar, yang mana *fuel flow rate* dan *fuel pressure* sebagai data *input* dan *cc outlet temperature* sebagai data *output*.



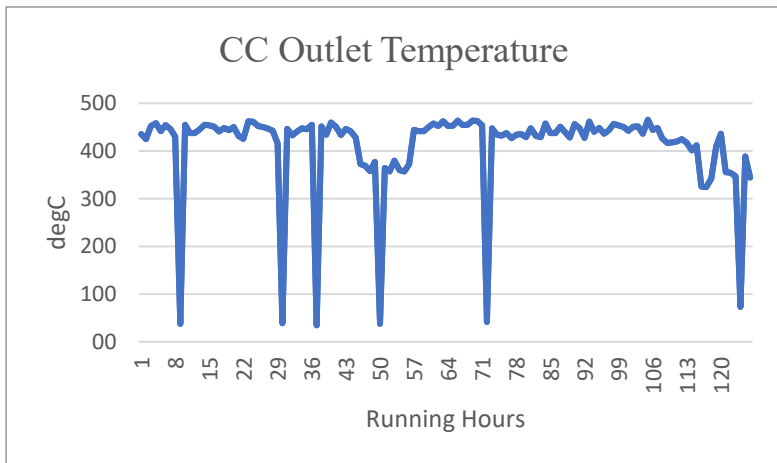
Gambar 3.8 Data variabel *CC fuel flow rate*

Gambar 3.8 menunjukkan grafik perubahan *fuel flow rate* seiring perubahan *running hours*. Selama 126 jam GTG beroperasi, *fuel flowrate* menunjukkan data fluktuatif. *Fuel flow rate* juga merupakan *manipulated variable* dimana nilai ini diatur oleh operator agar nilai keluaran dari ruang bakar sesuai rentang operasionalnya.



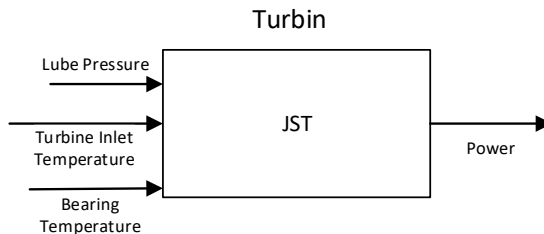
Gambar 3.9 Data variabel *CC fuel pressure*

Gambar 3.6, 3.8, dan 3.9 menunjukkan variabel input pada ruang bakar. Hubungan *input* dan *output* menunjukkan terjadi perubahan linier dari ketiga variabel *input* terhadap variabel *output* pada gambar 3.10. Hal ini sesuai dengan teori yang telah dijelaskan pada bab 2 dan sesuai dengan diagram blok.

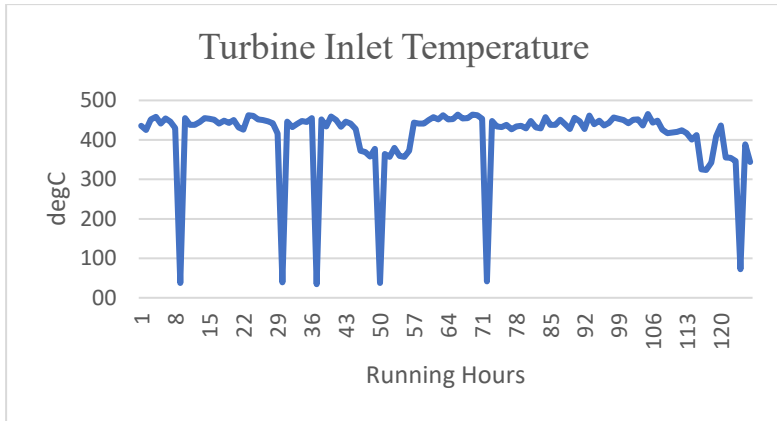


Gambar 3.10 Data variabel *CC outlet temperature*

Gambar 3.11 menunjukkan diagram blok pada bagian turbin dimana variabel input adalah *turbine inlet temperature*, *lube pressure*, *bearing temperature*, dan variabel output adalah beban. Pengambilan data untuk variabel tersebut dijabarkan pada gambar 3.12, 3.13, 3.14, dan 3.15.

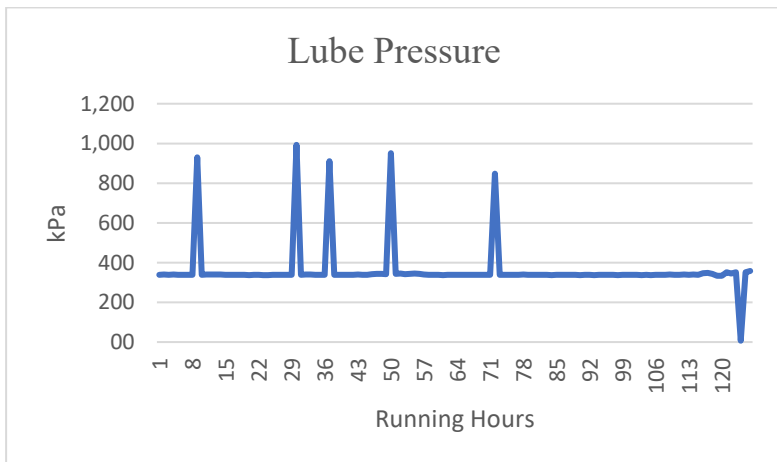


Gambar 3.11 Diagram blok turbin



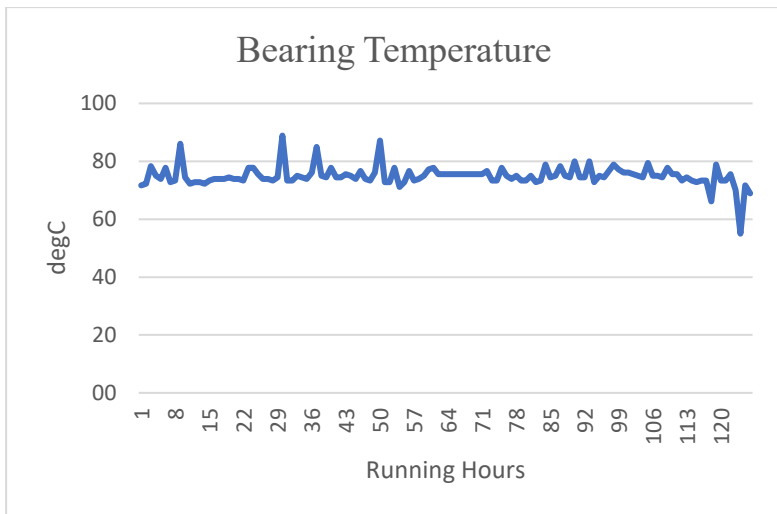
Gambar 3.12 Data input turbine inlet temperature

Gambar 3.12 menunjukkan data *turbine inlet temperature*. Data ini merupakan variabel masukan bagi turbin, juga keluaran bagi ruang bakar (*cc outlet temperature*). Seiring GTG beroperasi, nilai GTG juga tidak stabil. Hal ini dikarenakan perubahan dari campuran nilai PCD dengan nilai *fuel flow rate*.



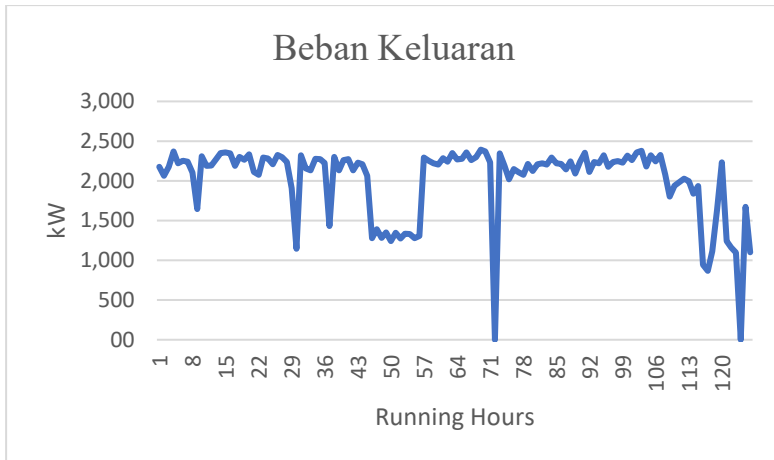
Gambar 3.13 Data input turbine lube pressure

Gambar 3.13 menunjukkan perubahan nilai *lube pressure* seiring berjalannya waktu (*running hours*). *Lube* atau pelumas adalah suatu unit tambahan yang berguna untuk melumasi komponen mekanik, dalam hal ini adalah *shaft turbine*. Pelumasan ini berguna agar dapat mencegah keausan pada bagian-bagian mesin. Normalnya tekanan oli pelumas berada pada 300 kPa. *Lube* dengan tekanan di atas 400 kPa atau dibawah 200 kPa dapat merusak *shaft gas turbine*. *Lube pressure* ini adalah variabel input dari turbin.



Gambar 3. 14 Data input turbine bearing temperature

Gambar 3.14 menunjukkan nilai dari variabel *bearing temperature* selama 126 jam beroperasi. Nilai ini juga tidak stabil dan menunjukkan hubungan berbanding lurus terhadap *lube pressure* karena kondisi operasi *lube pressure* mempengaruhi nilai kondisi operasi *bearing temperature*. Variabel ini memiliki rentang operasional 70°C hingga 90°C [22]. Perubahan nilai diluar rentang operasional ini akan berdampak pada nilai beban yang dihasilkan.



Gambar 3.15 Data variabel beban keluaran

Gambar 3.15 menunjukkan perubahan yang signifikan jika terjadi perubahan pada *turbine inlet temperature*, karena sesuai teori, nilai kalor yang dihasilkan berpengaruh besar terhadap efisiensi dan beban yang didapatkan. Akan tetapi, 2 variabel input yaitu *lube pressure* dan *bearing temperature* juga mempengaruhi beban, dimana perubahan baik peningkatan atau penurunan berdampak penurunan daya yang dihasilkan.

3.3. Pemrosesan Awal Data untuk Training dan Validasi

Data yang didapat akan dipergunakan untuk training dan validasi pemodelan JST. Total data yang didapat adalah 126 data (*running hours*) selama 1 tahun untuk masing-masing variabel, dari data tersebut dibagi dua untuk training dan validasi. Pembagian data ini dilakukan untuk setiap variabel yang telah diidentifikasi baik input maupun output. Variabel output ini nantinya akan menjadi target bagi JST untuk dapat mengenali pola. Pembagian data training dan validasi ini dilakukan karena untuk menguji respon dinamik dari output jika terjadi perubahan variabel input dan mengidentifikasi variabel input yang paling berpengaruh terhadap output yang didapatkan. Pembagian data untuk training dan validasi dilakukan dengan cara membagi 2 data dengan ketentuan

data dengan *running hours* ganjil sebagai data set training dan data dengan *running hours* genap sebagai data set validasi. Langkah sortir secara selang-seling dilakukan karena langkah ini dapat menghasilkan nilai RMSE yang lebih kecil dibandingkan pembagian data tidak dilakukan secara selang-seling, begitu juga jika dilakukan pembagian data dengan porsi yang tidak sama (mis. 60:40) karena akan menyebabkan nilai RMSE yang lebih besar saat validasi.

3.4. Pemodelan GTG berbasis JST

Pemodelan JST pada GTG didasarkan pasangan data *input* dan *output* untuk JST dimana data ini didapatkan dari data yang telah dipersiapkan pada sub bab 3.3. Data training yang telah dipilah kemudian dimasukkan ke dalam *matlab* untuk diketahui polanya, struktur jaringan terbaik berdasarkan RMSE. Simulasi yang dilakukan dengan menggunakan *software MATLAB* dengan menentukan terlebih dahulu parameter simulasi seperti tabel 3.3 dimana data *input* pada tabel tersebut menjadi data *input* untuk *nntool* dan data *output* menjadi data target. Parameter model JST ditentukan dengan ketentuan seperti tabel 3.3. Parameter Model ini terdapat 2 jenis variasi yaitu variasi *hidden node* dan variasi target MSE. Variasi *hidden node* ini dilakukan secara *trial and error* pada pemrograman untuk diketahui struktur dengan nilai MSE terendah Variasi target MSE dilakukan karena parameter kinerja dari JST adalah nilai MSE atau RMSE, dengan menentukan *goal* dari JST yakni target MSE diharapkan saat training JST dapat mencapai MSE serendah-rendahnya. Akan tetapi, struktur hasil training ini bukan menjadi acuan model, karena selanjutnya akan divalidasi pada langkah validasi JST.

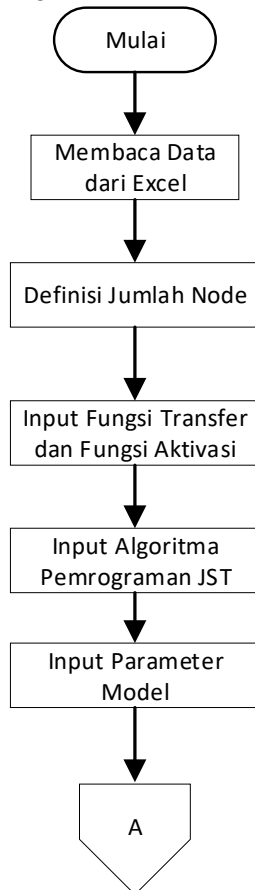
Tabel 3.3 Parameter Model JST

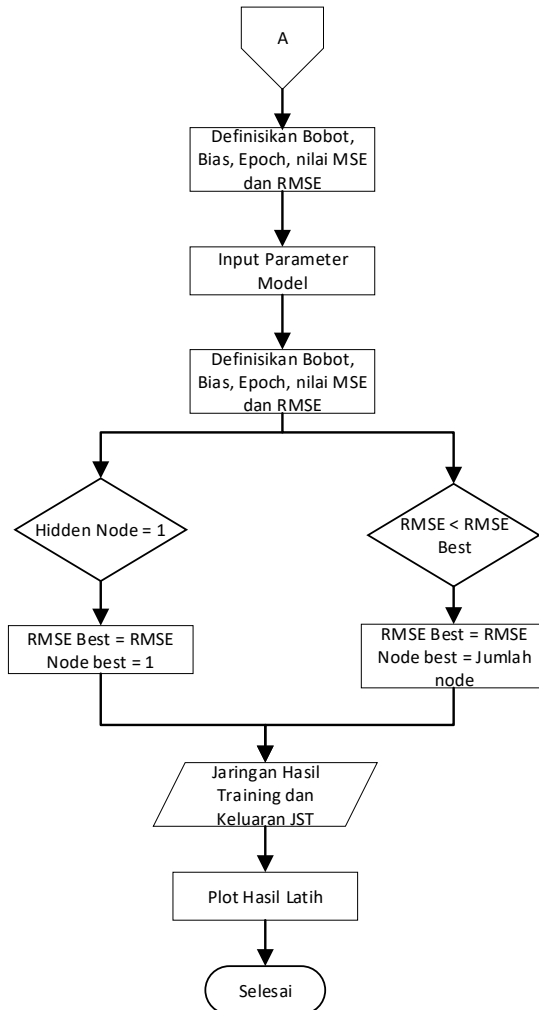
No	Parameter	Keterangan
1	Arsitektur	<i>Multi-layer feedforward</i>
2	Algoritma pelatihan	<i>Levenberg-Marquardt</i>
3	Jumlah <i>hidden layer</i>	1 (Var. 20 <i>hidden node</i>)
4	Target MSE (variasi)	0,1; 0,01 ; 0,001;0,0001

Tabel 3.4 Parameter Model JST (lanjutan)

No	Parameter	Keterangan
5	Epoch maksimum	250
6	Fungsi aktivasi	<i>Tansig, purelin</i>

Modifikasi dilakukan pada *ntool* dengan membuat pemrograman untuk training dengan merujuk pada diagram alir pemrograman seperti pada gambar 3.27 dan 3.28.

**Gambar 3.16** Diagram alir pemrograman pelatihan JST

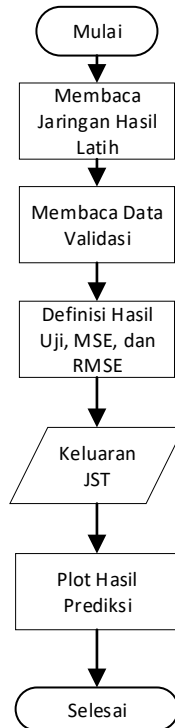


Gambar 3.17 Diagram alir pemrograman pelatihan JST (lanjutan)

Diagram alir pada gambar 3.15 berlaku baik untuk kompresor, ruang bakar, dan turbin. Hasil latih ini kemudian di plot dan dipaparkan pada bab 4 dengan menganalisis variasi target MSE dan *hidden node*.

3.5. Validasi Pemodelan JST

Pemodelan GTG berbasis jaringan syaraf tiruan yang sudah dirancang, divalidasi menggunakan *software Matlab*. Validasi model JST dilakukan dengan data set validasi. Proses validasi dilakukan dengan memuat jaringan yang telah dibuat pada proses training, karena pada proses training sebelumnya menghasilkan 20 jaringan yang digunakan kembali untuk proses validasi. Adapun langkah validasi pada *matlab* merujuk pada diagram alir gambar 3.16.



Gambar 3. 18 Diagram alir pemrograman validasi JST

Langkah validasi pada *matlab* seperti gambar 3.16 juga berlaku untuk kompresor, ruang bakar, dan turbin. Hasil validasi ini kemudian dianalisis untuk mendapatkan RMSE terendah berdasarkan variasi target MSE dan *hidden node*.

“halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dari pengujian struktur JST hasil training dan validasi dijelaskan pada bab ini. Data set dari training dan validasi yang terbagi menjadi 2 masing-masing berjumlah 63 digunakan untuk diketahui *hidden node* terbaik pada untuk setiap target MSE dengan melihat hasil MSE atau RMSE dari setiap variasi tersebut. Proses training memiliki tujuan untuk pengenalan pola bagi setiap input dan output agar nantinya saat divalidasi jika terjadi perubahan input pola tersebut sesuai target validasi. Karakteristik JST yang baik adalah ketika nilai dari MSE sesuai target dan saat divalidasi nilai dari MSE tersebut masih baik dengan eror dibawah 5% atau pola kurva konvergen sesuai target.

4.1 Pengujian Struktur JST Hasil Training

Pengujian struktur JST hasil training dibagi menjadi 3 *section*; kompresor, ruang bakar, dan turbin. Pengenalan pola pasangan data input dan output ini nantinya mendapatkan model JST dengan struktur *input-hidden layer-output*.

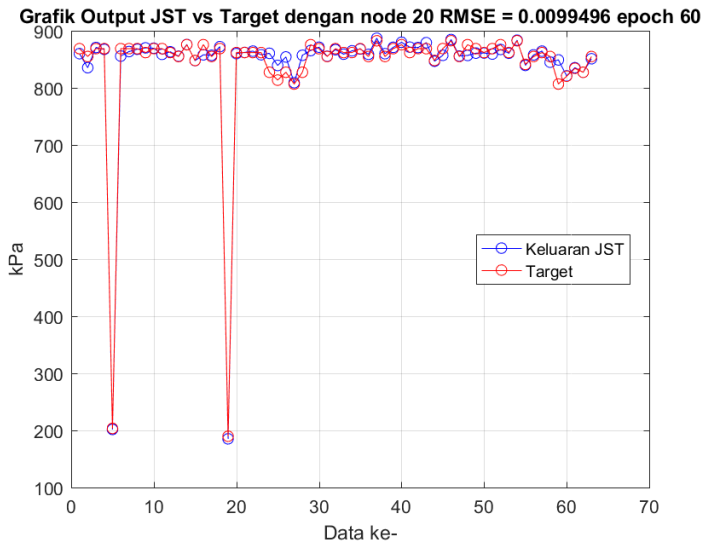
4.1.1 Hasil Latih Kompresor

Telah dilakukan uji pelatihan pada *section* ini dengan jumlah data sebanyak 63 terdiri dari 3 *input* dan 1 *output* dimana output ini mewakili target untuk pelatihan JST. Analisis ini dilakukan menggunakan *MATLAB* dengan melatih 63 data training yang kemudian menunjukkan nilai *hidden nodes* terbaik berdasarkan nilai *RMSE*. Nilai *RMSE* ataupun *MSE* ini menunjukkan kinerja JST dimana jika semakin kecil nilai erornya, maka kinerja JST semakin baik. Lalu parameter *Epoch* menandakan satu siklus algoritma *machine learning* ‘belajar’ dari seluruh set data training. Satu *epoch* berarti sebuah algoritma *machine learning* telah ‘belajar’ dari data training secara keseluruhan. Dalam jaringan saraf tiruan, proses pembelajaran yang berulang-ulang bertujuan untuk mencapai konvergensi nilai bobot. Tabel 4.1 adalah *hidden node* terbaik bagi setiap target MSE beserta nilai *RMSE* dan *epoch*.

Tabel 4.1 Hasil uji training struktur JST pada kompresor

Target MSE	Hidden Node Terbaik	MSE	RMSE	Epoch
0.1	5	0.000767	0.027688	1
0.01	9	0.000321	0.017929	2
0.001	12	0.000195	0.013965	2
0.0001	20	0.000099	0.009950	60

Hasil pengujian ini diketahui berdasarkan tabel 4.1 dan didapatkan nilai RMSE terbaik pada *hidden node* 20 dengan target MSE 0.0001 dengan nilai MSE 0.0099 pada *epoch* 60. Nilai RMSE ini melambangkan tingkat akurasi pelatihan terhadap target yang ditetapkan. Dengan eror yang semakin kecil maka tingkat akurasi semakin baik. Langkah selanjutnya hasil setiap target MSE ini diplot pada gambar 4.1 dimana output JST ini merupakan variabel PCD.

**Gambar 4.1** Grafik hubungan keluaran JST terhadap target pada kompresor

Gambar 4.1 untuk target MSE 0.0001 dengan 20 variasi *hidden node* menghasilkan *hidden node* 20 sebagai yang terbaik dengan MSE 0.00999496 pada *epoch* 60. Maka model struktur dari training JST tersebut adalah 3-20-1. Nilai RMSE terbaik adalah 0.00999496 pada *epoch* 60, yang berarti hasil dari pelatihan ini sudah cukup baik karena nilai eror sudah memenuhi target.

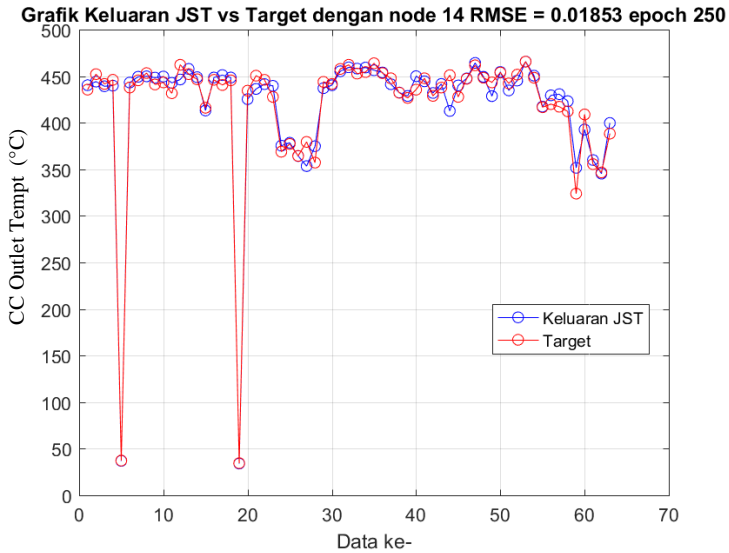
4.1.2 Hasil Latih Ruang Bakar

Berdasarkan langkah pengujian training untuk JST pada *section* ini, analisis ini dilakukan untuk mengetahui nilai MSE terbaik dari berbagai variasi target MSE dan *hidden nodes*. Berikut hasilnya.

Tabel 4.2 Hasil uji training struktur JST pada ruang bakar

Target MSE	Hidden Node Terbaik	MSE	RMSE	Epoch
0.1	20	0.001600	0.040000	1
0.01	20	0.001100	0.033166	4
0.001	19	0.000882	0.029693	4
0.0001	14	0.000343	0.018530	250

Diketahui hasil pengujian struktur JST pada tabel 4.2 dan mendapatkan nilai RMSE terbaik ada pada target MSE 0.0001 dengan hasil MSE sebesar 0.000343. Kemudian hasil ini diplot pada gambar 4.2 dimana label horizontal merupakan urutan data yang mewakili *running hours* saat GTG beroperasi dan label vertikal mewakili nilai dari variabel *cc outlet temperature*. Dari grafik hubungan keluaran JST terhadap target dan nilai regresi untuk setiap variasi target MSE diketahui bahwa struktur training JST terbaik pada *section* CC adalah struktur dengan target MSE 0.0001 yakni 3-14-1 dengan *hidden nodes* 14 yang memiliki nilai RMSE 0.01853 pada *epoch* 250. Berdasarkan kriteria nilai MSE dan RMSE tersebut, struktur JST 3-14-1 dapat dikatakan akurat. Namun akurasi ini perlu divalidasi lebih lanjut yang kemudian dilakukan hasil dan analisis berdsarkan proses validasi.



Gambar 4.2 Grafik hubungan keluaran JST terhadap target pada ruang bakar

4.1.3 Hasil Latih Turbin

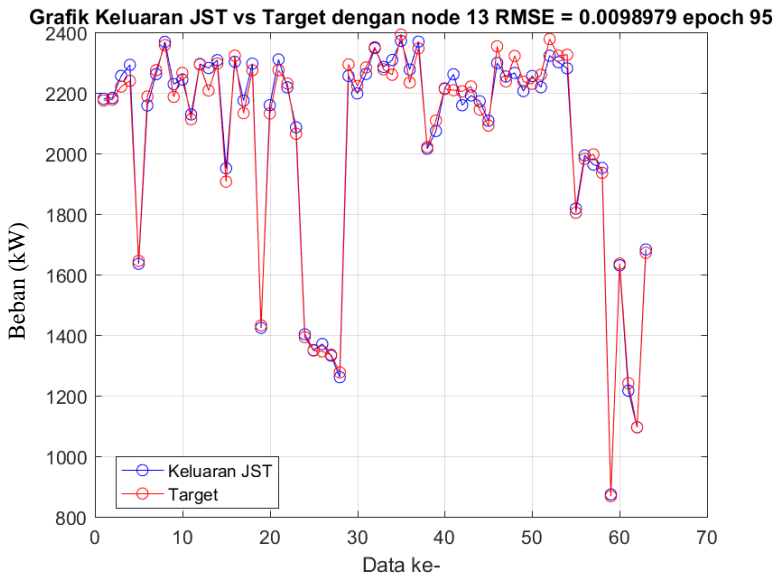
Pengujian struktur JST hasil training pada *section turbin* berdasarkan pengenalan pola 3 input dan 1 output yang telah didefinisikan pada bab 3. Hasil yang didapatkan adalah struktur terbaik pada *hidden nodes* dengan melihat nilai RMSE terendah untuk keseluruhan target MSE. Berikut hasilnya.

Tabel 4.3 Hasil uji training struktur JST pada turbin

Target MSE	Hidden Node Terbaik	MSE	RMSE	Epoch
0.1	7	0.002300	0.047958	1
0.01	12	0.000396	0.019897	2
0.001	4	0.000195	0.013960	4
0.0001	13	0.000098	0.009898	95

Tabel 4.3 menjelaskan hasil uji struktur JST hasil training, dimana untuk 4 variasi target MSE dan 20 variasi *hidden node*

diketahui jaringan terbaik ada pada *hidden node* 13 pada target MSE 0.0001 dengan nilai MSE 0.000098 dan RMSE 0.009898 pada *epoch* 95. Hasil ini menunjukkan akurasi pelatihan sudah sangat baik karena bisa mencapai target. Hasil ini kemudian diplot dalam bentuk grafik berupa perbandingan keluaran JST terhadap target untuk variabel beban karena beban merupakan variabel output pada turbin yang digambarkan pada gambar 4.3.



Gambar 4.3 Grafik hubungan keluaran JST terhadap target pada turbin

Gambar 4.3 yang telah ditunjukkan diketahui bahwa perbandingan keluaran JST dengan target dikatakan konvergen karena kurva keluaran JST dapat mengikuti target yang telah ditetapkan. Struktur training JST terbaik ada pada variasi target MSE 0.0001 dengan model struktur 3-13-1 dan memiliki nilai 0.009898 pada *epoch* 95. Nilai RMSE ini menunjukkan kinerja JST pada *section* turbin dimana semakin rendah nilai MSE maka semakin baik kinerja pelatihannya. Nilai *epoch* bekerja pada algoritma untuk ‘belajar’ mengenali pola hingga target tertentu.

4.2 Hasil Validasi

Setelah dilakukan training JST, kemudian dilakukan validasi JST dengan menguji jaringan yang telah dibuat saat proses training. Pengujian ini juga untuk mengetahui bila terjadi perubahan struktur terhadap hasil training. Data yang dilakukan untuk validasi didapatkan dari penyusunan data untuk validasi seperti yang telah dilakukan pada bab 3 dengan jumlah data 63. Kemudian dari data ini diketahui bagaimana respon dari keluaran JST terhadap *input* yang ada dan dibandingkan oleh *output real* untuk setiap *section*. Nilai MSE juga menentukan kinerja dari hasil validasi ini, yang kemudian dibandingkan secara grafik keluaran hasil validasi terhadap *output real* (target), ketika perbandingan data tersebut tidak menunjukkan korelasi yang baik, maka hal ini disebabkan JST belum mengenali pola pasangan data input dan output dengan baik. Perlu menganalisa data lebih lanjut dan juga diperlukan pengumpulan data yang lebih banyak lagi dengan ketentuan diperlukan pola distribusi yang baik. Adapun hasil dari pengujian validasi ini dipaparkan untuk tiap bagiannya.

4.2.1 Hasil Validasi Kompresor

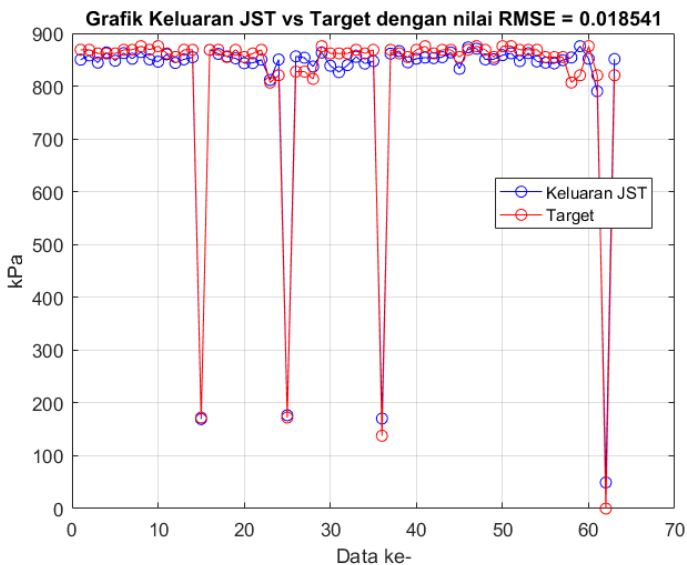
Pada *section* ini dilakukan validasi untuk mengetahui struktur jaringan yang telah divalidasi. Struktur terbaru ini dilakukan uji validasi untuk diketahui nantinya korelasi dari *input* yang diberikan agar sesuai target yang ditetapkan.

Tabel 4.4 Hasil Validasi bagian kompresor

Target MSE	Hidden Node Terbaik	MSE	RMSE
0.1	5	0.000895	0.029923
0.01	3	0.000606	0.024622
0.001	14	0.000344	0.018541
0.0001	5	0.000478	0.021870

Berdasarkan tabel 4.4, hasil validasi menunjukkan terjadi perubahan struktur. Pada tabel ini ditunjukkan struktur terbaik dengan *hiden node* 14 dengan target MSE 0.001 dengan nilai RMSE 0.018541. Perubahan *hidden node* dan nilai MSE maupun

RMSE terjadi karena saat proses validasi, perubahan nilai pada input kompresor mengakibatkan terjadinya pemutakhiran pada bobot dan bias agar bisa menyesuaikan data target yang ditetapkan. Grafik perbandingan keluaran JST terhadap target ditampilkan pada gambar 4.4 dimana label horizontal merupakan urutan data yang mewakili *running hours* GTG dan label vertikal merupakan nilai variabel PCD



Gambar 4.4 Hasil validasi JST pada kompresor

Gambar 4.4 menunjukkan korelasi yang baik antara keluaran JST terhadap target (nilai PCD asli), dengan nilai RMSE 0.018541, maka hasil validasi ini sudah sangat baik untuk bagian kompresor dan menghasilkan model JST dengan struktur 3-14-1

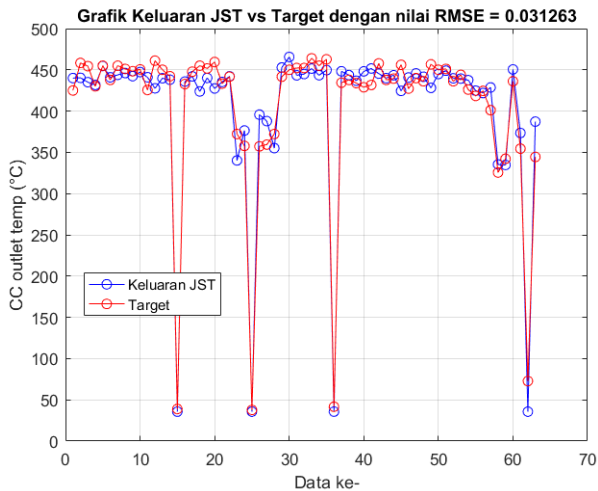
4.2.2 Hasil Validasi Ruang Bakar

Dilakukan validasi pemodelan JST ruang bakar dengan variasi *hidden node*. Maka dari itu dilakukan percobaan dengan variasi hidden node dengan tujuan untuk menentukan nilai MSE paling kecil. Nilai MSE hasil percobaan dapat dilihat pada tabel

Tabel 4.5 Hasil validasi bagian ruang bakar

Target MSE	Hidden Node Terbaik	MSE	RMSE
0.1	14	0.004900	0.070000
0.01	4	0.003300	0.057446
0.001	3	0.000977	0.031263
0.0001	1	0.001100	0.033166

Tabel 4.5 menunjukkan setelah validasi, struktur jaringan terbaik adalah pada *hidden node* 3 dengan target MSE 0.001 dengan nilai MSE 0.00977 dan RMSE 0.031263 nilai MSE dan RMSE ini sudah menunjukkan akurasi hasil validasi dengan sangat baik. Hasil ini kemudian diplot dalam bentuk grafik pada gambar 4.5.

**Gambar 4.5** Hasil validasi model JST pada *CC*

Berdasarkan gambar 4.5, grafik tersebut menunjukkan korelasi yang konvergen dimana keluaran JST dapat mengikuti kurva target (*cc outlet temperature*) dengan baik. Dengan demikian

struktur JST pada bagian ruang bakar adalah 3-3-1 dengan nilai RMSE 0.03126.

4.2.3 Hasil Validasi Turbin

Selanjutnya dilakukan validasi pemodelan JST turbin dengan variasi *hidden node* seperti sebelumnya. Maka dari itu dilakukan percobaan dengan variasi *hidden node* dengan tujuan untuk menentukan nilai MSE paling kecil. Nilai MSE hasil percobaan dapat dilihat pada tabel 4.6.

Tabel 4.6 Hasil Validasi bagian turbin

Target MSE	Hidden Node Terbaik	MSE	RMSE
0.1	12	0.010700	0.103441
0.01	2	0.003400	0.058310
0.001	3	0.004200	0.064807
0.0001	3	0.004800	0.069282

Tabel 4.6 menunjukkan hasil validasi JST untuk turbin dimana performansi terbaik ada pada *hidden node* 2 dengan nilai MSE 0.0034 dan RMSE 0.0583 pada target MSE 0.01. Performansi berdasarkan MSE dan RMSE ini menunjukkan bahwa hasil validasi menunjukkan performa yang sudah sangat baik karena hampir mendekati target MSE pada bagian turbin. Perubahan *hidden node* terhadap hasil uji training karena adanya pemuktahiran dari bobot dan bias yang dihasilkan pada proses validasi sehingga menyebabkan perubahan *hidden node* terbaik.

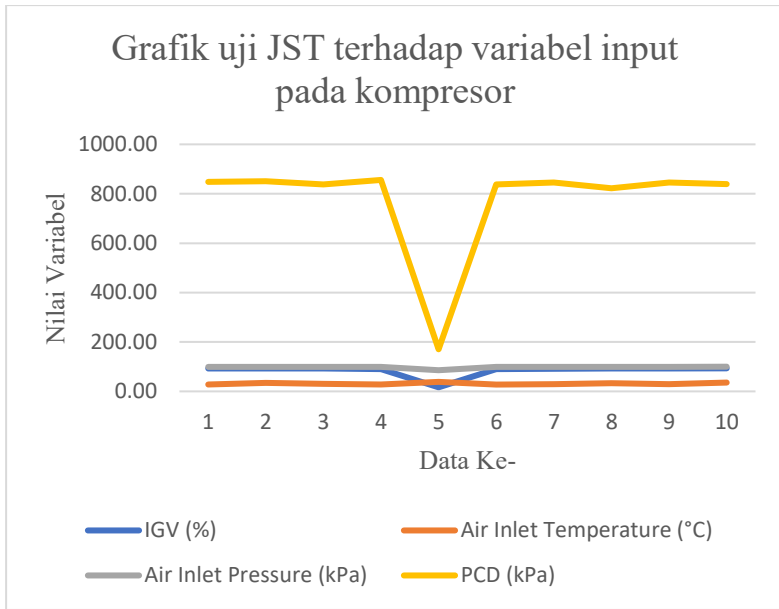
Hasil validasi ini kemudian di plot pada grafik untuk memperjelas konvergensi keluaran JST terhadap target (variabel beban) yang mana pada gambar 4.6 terlihat keluaran JST cukup baik dalam mengikuti pola keluaran data output (target) yang telah ditentukan.



Gambar 4.6 Grafik hubungan keluaran JST terhadap target pada validasi turbin

Dari data yang telah dianalisis dapat disimpulkan untuk turbin setelah proses validasi didapatkan model jaringan JST dengan struktur 3-2-1 dengan nilai RMSE 0.0587.

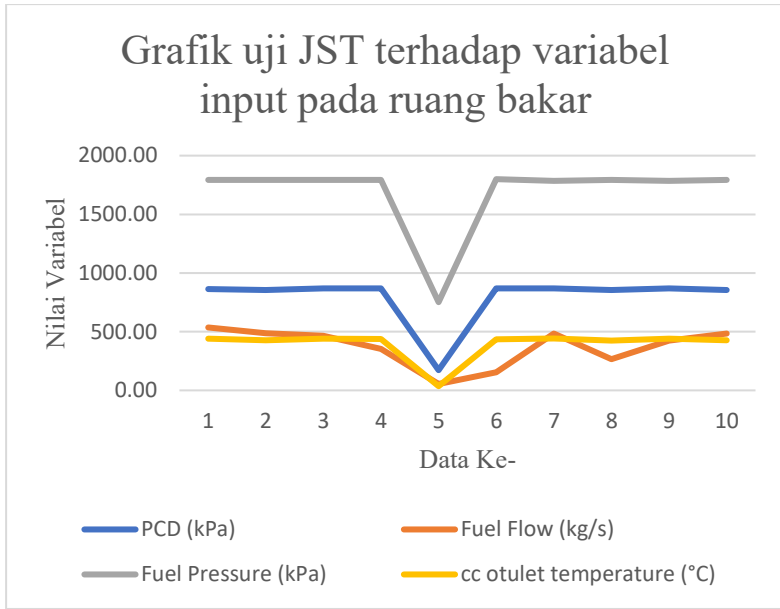
Model JST yang telah didapat pada setiap bagian kemudian dianalisis kinerjanya terhadap variabel input tiap bagian. Pada kompresor terdapat 3 variabel input yakni *air inlet temperature*, *air inlet pressure*, dan IGV. JST yang telah dihasilkan sebelumnya akan digunakan untuk memodelkan dinamika keluaran variabel proses dalam hal ini adalah PCD terhadap ketiga variabel tersebut. Analisis dilakukan untuk mengetahui bilamana JST mampu mengetahui korelasi *input* dan *output* terhadap data uji ini. Data uji ini bersifat independen berjumlah 10 data yang ditampilkan dalam bentuk grafik dimana label horizontal merupakan urutan data dan label vertikal merupakan nilai dari variabel-variabel yang telah ditentukan. Grafik ini ditunjukkan pada gambar 4.7.



Gambar 4.7 Grafik uji JST terhadap input pada kompresor

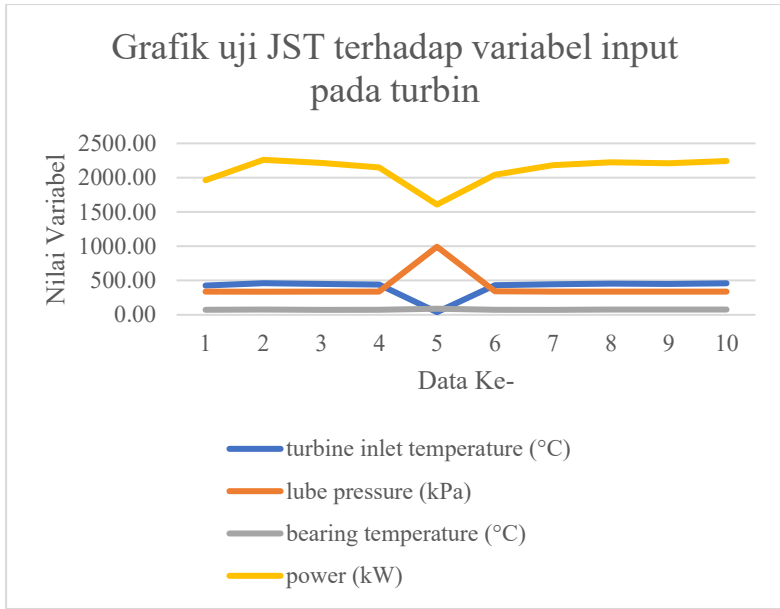
Gambar 4.7 menunjukkan JST mampi mengenali perubahan pola pada input dimana jika terjadi penurunan IGV dan tekanan udara, maka nilai udara yang terkompresi akan menurun, dan dipengaruhi pula oleh udara ambien dimana hal ini sesuai dengan teori yang telah dijelaskan pada bab 2.

Grafik uji JST terhadap input pada ruang bakar juga ditunjukkan pada gambar 4.8. Perubahan dinamika input pada ruang bakar dapat dikenali oleh JST. Dari gambar 4.8, penurunan dari setiap variabel input mengakibatkan variabel proses, dalam hal ini adalah *cc outlet temperature* menurun. Penyebab dari penurunan ini adalah karena nilai kalor pembakaran udara bertekanan juga menurun. Hal ini sesuai dengan teori yang dijelaskan pada bab 2.



Gambar 4.8 Grafik uji JST terhadap input pada ruang bakar

Dinamika proses pada turbin juga dianalisis untuk mengetahui pula kinerja JST pada *section* ini. Adapun hasil dari analisis ini ditampilkan pada gambar 4.9. Gambar 4.9 menunjukkan stigma perubahan input yang menyebabkan dinamika perubahan variabel proses (beban). Pada grafik tersebut, perubahan berbanding lurus terjadi pada *turbine inlet temperature* terhadap beban. Akan tetapi, bagaimanapun perubahan pada *lube pressure* dan *bearing temperature* dapat menyebabkan nilai dari variabel proses ini menurun. Hal ini terjadi karena pada variabel *lube pressure* dan *bearing temperature* perlu dijaga kondisinya karena bila melewati batas atas atau batas bawah dari kondisi operasi tersebut dapat mempengaruhi vibrasi dari *shaft* turbin yang mengakibatkan perubahan RPM turbin dan terjadi penurunan daya yang dihasilkan.



Gambar 4.9 Grafik uji JST terhadap input pada turbin

Dari semua bagian turbin yang telah dianalisis, dapat diketahui bahwa untuk mencapai nilai beban tertentu, perlu adanya monitoring kondisi operasi *turbine inlet temperature* karena variabel ini berdampak langsung terhadap beban yang dihasilkan. Sementara *turbine inlet temperature* yang juga merupakan temperatur keluaran dari ruang bakar dipengaruhi oleh campuran udara bertekanan dan *fuel flow rate*. Udara bertekanan yang baik perlu dijaga kondisinya dengan cara memanipulasi nilai IGV karena IGV merupakan *manipulated variable* yang mempengaruhi langsung tekanan dari udara yang dikompresi.

“halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang telah dilakukan pada bab 4, maka kesimpulan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

- a. *Gas turbine generator* dapat dimodelkan menggunakan jaringan saraf tiruan dengan pasangan data input dan output untuk tiap bagian GTG (kompresor, ruang bakar, dan turbin).
- b. Data *track record* menunjukkan perubahan output yang signifikan berdasarkan input yang diterima untuk setiap bagian GTG.
- c. Telah didapatkan model struktur JST terbaik (*input node-hidden node-output node*). Untuk kompresor, struktur jaringan yang diperoleh adalah 3-14-1 dengan nilai RMSE 0.0185 dimana terdapat 3 *input*, 14 *hidden nodes*, dan 1 *output* yang diperoleh pada target MSE 0.001,
- d. Model JST untuk ruang bakar terdapat jumlah *input* 3, 3 *hidden nodes*, dan 1 *output* sehingga memiliki struktur JST terbaik 3-3-1 dengan nilai RMSE 0.0313 yang diperoleh pada target MSE 0.001.
- e. Model JST untuk turbin terdapat jumlah *input* 3, *hidden nodes* berjumlah 2, dan *output* berjumlah 1 sehingga memiliki struktur JST 3-2-1 dengan nilai RMSE 0.0583 yang diperoleh pada target MSE 0.01.

5.2. Saran

Dalam tugas akhir ini terdapat saran untuk penelitian selanjutnya yaitu dengan memodelkan GTG tidak hanya berdasarkan identifikasi variabel monitoring, namun juga identifikasi variabel kontrol proses. Pada akhirnya, JST mampu meningkatkan nilai efisiensi dari turbin dengan memanipulasi variabel yang dapat dikontrol seperti *inlet guide vane* dan *fuel flow rate*

“halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. A, Q. J and M. R, "*Fault Diagnosis for Gas Turbines Based on the Control System*," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 13, pp. 477-484, 2000.
- [2] M. A, H. A and G. A, "*A Novel Dynamic Modeling of an Industrial Gas Turbine Using Condition Monitoring Data*," *Applied Thermal Engineering*, 2018.
- [3] A. I. Danilin and S. I. Adamov, "*Diagnostics and Monitoring of the Operating Condition of Steam-Turbine Blades*," vol. 41, pp. 19-25, 2007.
- [4] M. B. Rahmoune, A. Hafaifa and M. Guemana, "*Fault Diagnosis in Gas Turbine Based on Neural Networks: Vibration Speed Application*," 2017.
- [5] M. C. Holcomb and R. R. Bitmead, "*GAS TURBINE ANALYTICS USING ARCHIVAL DATA SETS*," Montreal, 2015.
- [6] L. Yuan, B. Avisekh, T. Ravichandran, A. Kumar and G. Heppler, "*Data Analytics for performance monitoring of Gas Turbine Engine*," 2018.
- [7] C. Hasibuan, "*CVX SOLAR TURBINES OJIT PROGRAM*," Gresik.
- [8] H. Jordan, "Energy Education," University of Calgary, 21 July 2018. [Online]. Available: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Gas_turbine. [Accessed 30 July 2019].
- [9] B.-J. Cha and J.-H. Park, "*Experimental Study on the Effect of Inlet Guide Vane of a Centrifugal Compressor*," *Journal of Fluid Machinery*, vol. 5, 2002.
- [10] P. B. Meherwan, *Gas Turbine Engineering Handbook*, Waltham: Elsevier, 2012.
- [11] "Massachusetts Institute of Technology Gas Turbine Lab," . . [Online]. Available: http://web.mit.edu/aeroastro/labs/gtl/early_GT_history.html. [Accessed 30 7 2019].

- [12] H. Ghorbani, M. Rahnama and A. Ghaffari, "*Constrained Model Predictive Control Implementation for a Heavy-Duty Gas Turbine Power Plant*," *WSEAS Transactions on Systems and Control*, vol. 3, pp. 507-516, 2008.
- [13] M. Plis, "*Mathematical modeling of an axial compressor in a gas turbine cycle*," *Journal of Power Technologies*, vol. 96, pp. 194-199, 2016.
- [14] O. C. Jones, F. . Kreith and F. M. White, "*Review—Basic Research Needs in Fluid Mechanics*," *Journal of Fluids Engineering-transactions of The Asme*, vol. 103, no. 4, pp. 509-519, 1981.
- [15] I. N. Levine, *Physical Chemistry*, New York: Mc. Graw Hill, 2009.
- [16] O. A. Khudair, K. A. Abass and N. Abed, "*Theoretical Investigation For The Effect of Fuel Quality on Gas Turbine Power Plants*".
- [17] K. T. Ibrahim and M. O. Ali, "*OPTIMUM PERFORMANCE ENHANCING STRATEGIES OF THE GAS TURBINE BASED ON THE EFFECTIVE TEMPERATURES*," *MATEC Web of Conference*, vol. 38, 2016.
- [18] M. Stewart, *Surface Production Operations of Axial Compressor Based on Centrifugal Modeling with Micro Gas Turbine Analysis*, vol. 2, Houston: Gulf Professional Publishing, 2019, pp. 527-653.
- [19] C. . Stergiou and D. . Siganos, "*Neural networks*," , 2013. [Online]. Available: http://www.doc.ic.ac.uk/~nd/surprise_96/journal/vol4/cs11/report.html. [Accessed 5 8 2019].
- [20] F. . Dandurand, T. . Hannagan and J. . Grainger, "*Neural networks for word recognition: Is a hidden layer necessary?*," , 2010. [Online]. Available: <https://escholarship.org/uc/item/3051q9xv>. [Accessed 25 1 2020].

- [21] L. Fausett, *Fundamental of Neural Network*, Chicago: Pearsing Ltd., 2005.
- [22] D. K. Sarkar, "*Flushing of Lube Oil Piping System*," *Thermal Power Plant*, pp. 131-156, 2017.

“halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN

LAMPIRAN A. HASIL PEMBAGIAN DATA PELATIHAN

Tabel A-1. Kompresor

No.	IGV (%)	air inlet temp (°C)	air inlet pressure (kPa)	PCD (kPa)
1	92.80	28.3	0.99020	868.8
2	93.07	34.8	0.99112	855.0
3	88.25	29.0	0.99419	868.8
4	89.48	30.1	0.99136	868.8
5	20.15	38.4	1.0	203.4
6	93.10	28.6	0.98929	868.8
7	92.80	29.2	0.98719	868.8
8	92.90	30.0	0.98534	868.8
9	92.67	30.7	0.98972	861.9
10	93.11	29.4	0.99772	868.8
11	93.11	28.7	0.98986	868.8
12	88.75	35.3	0.99063	861.9
13	92.54	33.6	0.99001	855.0
14	88.96	28.3	0.99316	875.7
15	89.46	30.1	0.98845	848.1
16	93.02	27.8	0.99001	875.7
17	93.26	30.8	0.99417	855.0
18	92.22	28.2	0.99486	868.8
19	19.15	37.9	1.0	189.6
20	92.96	28.4	0.99315	861.9
21	90.04	31.0	0.99980	861.9

No.	IGV (%)	air inlet temp (°C)	air inlet pressure (kPa)	PCD (kPa)
22	92.91	30.9	0.99901	861.9
23	92.69	28.1	0.98680	861.9
24	93.01	29.1	0.99058	827.4
25	92.65	34.9	0.99094	813.6
26	93.00	28.3	0.98925	827.4
27	92.72	35.5	0.98670	806.7
28	93.15	27.4	0.98929	827.4
29	93.31	27.3	0.99091	875.7
30	93.19	29.0	0.98651	868.8
31	87.77	34.0	0.98986	855.0
32	90.49	32.5	0.99014	868.8
33	92.89	32.6	0.99362	861.9
34	89.63	32.7	0.99127	861.9
35	91.93	32.7	0.98709	868.8
36	93.16	32.7	0.99379	855.0
37	94.13	26.8	0.99768	882.6
38	92.95	32.3	0.99379	855.0
39	89.72	27.7	0.99772	868.8
40	93.04	26.6	0.99969	875.7
41	91.49	32.0	0.98863	861.9
42	92.96	26.7	0.98964	868.8
43	89.63	27.8	0.99172	868.8
44	93.15	35.2	0.98798	848.1
45	93.13	27.4	0.98929	868.8
46	92.10	27.2	0.99192	882.6
47	93.31	36.7	0.99752	855.0

No.	IGV (%)	air inlet temp (°C)	air inlet pressure (kPa)	PCD (kPa)
48	93.15	27.7	0.98986	875.7
49	93.13	30.0	0.99059	868.8
50	93.17	33.6	0.99948	861.9
51	93.04	28.5	0.99057	868.8
52	93.18	27.9	0.98797	875.7
53	93.28	34.9	0.99447	861.9
54	94.82	27.6	0.99702	882.6
55	96.26	33.9	0.98643	841.2
56	96.29	28.4	0.98914	855.0
57	88.34	27.3	0.99832	861.9
58	98.55	27.7	0.99042	855.0
59	94.93	27.7	0.99063	806.7
60	88.95	38.3	0.99588	820.5
61	99.58	34.4	0.99995	834.3
62	91.18	35.6	0.98719	827.4
63	95.12	32.2	0.98891	855.0

Tabel A-2. Ruang bakar

No.	PCD (kPa)	fuel flow (kg/s)	fuel pressure (kPa)	output temp (°C)
1	868.77	0.472	1792.7	435.55556
2	854.98	0.479	1785.805	452.22222
3	868.77	0.333	1792.7	441.66667
4	868.77	0.373	1785.805	446.11111
5	203.4025	0.055	658.4725	37.222222
6	868.77	0.488	1792.7	437.77778

No.	PCD (kPa)	fuel flow (kg/s)	fuel pressure (kPa)	output temp (°C)
7	868.77	0.481	1785.805	445.55556
8	868.77	0.487	1785.805	453.33333
9	861.875	0.486	1785.805	441.11111
10	868.77	0.499	1785.805	443.33333
11	868.77	0.485	1792.7	431.66667
12	861.875	0.358	1785.805	462.22222
13	854.98	0.459	1785.805	452.22222
14	875.665	0.347	1778.91	446.66667
15	848.085	0.348	1785.805	416.11111
16	875.665	0.494	1785.805	446.11111
17	854.98	0.485	1772.015	440.55556
18	868.77	0.370	1778.91	445.55556
19	189.6125	0.055	651.5775	34.444444
20	861.875	0.444	1806.49	434.44444
21	861.875	0.504	1792.7	450.55556
22	861.875	0.485	1792.7	446.11111
23	861.875	0.370	1792.7	427.77778
24	827.4	0.493	1778.91	368.88889
25	813.61	0.491	1778.91	377.22222
26	827.4	0.480	1785.805	364.44444
27	806.715	0.442	1785.805	379.44444
28	827.4	0.494	1778.91	357.22222
29	875.665	0.468	1730.645	443.88889
30	868.77	0.458	1730.645	441.66667
31	854.98	0.547	1737.54	457.77778
32	868.77	0.495	1737.54	462.22222

No.	PCD (kPa)	fuel flow (kg/s)	fuel pressure (kPa)	output temp (°C)
33	861.875	0.488	1744.435	452.77778
34	861.875	0.536	1737.54	454.44444
35	868.77	0.494	1730.645	463.88889
36	854.98	0.468	1730.645	453.33333
37	882.56	0.478	1758.225	447.77778
38	854.98	0.199	1737.54	432.22222
39	868.77	0.364	1730.645	426.66667
40	875.665	0.480	1730.645	435.55556
41	861.875	0.371	1730.645	447.77778
42	868.77	0.409	1751.33	428.88889
43	868.77	0.478	1792.7	437.77778
44	848.085	0.490	1792.7	451.11111
45	868.77	0.380	1785.805	427.77778
46	882.56	0.038	1785.805	447.22222
47	854.98	0.381	1785.805	461.66667
48	875.665	0.496	1785.805	448.33333
49	868.77	0.374	1792.7	443.33333
50	861.875	0.214	1792.7	453.88889
51	868.77	0.487	1799.595	442.22222
52	875.665	0.487	1785.805	451.66667
53	861.875	0.280	1785.805	465.55556
54	882.56	0.335	1778.91	448.33333
55	841.19	0.472	1785.805	416.66667
56	854.98	0.491	1792.7	420
57	861.875	0.353	1792.7	417.22222
58	854.98	0.505	1792.7	412.22222

No.	PCD (kPa)	fuel flow (kg/s)	fuel pressure (kPa)	output temp (°C)
59	806.715	0.445	1785.805	323.88889
60	820.505	0.489	1772.015	408.88889
61	834.295	0.348	1778.91	355.55556
62	827.4	0.349	1806.49	346.66667
63	854.98	0.472	1813.385	388.33333

Tabel A-3. Turbin

No.	turbine inlet temp (°C)	lube pressure (kPa)	bearing temp (°C)	total beban (kW)
1	435.6	339.2	71.7	2175.0
2	452.2	337.9	78.3	2178.0
3	441.7	338.5	73.9	2221.0
4	446.1	339.2	72.8	2240.0
5	37.2	930.8	86.1	1645.0
6	437.8	340.6	72.2	2188.0
7	445.6	339.9	72.8	2275.0
8	453.3	339.2	73.3	2358.0
9	441.1	339.2	73.9	2187.0
10	443.3	338.5	74.4	2266.0
11	431.7	339.2	73.9	2113.0
12	462.2	337.2	77.8	2294.0
13	452.2	338.5	75.6	2208.0
14	446.7	338.5	73.9	2297.0
15	416.1	339.2	74.4	1907.0
16	446.1	339.2	73.3	2323.0
17	440.6	339.9	75.0	2133.0

No.	turbine inlet temp (°C)	lube pressure (kPa)	bearing temp (°C)	total beban (kW)
18	445.6	338.5	73.9	2275.0
19	34.4	910.1	85.0	1432.0
20	434.4	338.5	74.4	2132.0
21	450.6	338.5	74.4	2275.0
22	446.1	339.9	75.6	2231.0
23	427.8	339.2	73.9	2065.0
24	368.9	343.4	73.9	1393.0
25	377.2	341.3	76.1	1349.0
26	364.4	343.4	72.8	1346.0
27	379.4	341.3	77.8	1335.0
28	357.2	344.8	72.8	1277.0
29	443.9	339.9	73.3	2294.0
30	441.7	339.2	75.0	2223.0
31	457.8	337.2	77.8	2284.0
32	462.2	338.5	75.6	2351.0
33	452.8	338.5	75.6	2278.0
34	454.4	337.9	75.6	2260.0
35	463.9	337.9	75.6	2393.0
36	453.3	339.2	75.6	2234.0
37	447.8	337.9	73.3	2347.0
38	432.2	339.2	77.8	2021.0
39	426.7	339.2	73.9	2109.0
40	435.6	338.5	73.3	2213.0
41	447.8	338.5	75.0	2209.0
42	428.9	337.9	73.3	2205.0
43	437.8	338.5	74.4	2221.0

No.	turbine inlet temp (°C)	lube pressure (kPa)	bearing temp (°C)	total beban (kW)
44	451.1	337.9	78.3	2145.0
45	427.8	337.9	74.4	2092.0
46	447.2	337.9	74.4	2354.0
47	461.7	336.5	80.0	2238.0
48	448.3	338.5	75.0	2322.0
49	443.3	338.5	76.7	2237.0
50	453.9	338.5	77.2	2230.0
51	442.2	337.9	76.1	2260.0
52	451.7	337.2	75.0	2378.0
53	465.6	337.2	79.4	2323.0
54	448.3	337.9	75.0	2326.0
55	416.7	339.9	77.8	1804.0
56	420.0	339.2	75.6	1982.0
57	417.2	339.2	74.4	1997.0
58	412.2	339.2	72.8	1936.0
59	323.9	348.2	73.3	868.0
60	408.9	334.4	78.9	1636.0
61	355.6	351.6	73.3	1241.0
62	346.7	351.6	70.0	1096.0
63	388.3	351.6	71.7	1672.0

LAMPIRAN B. HASIL PEMBAGIAN DATA VALIDASI

Tabel B-1. Kompresor

No.	IGV (%)	air inlet temp (°C)	air inlet pressure (kPa)	PCD (kPa)
1	92.695	27.7	0.9897192	868.77
2	90.3539	32.2	0.9928805	868.77
3	88.1768	33.3	0.9904553	861.875
4	87.3144	28.3	0.9901424	861.875
5	92.9165	31.6	0.9911388	861.875
6	93.0757	28.4	0.9952586	868.77
7	92.8861	30.1	0.9921308	868.77
8	92.6247	29.1	0.9970155	875.665
9	92.9254	30.1	0.9918077	868.77
10	93.1358	28.6	0.9904235	875.665
11	92.8891	28.3	0.9942603	861.875
12	92.8368	34.9	0.9928245	854.98
13	92.7549	30.2	0.9917173	868.77
14	90.1713	28.2	0.9914848	868.77
15	16.4513	38.5	0.9886334	172.375
16	90.4989	27.5	0.9952586	868.77
17	91.8576	29.6	0.9943597	868.77
18	92.8118	33.4	0.995389	854.98
19	92.7854	29.2	0.9923713	868.77
20	93.1575	35.2	0.9995586	854.98
21	89.7573	28.5	1.000469	861.875
22	92.8557	29.2	0.9917799	868.77
23	92.7798	35.2	0.9886834	806.715

24	93.1805	28.5	0.992117	820.505
No.	IGV (%)	air inlet temp (°C)	air inlet pressure (kPa)	PCD (kPa)
25	22.1543	36.9	0.9905193	172.375
26	90.7384	27.6	0.9853436	827.4
27	92.7355	26.5	0.9893468	827.4
28	93.3724	34.0	0.9908581	813.61
29	89.0391	27.2	0.9897119	875.665
30	92.4719	33.2	0.9871686	861.875
31	90.9203	32.2	1.0011632	861.875
32	89.9789	32.5	1.0003792	861.875
33	91.044	32.7	0.9926236	868.77
34	90.2061	32.7	0.9873973	861.875
35	92.5023	32.7	0.9912578	868.77
36	17.1346	38.5	0.9900177	137.9
37	92.9176	27.1	0.9942233	868.77
38	90.2566	29.7	0.9955113	861.875
39	93.1611	31.6	1.0004589	854.98
40	88.8105	26.5	1.0001162	868.77
41	93.1412	26.4	0.9891239	875.665
42	93.0354	33.9	0.9941261	861.875
43	90.7484	27.9	0.9919428	868.77
44	90.6506	27.9	0.9863402	868.77
45	89.9443	34.2	0.9900692	854.98
46	88.5277	27.3	0.9966143	868.77
47	87.7286	27.2	0.9893931	875.665
48	93.1233	27.6	0.9921308	868.77
49	93.0341	34.9	0.9980751	854.98

50	93.3113	28.7	0.9942053	875.665
No.	IGV (%)	air inlet temp (°C)	air inlet pressure (kPa)	PCD (kPa)
51	93.0771	28.2	0.9875643	875.665
52	93.1243	27.3	0.9900656	868.77
53	93.1189	29.6	0.9978441	868.77
54	93.007	27.3	0.9907315	868.77
55	94.2705	29.2	0.9897886	854.98
56	99.0488	29.1	0.993147	854.98
57	96.4607	26.4	0.9999505	854.98
58	98.4976	27.5	0.9871896	806.715
59	86.223	28.3	0.9889118	820.505
60	99.6156	27.1	0.998317	875.665
61	94.133	36.7	0.9904235	820.505
62	5.0315	37.6	0.9906268	0
63	96.8367	33.3	0.9958776	820.505

Tabel B-2. Ruang bakar

No.	PCD (kPa)	fuel flow (kg/s)	fuel pressure (kPa)	output temp (°C)
1	868.77	0.4691504	1792.7	425
2	868.77	0.4306115	1785.805	458.33333
3	861.875	0.3341991	1778.91	454.44444
4	861.875	0.3292154	1792.7	430
5	861.875	0.4995184	1689.275	455
6	868.77	0.4863853	1792.7	437.77778
7	868.77	0.490947	1778.91	455

8	875.665	0.4655519	1785.805	451.11111
9	868.77	0.4874892	1785.805	448.33333
No.	PCD (kPa)	fuel flow (kg/s)	fuel pressure (kPa)	output temp (°C)
10	875.665	0.4875974	1785.805	450.55556
11	861.875	0.5359361	1792.7	425.55556
12	854.98	0.4856006	1792.7	461.11111
13	868.77	0.464605	1792.7	450
14	868.77	0.3531926	1792.7	442.22222
15	172.375	0.0546537	751.555	38.888889
16	868.77	0.1550758	1799.595	432.77778
17	868.77	0.4832089	1785.805	447.77778
18	854.98	0.2665855	1792.7	455
19	868.77	0.4243561	1785.805	451.66667
20	854.98	0.4836364	1792.7	459.44444
21	861.875	0.4923972	1792.7	433.33333
22	868.77	0.4832089	1785.805	441.66667
23	806.715	0.3544048	1778.91	372.22222
24	820.505	0.5098864	1785.805	357.77778
25	172.375	0.0606061	717.08	37.777778
26	827.4	0.5202976	1778.91	357.22222
27	827.4	0.3674946	1778.91	359.44444
28	813.61	0.4330141	1785.805	372.22222
29	875.665	0.4562392	1737.54	441.66667
30	861.875	0.5726407	1737.54	450
31	861.875	0.3448052	1737.54	452.22222
32	861.875	0.4559253	1737.54	452.22222
33	868.77	0.4851245	1730.645	463.88889

34	861.875	0.3576515	1737.54	455
35	868.77	0.4330141	1730.645	462.77778
No.	PCD (kPa)	fuel flow (kg/s)	fuel pressure (kPa)	output temp (°C)
36	137.9	0.0546537	841.19	41.666667
37	868.77	0.4054816	1737.54	434.44444
38	861.875	0.3714394	1737.54	437.77778
39	854.98	0.361618	1744.435	433.88889
40	868.77	0.4037446	1737.54	428.88889
41	875.665	0.3768452	1737.54	431.66667
42	861.875	0.4305574	1730.645	457.77778
43	868.77	0.4054816	1785.805	437.77778
44	868.77	0.5019589	1785.805	439.44444
45	854.98	0.3585768	1792.7	456.11111
46	868.77	0.4470455	1785.805	427.22222
47	875.665	0.3585768	1778.91	440
48	868.77	0.4962446	1792.7	436.11111
49	854.98	0.3297565	1778.91	456.66667
50	875.665	0.4107955	1785.805	450
51	875.665	0.4788258	1772.015	451.11111
52	868.77	0.3815909	1785.805	436.11111
53	868.77	0.3341288	1785.805	443.88889
54	868.77	0.2361526	1792.7	426.11111
55	854.98	0.3866775	1792.7	418.33333
56	854.98	0.2917478	1799.595	424.44444
57	854.98	0.4991396	1792.7	401.11111
58	806.715	0.3426623	1785.805	325.55556
59	820.505	0.3325703	1840.965	342.22222

60	875.665	0.3284957	1744.435	436.11111
61	820.505	0.3539719	1778.91	354.44444
No.	PCD (kPa)	fuel flow (kg/s)	fuel pressure (kPa)	output temp (°C)
62	0	0.0557359	27.58	72.777778
63	820.505	0.465947	1758.225	344.44444

Tabel B-3. Turbin

No.	turbine inlet temp (°C)	lube pressure (kPa)	bearing temp (°C)	total beban (kW)
1	425	339.9235	72.222222	2063
2	458.33333	339.9235	75	2369
3	454.44444	337.855	77.777778	2255
4	430	339.234	73.333333	2104
5	455	338.5445	74.444444	2310
6	437.77778	340.613	72.777778	2191
7	455	339.9235	72.222222	2349
8	451.11111	338.5445	73.888889	2345
9	448.33333	338.5445	73.888889	2302
10	450.55556	337.1655	73.888889	2334
11	425.55556	339.234	73.333333	2076
12	461.11111	337.1655	77.777778	2283
13	450	338.5445	73.888889	2326
14	442.22222	337.855	73.333333	2237
15	38.888889	992.88	88.888889	1146
16	432.77778	340.613	73.333333	2157
17	447.77778	338.5445	74.444444	2277

18	455	339.234	76.111111	2227
19	451.66667	338.5445	75	2301
20	459.44444	337.855	77.777778	2263
No.	turbine inlet temp (°C)	lube pressure (kPa)	bearing temp (°C)	total beban (kW)
21	433.33333	338.5445	74.444444	2131
22	441.66667	339.234	75	2207
23	372.22222	341.992	76.666667	1279
24	357.77778	344.0605	73.333333	1281
25	37.777778	951.51	87.222222	1241
26	357.22222	344.75	72.777778	1275
27	359.44444	344.0605	71.111111	1332
28	372.22222	343.371	76.666667	1307
29	441.66667	338.5445	73.888889	2253
30	450	338.5445	77.222222	2206
31	452.22222	338.5445	75.555556	2242
32	452.22222	339.234	75.555556	2269
33	463.88889	338.5445	75.555556	2359
34	455	337.855	75.555556	2296
35	462.77778	339.234	75.555556	2370
36	41.666667	848.085	76.666667	0
37	434.44444	338.5445	73.333333	2189
38	437.77778	338.5445	75	2148
39	433.88889	339.9235	75	2076
40	428.88889	339.234	73.333333	2125
41	431.66667	338.5445	72.777778	2221
42	457.77778	336.476	78.888889	2295
43	437.77778	339.234	75	2213

44	439.44444	337.855	75	2244
45	456.11111	337.1655	80	2242
46	427.22222	338.5445	74.444444	2112
No.	turbine inlet temp (°C)	lube pressure (kPa)	bearing temp (°C)	total beban (kW)
47	440	339.234	72.777778	2221
48	436.11111	338.5445	74.444444	2176
49	456.66667	337.1655	78.888889	2251
50	450	337.855	76.111111	2318
51	451.11111	338.5445	75.555556	2358
52	436.11111	339.234	74.444444	2179
53	443.88889	337.855	75	2244
54	426.11111	338.5445	74.444444	2080
55	418.33333	339.234	75.555556	1940
56	424.44444	340.613	73.333333	2027
57	401.11111	339.9235	73.333333	1838
58	325.55556	346.8185	73.333333	945
59	342.22222	344.0605	66.111111	1114
60	436.11111	334.4075	73.333333	2233
61	354.44444	344.75	75.555556	1163
62	72.777778	6.895	55	0
63	344.44444	358.54	68.888889	1102

LAMPIRAN C. PROGRAM PELATIHAN JST MATLAB

```

clc;clear;close all;warning off;

% Proses membaca data latih dari excel
filename = 'Book2.xlsx';
sheet = 1;
xlRange = 'B2:E64';

Data = xlsread(filename, sheet, xlRange);
data_latih = Data(:,1:3);
target_latih = Data(:,4);
[m,n] = size(data_latih);

for jumlahnode=1:20
    % Pembuatan JST
    net = newff(minmax(data_latih),[jumlahnode
1],{'tansig','purelin'},'trainlm');

    % Memberikan nilai untuk mempengaruhi proses pelatihan
    net.performFcn = 'mse';
    net.trainParam.goal = 0.1; %rmse==sqrt(mse) rmse=10
    net.trainParam.show = 20;
    net.trainParam.epochs = 250;

    % Proses training
    [net_keluaran,tr,Y,E] = train(net,data_latih,target_latih);

    % Hasil setelah pelatihan
    bobot_hidden = net_keluaran.IW{1,1};
    bobot_keluaran = net_keluaran.LW{2,1};
    bias_hidden = net_keluaran.b{1,1};
    bias_keluaran = net_keluaran.b{2,1};
    jumlah_iterasi = tr.num_epochs;
    nilai_keluaran = Y;

```

```

nilai_error = E;
error_MSE = (1/n)*sum(nilai_error.^2);
error_RMSE = sqrt(error_MSE);

if(jumlahnode==1)
    RMSE_best=error_RMSE;
    node_best=1;
    save('netbest.mat','net_keluaran');

save('bobotbiasbest.mat','bobot_hidden','bobot_keluaran','bias_hidden','bias_keluaran');
else
    if(error_RMSE<RMSE_best)
        RMSE_best=error_RMSE;
        node_best=jumlahnode;
        save('netbest.mat','net_keluaran');

save('bobotbiasbest.mat','bobot_hidden','bobot_keluaran','bias_hidden','bias_keluaran');
    end
end
filename=sprintf('net%d.mat', jumlahnode);
save(filename,'net_keluaran');

% Hasil prediksi
hasil_latih = sim(net_keluaran,data_latih);
max_data = 466;
min_data = 34;
hasil_latih = ((hasil_latih-0.1)*(max_data-min_data)/0.8)+min_data;

% Performansi hasil prediksi
filename = 'Book2.xlsx';
sheet = 1;
xlRange = 'G2:G64';

```

```

target_latih_asli = xlsread(filename, sheet, xlRange);

figure,
plotregression(target_latih_asli,hasil_latih,'Regression')
filename=sprintf('reg%d.png', jumlahnode);
saveas(gcf,filename)

figure,
plotperform(tr)
filename=sprintf('perf%d.png', jumlahnode);
saveas(gcf,filename)

figure,
plot(hasil_latih,'bo-')
hold on
plot(target_latih_asli,'ro-')
hold off
grid on
title(strcat(['Grafik Keluaran JST vs Target dengan node
',num2str(jumlahnode),' MSE = ',num2str(error_RMSE),' pada
epoch ',num2str(jumlah_iterasi)]))
xlabel('Data ke-')
ylabel('PCD (kPa)')
legend('Keluaran JST','Target','Location','Best')

filename=sprintf('latih%d.png', jumlahnode);
saveas(gcf,filename)

errorbaru=target_latih_asli'-hasil_latih;
MSE = (1/n)*sum(errorbaru.^2)
RMSE = sqrt(MSE)

end
node_best

```


LAMPIRAN D. PROGRAM VALIDASI JST MATLAB

```

clc;clear;

% load jaringan yang sudah dibuat pada proses pelatihan
load net6.mat

% Proses membaca data uji dari excel
filename = 'Book2.xlsx';
sheet = 1;
xlRange = 'I2:L64';

Data = xlsread(filename, sheet, xlRange);
data_uji = Data(:,1:3);
target_uji = Data(:,4);
[m,n] = size(data_uji);

% Hasil prediksi
hasil_uji = sim(net_keluaran,data_uji);
nilai_error = hasil_uji-target_uji;

max_data = 466;
min_data = 34;
hasil_uji = ((hasil_uji-0.1)*(max_data-min_data)/0.8)+min_data;

% Performansi hasil prediksi
error_MSE = (1/n)*sum(nilai_error.^2);
error_RMSE = sqrt(error_MSE);

filename = 'Book2.xlsx';
sheet = 1;
xlRange = 'N2:N64';

target_uji_asli = xlsread(filename, sheet, xlRange);

```

```
figure,  
plot(hasil_uji,'bo-')  
hold on  
plot(target_uji_asli,'ro-')  
hold off  
grid on  
title(strcat(['Grafik Keluaran JST vs Target dengan node 6 dan  
nilai MSE = ',...  
num2str(error_RMSE)]))  
xlabel('Data ke-')  
ylabel('PCD (kPa)')  
legend('Keluaran JST', 'Target', 'Location', 'Best')  
saveas(gcf,'uji.png')  
  
errorbaru=target_uji_asli'-hasil_uji;  
MSE = (1/n)*sum(errorbaru.^2)  
RMSE = sqrt(MSE)
```

LAMPIRAN E. HASIL TRAINING MATLAB

Tabel E-1. Kompresor dengan Target MSE 0.1

No.	Hidden Nodes	MSE	RMSE	Epoch
1	1	0.0119	0.109087	1
2	2	0.0089	0.09434	1
3	3	0.0079	0.088882	1
4	4	0.0432	0.207846	1
5	5	0.000767	0.027688	1
6	6	0.0016	0.04	1
7	7	0.0123	0.110905	1
8	8	0.0088	0.093808	1
9	9	0.0206	0.143527	1
10	10	0.0018	0.042426	1
11	11	0.007	0.083666	1
12	12	0.0028	0.052915	1
13	13	0.0027	0.051962	1
14	14	0.0037	0.060828	1
15	15	0.0029	0.053852	1
16	16	0.0057	0.075498	1
17	17	0.0049	0.07	1
18	18	0.0195	0.139642	1
19	19	0.0293	0.171172	1
20	20	0.0683	0.261343	1

Tabel E-2. Kompresor dengan Target MSE 0.01

No.	Hidden Nodes	MSE	RMSE	Epoch
1	1	0.0098	0.09899	2
2	2	0.0072	0.08485	1
3	3	0.000403	0.02008	1
4	4	0.0041	0.06403	1
5	5	0.0041	0.06403	2
6	6	0.0061	0.0781	1
7	7	0.0032	0.05657	1
8	8	0.0027	0.05196	1
9	9	0.000321	0.01793	2
10	10	0.0022	0.0469	2
11	11	0.0052	0.07211	1
12	12	0.000995	0.03154	2
13	13	0.0012	0.03464	2
14	14	0.0033	0.05745	1
15	15	0.0049	0.07	1
16	16	0.009	0.09487	1
17	17	0.0094	0.09695	1
18	18	0.0065	0.08062	1
19	19	0.0034	0.05831	1
20	20	0.00067	0.02589	2

Tabel E-3. Kompresor dengan Target MSE 0.001

No.	Hidden Nodes	MSE	RMSE	Epoch
1	1	0.00034	0.01845	3
2	2	0.000409	0.02021	2
3	3	0.000357	0.01888	4
4	4	0.000291	0.01707	2
5	5	0.0006	0.0245	2
6	6	0.000321	0.01792	2
7	7	0.0003	0.01733	2
8	8	0.000565	0.02378	3
9	9	0.000649	0.02548	1
10	10	0.000414	0.02034	2
11	11	0.000253	0.01589	2
12	12	0.000195	0.01396	2
13	13	0.000278	0.01667	2
14	14	0.000318	0.01783	2
15	15	0.000405	0.02013	2
16	16	0.000594	0.02438	2
17	17	0.000614	0.02478	2
18	18	0.000753	0.02744	2
19	19	0.000435	0.02087	2
20	20	0.000678	0.02603	2

Tabel E-4. Kompresor dengan Target MSE 0.0001

No.	Hidden Nodes	MSE	RMSE	Epoch
1	1	0.00018926	0.01376	250
2	2	0.00016481	0.01284	250
3	3	0.0001464	0.0121	250
4	4	0.00013629	0.01167	157
5	5	0.00013198	0.01149	250
6	6	0.00012032	0.01097	250
7	7	0.00011915	0.01092	250
8	8	0.00010446	0.01022	250
9	9	0.0001223	0.01106	250
10	10	0.00010742	0.01036	250
11	11	0.000099599	0.00998	111
12	12	0.000099868	0.00999	108
13	13	0.000099824	0.00999	70
14	14	0.000099932	0.01	169
15	15	0.000099707	0.00999	97
16	16	0.000099757	0.00999	76
17	17	0.000099888	0.00999	101
18	18	0.000099623	0.00998	46
19	19	0.000099974	0.01	88
20	20	0.000098995	0.00995	60

Tabel E-5. Ruang bakar dengan Target MSE 0.1

No.	Hidden Nodes	MSE	RMSE
1	1	0.0404	0.200997512
2	2	0.0385	0.196214169
3	3	0.0123	0.110905365
4	4	0.0045	0.067082039
5	5	0.0062	0.078740079
6	6	0.0057	0.075498344
7	7	0.0539	0.232163735
8	8	0.0285	0.16881943
9	9	0.012	0.109544512
10	10	0.0044	0.066332496
11	11	0.0059	0.076811457
12	12	0.0139	0.117898261
13	13	0.0533	0.230867928
14	14	0.0034	0.058309519
15	15	0.0168	0.129614814
16	16	0.0165	0.128452326
17	17	0.003	0.054772256
18	18	0.0139	0.117898261
19	19	0.002	0.04472136
20	20	0.0016	0.04

Tabel E-6. Ruang bakar dengan Target MSE 0.01

No.	Hidden Nodes	MSE	RMSE	Epoch
1	1	0.0051	0.071414284	3
2	2	0.0052	0.072111026	1
3	3	0.0035	0.059160798	1
4	4	0.0024	0.048989795	1
5	5	0.0064	0.08	1
6	6	0.0029	0.053851648	3
7	7	0.0063	0.079372539	2
8	8	0.009	0.09486833	2
9	9	0.0039	0.06244998	2
10	10	0.0057	0.075498344	5
11	11	0.0042	0.064807407	3
12	12	0.0076	0.087177979	2
13	13	0.0061	0.078102497	2
14	14	0.0091	0.09539392	2
15	15	0.006	0.077459667	2
16	16	0.0025	0.05	1
17	17	0.0078	0.088317609	2
18	18	0.0013	0.036055513	3
19	19	0.0031	0.055677644	1
20	20	0.0011	0.033166248	4

Tabel E-7. Ruang bakar dengan Target MSE 0.001

No.	Hidden Nodes	MSE	RMSE	Epoch
1	1	0.00099344	0.031518883	53
2	2	0.00098705	0.031417352	21
3	3	0.00099592	0.0315582	74
4	4	0.00099867	0.03160174	33
5	5	0.00099955	0.031615661	23
6	6	0.00098728	0.031421012	8
7	7	0.00099501	0.031543779	10
8	8	0.00094986	0.030819799	8
9	9	0.00099629	0.031564062	22
10	10	0.00099618	0.031562319	15
11	11	0.00099984	0.031620247	22
12	12	0.00099655	0.03156818	11
13	13	0.00099976	0.031618982	9
14	14	0.00095107	0.030839423	3
15	15	0.00099962	0.031616768	15
16	16	0.00097824	0.031276828	6
17	17	0.00099249	0.031503809	14
18	18	0.00096224	0.031019994	3
19	19	0.00088169	0.029693265	4
20	20	0.00099162	0.031489998	4

Tabel E-8. Ruang bakar dengan Target MSE 0.0001

No.	Hidden Nodes	MSE	RMSE	Epoch
1	1	0.00099226	0.031500159	54
2	2	0.00060576	0.024612192	137
3	3	0.00067472	0.025975373	250
4	4	0.000422	0.020542639	250
5	5	0.00056115	0.023688605	250
6	6	0.00045355	0.021296713	250
7	7	0.00044734	0.021150414	250
8	8	0.00052075	0.022819947	250
9	9	0.00053579	0.023147138	250
10	10	0.00047238	0.021734305	250
11	11	0.00046554	0.021576376	250
12	12	0.00047483	0.021790594	250
13	13	0.00041623	0.020401716	250
14	14	0.00034335	0.018529706	250
15	15	0.00044913	0.021192687	250
16	16	0.00051787	0.022756757	250
17	17	0.00043432	0.020840345	250
18	18	0.00035167	0.018752866	250
19	19	0.00043209	0.020786775	250
20	20	0.00050563	0.022486218	250

Tabel E-9. Turbin dengan Target MSE 0.1

No.	Hidden Nodes	MSE	RMSE	Epoch
1	1	0.0254	0.159373775	1
2	2	0.0081	0.09	1
3	3	0.0281	0.167630546	2
4	4	0.0174	0.13190906	1
5	5	0.0217	0.147309199	1
6	6	0.0389	0.197230829	1
7	7	0.0023	0.047958315	1
8	8	0.0145	0.120415946	1
9	9	0.0317	0.178044938	1
10	10	0.012	0.109544512	1
11	11	0.0082	0.090553851	1
12	12	0.0027	0.051961524	1
13	13	0.0157	0.125299641	1
14	14	0.0609	0.246779254	1
15	15	0.0123	0.110905365	1
16	16	0.0115	0.107238053	1
17	17	0.0262	0.161864141	1
18	18	0.007	0.083666003	1
19	19	0.005	0.070710678	1
20	20	0.0124	0.111355287	1

Tabel E-10. Turbin dengan Target MSE 0.01

No.	Hidden Nodes	MSE	RMSE	Epoch
1	1	0.0095	0.0974679	8
2	2	0.0017	0.0412311	3
3	3	0.0077	0.0877496	1
4	4	0.005	0.0707107	1
5	5	0.0016	0.04	2
6	6	0.009	0.0948683	3
7	7	0.00099854	0.0315997	2
8	8	0.003	0.0547723	3
9	9	0.00091931	0.0303201	3
10	10	0.0084	0.0916515	1
11	11	0.0038	0.0616441	2
12	12	0.00039588	0.0198967	2
13	13	0.0023	0.0479583	3
14	14	0.0034	0.0583095	1
15	15	0.0058	0.0761577	2
16	16	0.0044	0.0663325	1
17	17	0.0046	0.0678233	1
18	18	0.0015	0.0387298	1
19	19	0.002	0.0447214	1
20	20	0.0032	0.0565685	1

Tabel E-11. Turbin dengan Target MSE 0.001

No.	Hidden Nodes	MSE	RMSE	Epoch
1	1	0.00094609	0.030758576	6
2	2	0.00059859	0.024466099	8
3	3	0.00038983	0.019744113	6
4	4	0.00019487	0.013959585	4
5	5	0.00039947	0.019986746	4
6	6	0.00095684	0.03093283	2
7	7	0.00022002	0.014833071	6
8	8	0.0006491	0.025477441	3
9	9	0.00053251	0.023076178	4
10	10	0.00087119	0.029515928	4
11	11	0.00061119	0.024722257	4
12	12	0.00057002	0.023875092	2
13	13	0.00042638	0.020648971	4
14	14	0.0004045	0.020112185	2
15	15	0.00035478	0.018835605	2
16	16	0.00091898	0.030314683	2
17	17	0.00076391	0.027638922	2
18	18	0.00019707	0.014038162	2
19	19	0.00040507	0.020126351	2
20	20	0.00047865	0.021878071	2

Tabel E-12. Turbin dengan Target MSE 0.0001

No.	Hidden Nodes	MSE	RMSE	Epoch
1	1	0.00024356	0.015606409	11
2	2	0.00019427	0.013938077	250
3	3	0.00014131	0.011887388	42
4	4	0.00014339	0.011974556	250
5	5	0.00012364	0.011119352	250
6	6	0.000099969	0.00999845	243
7	7	0.00012029	0.01096768	250
8	8	0.000098178	0.009908481	155
9	9	0.00009995	0.0099975	206
10	10	0.000099998	0.0099999	128
11	11	0.00011227	0.010595754	250
12	12	0.000099882	0.009994098	125
13	13	0.000097969	0.009897929	95
14	14	0.00009962	0.009980982	211
15	15	0.000099798	0.009989895	125
16	16	0.000099934	0.009996699	63
17	17	0.00009956	0.009977976	121
18	18	0.000098908	0.00994525	70
19	19	0.000099171	0.009958464	63
20	20	0.000099663	0.009983136	39

LAMPIRAN F. HASIL VALIDASI MATLAB

Tabel F-1. Kompresor dengan Target MSE 0.1

No.	Hidden Nodes	MSE	RMSE
1	1	0.0281	0.167630546
2	2	0.0137	0.117046999
3	3	0.0071	0.084261498
4	4	0.057	0.238746728
5	5	0.00089537	0.029922734
6	6	0.0029	0.053851648
7	7	0.0267	0.163401346
8	8	0.0091	0.09539392
9	9	0.0271	0.164620776
10	10	0.0041	0.064031242
11	11	0.0224	0.149666295
12	12	0.0059	0.076811457
13	13	0.0042	0.064807407
14	14	0.0055	0.074161985
15	15	0.0031	0.055677644
16	16	0.0084	0.091651514
17	17	0.0085	0.092195445
18	18	0.0422	0.205426386
19	19	0.0251	0.158429795
20	20	0.0865	0.294108823

Tabel F-2. Kompresor dengan Target MSE 0.01

No.	Hidden Nodes	MSE	RMSE
1	1	0.0245	0.156524758
2	2	0.0074	0.086023253
3	3	0.00060626	0.024622348
4	4	0.0067	0.081853528
5	5	0.0046	0.0678233
6	6	0.006	0.077459667
7	7	0.0058	0.076157731
8	8	0.0057	0.075498344
9	9	0.00090461	0.030076735
10	10	0.0038	0.06164414
11	11	0.0071	0.084261498
12	12	0.0036	0.06
13	13	0.0015	0.038729833
14	14	0.0088	0.093808315
15	15	0.0096	0.09797959
16	16	0.0128	0.113137085
17	17	0.011	0.104880885
18	18	0.0152	0.12328828
19	19	0.0119	0.109087121
20	20	0.0026	0.050990195

Tabel F-3. Kompresor dengan Target MSE 0.001

No.	Hidden Nodes	MSE	RMSE
1	1	0.001	0.031622777
2	2	0.0017	0.041231056
3	3	0.0004288	0.020707245
4	4	0.0003494	0.018692244
5	5	0.0008659	0.029425839
6	6	0.0013	0.036055513
7	7	0.0009681	0.031114145
8	8	0.0011	0.033166248
9	9	0.0017	0.041231056
10	10	0.0204	0.142828569
11	11	0.014	0.118321596
12	12	0.0023	0.047958315
13	13	0.0004546	0.021321351
14	14	0.0003438	0.018541305
15	15	0.0013	0.036055513
16	16	0.0012	0.034641016
17	17	0.0016	0.04
18	18	0.0013	0.036055513
19	19	0.0007806	0.027938683
20	20	0.0013	0.036055513

Tabel F-4. Kompresor dengan Target MSE 0.0001

No.	Hidden Nodes	MSE	RMSE
1	1	0.0339	0.184119526
2	2	0.001	0.031622777
3	3	0.0864	0.293938769
4	4	0.0013	0.036055513
5	5	0.00047831	0.021870299
6	6	0.00092078	0.030344357
7	7	0.0022	0.046904158
8	8	0.0008836	0.02972541
9	9	0.0019	0.043588989
10	10	0.0029	0.053851648
11	11	0.0301	0.173493516
12	12	0.0034	0.058309519
13	13	0.0029	0.053851648
14	14	0.0121	0.11
15	15	0.0051	0.071414284
16	16	0.00093404	0.030562068
17	17	0.007	0.083666003
18	18	0.0201	0.141774469
19	19	0.0111	0.105356538
20	20	0.0287	0.169410743

Tabel F-5. Ruang bakar dengan Target MSE 0.1

No.	Hidden Nodes	MSE	RMSE
1	1	0.0404	0.2010
2	2	0.0395	0.1987
3	3	0.015	0.1225
4	4	0.0096	0.0980
5	5	0.0165	0.1285
6	6	0.007	0.0837
7	7	0.0548	0.2341
8	8	0.0307	0.1752
9	9	0.0156	0.1249
10	10	0.0103	0.1015
11	11	0.0059	0.0768
12	12	0.0242	0.1556
13	13	0.0714	0.2672
14	14	0.0049	0.0700
15	15	0.0325	0.1803
16	16	0.0444	0.2107
17	17	0.0141	0.1187
18	18	0.0162	0.1273
19	19	0.0185	0.1360
20	20	0.0467	0.2161

Tabel F-6. Ruang bakar dengan Target MSE 0.01

No.	Hidden Nodes	MSE	RMSE
1	1	0.0058	0.07616
2	2	0.0266	0.16310
3	3	0.012	0.10954
4	4	0.0033	0.05745
5	5	0.0066	0.08124
6	6	0.0079	0.08888
7	7	0.0059	0.07681
8	8	0.0223	0.14933
9	9	0.0352	0.18762
10	10	0.0157	0.12530
11	11	0.0083	0.09110
12	12	0.0071	0.08426
13	13	0.0291	0.17059
14	14	0.0104	0.10198
15	15	0.0095	0.09747
16	16	0.0058	0.07616
17	17	0.0081	0.09000
18	18	0.0083	0.09110
19	19	0.0257	0.16031
20	20	0.0108	0.10392

Tabel F-7. Ruang bakar dengan Target MSE 0.001

No.	Hidden Nodes	MSE	RMSE
1	1	0.00100	0.03162
2	2	0.00120	0.03464
3	3	0.00098	0.03126
4	4	0.00440	0.06633
5	5	0.00220	0.04690
6	6	0.00160	0.04000
7	7	0.00160	0.04000
8	8	0.00330	0.05745
9	9	0.00170	0.04123
10	10	0.00720	0.08485
11	11	0.10180	0.31906
12	12	0.00770	0.08775
13	13	0.00250	0.05000
14	14	0.02630	0.16217
15	15	0.00430	0.06557
16	16	0.00540	0.07348
17	17	0.00350	0.05916
18	18	0.04060	0.20149
19	19	0.00540	0.07348
20	20	0.00130	0.03606

Tabel F-8. Ruang bakar dengan Target MSE 0.0001

No.	Hidden Nodes	MSE	RMSE
1	1	0.0011	0.03317
2	2	0.0115	0.10724
3	3	0.3886	0.62338
4	4	10.3192	3.21235
5	5	8.1328	2.85181
6	6	0.0044	0.06633
7	7	0.037	0.19235
8	8	0.1861	0.43139
9	9	0.0466	0.21587
10	10	0.1475	0.38406
11	11	0.0679	0.26058
12	12	0.269	0.51865
13	13	0.8282	0.91005
14	14	0.3772	0.61417
15	15	0.9701	0.98494
16	16	0.0629	0.25080
17	17	0.0244	0.15620
18	18	0.1014	0.31843
19	19	0.2882	0.53684
20	20	0.04	0.20000

Tabel F-9. Turbin dengan Target MSE 0.1

No.	Hidden Nodes	MSE	RMSE
1	1	0.0463	0.2152
2	2	0.0166	0.1288
3	3	0.0348	0.1865
4	4	0.0369	0.1921
5	5	0.0256	0.1600
6	6	0.0674	0.2596
7	7	0.0294	0.1715
8	8	0.0988	0.3143
9	9	0.0399	0.1997
10	10	0.0485	0.2202
11	11	0.011	0.1049
12	12	0.0107	0.1034
13	13	0.0862	0.2936
14	14	0.0584	0.2417
15	15	0.0198	0.1407
16	16	0.059	0.2429
17	17	0.0494	0.2223
18	18	0.0194	0.1393
19	19	0.0488	0.2209
20	20	0.0851	0.2917

Tabel F-10. Turbin dengan Target MSE 0.01

No.	Hidden Nodes	MSE	RMSE
1	1	0.0285	0.1688
2	2	0.0034	0.0583
3	3	0.031	0.1761
4	4	0.0306	0.1749
5	5	0.0231	0.1520
6	6	0.0211	0.1453
7	7	0.0061	0.0781
8	8	0.0094	0.0970
9	9	0.0146	0.1208
10	10	0.0248	0.1575
11	11	0.0127	0.1127
12	12	0.0109	0.1044
13	13	0.0046	0.0678
14	14	0.1689	0.4110
15	15	0.0289	0.1700
16	16	0.0303	0.1741
17	17	0.0143	0.1196
18	18	0.0288	0.1697
19	19	0.0817	0.2858
20	20	0.0273	0.1652

Tabel F-11. Turbin dengan Target MSE 0.001

No.	Hidden Nodes	MSE	RMSE
1	1	0.0069	0.0831
2	2	0.0102	0.1010
3	3	0.0042	0.0648
4	4	0.053	0.2302
5	5	0.0127	0.1127
6	6	0.0166	0.1288
7	7	0.0066	0.0812
8	8	0.0201	0.1418
9	9	0.0077	0.0877
10	10	0.0046	0.0678
11	11	0.016	0.1265
12	12	0.0273	0.1652
13	13	0.0275	0.1658
14	14	0.0094	0.0970
15	15	0.0196	0.1400
16	16	0.0706	0.2657
17	17	0.0062	0.0787
18	18	0.0098	0.0990
19	19	0.0515	0.2269
20	20	0.0226	0.1503

Tabel F-12. Turbin dengan Target MSE 0.0001

No.	Hidden Nodes	MSE	RMSE
1	1	0.0056	0.0748
2	2	0.0127	0.1127
3	3	0.0048	0.0693
4	4	0.2277	0.4772
5	5	0.3772	0.6142
6	6	0.0089	0.0943
7	7	0.0083	0.0911
8	8	0.602	0.7759
9	9	0.1578	0.3972
10	10	0.0568	0.2383
11	11	0.7478	0.8648
12	12	0.0327	0.1808
13	13	0.272	0.5215
14	14	0.0732	0.2706
15	15	0.0333	0.1825
16	16	0.0793	0.2816
17	17	0.1898	0.4357
18	18	0.126	0.3550
19	19	0.0286	0.1691
20	20	0.0099	0.0995

BIOGRAFI PENULIS

Penulis bernama I Gusti Agung Krisna Manggala Putra dilahirkan di Medan, 14 Juli 1997. Penulis merupakan anak pertama dari 3 bersaudara. Penulis telah menyelesaikan pendidikan di SD Wukirretawu tahun 2009, SMPN 01 Cilegon tahun 2012, SMAN 01 Denpasar tahun 2015, dan sedang menempuh pendidikan S1 Teknik Fisika FTI di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya hingga sekarang, melalui jalur Mandiri



2015. Penulis memiliki pengalaman program *internship* selama 1 bulan di PT. Indonesia Power UP Suralaya. Pada bulan Januari 2020 penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **Pemodelan Gas Turbine Generator berbasis Jaringan Saraf Tiruan**. Bagi pembaca yang memiliki kritik, saran, atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir ini, maka dapat menghubungi melalui *email*: igustiagungkrisna@gmail.com